IDEOs
Centro de Investigación
y Producción Científica

Ingeniería de membranas en tratamiento de agua

Esteban Cristobal Castellanos Borrero



Ingeniería de membranas en tratamiento de agua

Editor

IDEOs
Centro de Investigación
y Producción Científica

Esteban Cristobal Castellanos Borrero

eccastell@gmail.com

https://orcid.org/0000-0002-9958-4485

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima – Perú

PREFACIO

Este libro nace de mi recorrido profesional. Empecé en el Centro de Investigación de Petróleos del Perú, me formé después en el Centro de Investigación de la Energía del Canadá y en la Universidad de Clausthal, en Alemania, y seguí aprendiendo en el ejercicio práctico de la profesión. De esas etapas me quedó una convicción: la ingeniería y la ciencia de las membranas no son una disciplina aislada, sino un lenguaje que conecta la academia con la industria y las tradiciones científicas de Europa y de América.

Menciono estas experiencias para agradecer a quienes ayudaron a madurar lo que sé de este campo fascinante. Al Dr. Brian Farnand, del Instituto de Investigación de la Energía de Canadá; a los profesores Takeshi Matsuura y Srinivasa Sourirajan, a quienes tuve la oportunidad de conocer en la Universidad de Ottawa; al Ing. Enrique Salas, de Hidroquímica, y al Ing. Renán Rojas, que me inculcaron la dedicación a la ingeniería del agua. Y al Prof. Dr. Jorge Angulo, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por darme la oportunidad de formar parte de su escuela de posgrado. Sus enseñanzas, sus debates y su ejemplo son los pilares sobre los que se asienta este libro.

Cada vez hay más demanda de agua, las fuentes convencionales están bajo presión y reducir el impacto ambiental se ha vuelto una necesidad. En ese contexto, la ingeniería de membranas ha crecido de manera notable. Estas tecnologías separan partículas y sustancias disueltas mediante barreras selectivas, y se aplican en la potabilización, el tratamiento de aguas residuales, el reúso industrial y la desalinización. Pero no funcionan por sí solas: hay que elegirlas bien, conocer el agua que se va a tratar y operar la planta atendiendo al ensuciamiento, al consumo de energía y al destino de las corrientes residuales.

Hoy contamos con mejores materiales, técnicas de caracterización fisicoquímica, aportes de la microbiología y modelos matemáticos que permiten diseñar y optimizar los sistemas con más criterio. Entender cómo se transportan los solutos y cómo interactúan con la superficie y la estructura de la membrana ayuda a explicar su rendimiento y a prever sus límites. Por eso la ingeniería del agua exige trabajar desde varias disciplinas a la vez: fundamentos científicos, datos experimentales, balances de materia, evaluación económica y criterios ambientales.

Las membranas tienen una historia larga, ligada al estudio de la permeabilidad y la selectividad de las barreras semipermeables. Con los avances en la ciencia de polímeros, en los métodos de fabricación y en las técnicas de caracterización, aquellas observaciones sobre el transporte a través de membranas se convirtieron en procesos de interés industrial. Hoy la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa forman parte de muchos esquemas de tratamiento, y su evolución sigue buscando más selectividad, menor consumo de energía, mejor resistencia al ensuciamiento y mayor durabilidad.

Este libro quiere continuar esa tradición de descubrimiento y aplicación. Mi intención es ofrecer al lector los conceptos ya establecidos y también las herramientas para enfrentar lo que viene: diseñar procesos más limpios, eficientes y circulares que respondan a una sociedad en constante cambio, sin perder de vista las oportunidades y las responsabilidades de nuestra región latinoamericana.

INTRODUCCIÓN

Este libro reúne lo que he aprendido investigando el tratamiento del agua a lo largo de mi carrera profesional y docente. Lo escribí pensando en estudiantes de química, ingeniería química y otras carreras afines, y también en profesionales que buscan una visión actualizada de estos procesos, en especial en Latinoamérica. Procuré usar un lenguaje claro sin renunciar al rigor en los conceptos.

El Capítulo 1 presenta la ingeniería de membranas aplicada al agua: cómo surgió, qué conceptos la sostienen, cuáles son sus familias tecnológicas y para qué se usan, desde la potabilización hasta el reúso y la desalinización. También discute qué pueden aportar estas tecnologías frente a la escasez de agua y a los objetivos de sostenibilidad, y qué necesidades y oportunidades tiene América Latina.

El Capítulo 2 explica la base fisicoquímica: las fuerzas impulsoras, el transporte de materia, la presión osmótica, el flujo de permeado, el rechazo de solutos y los balances de masa. No los presento como teoría aislada, sino como lo que permite interpretar cómo está funcionando una operación, reconocer sus límites y hacer los primeros cálculos de diseño.

En el Capítulo 3 paso a las membranas mismas: los materiales poliméricos, cerámicos y compuestos, cómo se fabrican y qué propiedades pesan en la elección: resistencia química y mecánica, permeabilidad, selectividad, estabilidad y tendencia al ensuciamiento. Una membrana se elige según el agua que se va a tratar, las condiciones de operación y lo que se quiere lograr; no existe una mejor en abstracto. Ese capítulo incluye también cómo se caracteriza una membrana, con una advertencia: los datos de laboratorio hay que leerlos según las condiciones del ensayo y las necesidades reales del proceso.

Los Capítulos 4 al 7 recorren los procesos de membrana de uno en uno. La microfiltración y la ultrafiltración retienen partículas, sólidos suspendidos y ciertos microorganismos, y sirven además como pretratamiento de etapas posteriores; allí se explican la filtración frontal y la tangencial, la evolución del flujo, la formación de depósitos y la limpieza. La nanofiltración y la ósmosis inversa pasan a los solutos disueltos y a las sales: la selectividad, la presión aplicada, la presión osmótica, la recuperación, el rechazo y la corriente de concentrado. En cada caso reviso el mecanismo

de separación, la configuración de los módulos, las variables de operación, la calidad del agua de alimentación y la del permeado que se necesita.

A lo largo de esos capítulos se repite una idea: la polarización por concentración, el ensuciamiento y la pérdida de carga limitan el rendimiento y aumentan la energía y la limpieza que se requieren. Por eso lo que funciona en el laboratorio no puede llevarse tal cual al diseño industrial sin considerar la diferencia de escala.

Los Capítulos 8 al 11 amplían el panorama a otras tecnologías: los biorreactores de membrana (MBR), la electrodiálisis con sus variantes, la ósmosis directa y la destilación por membrana con gas de barrido.

Los Capítulos 12 al 15 tratan de decidir y de operar. Muestran cómo combinar las membranas entre sí y con procesos físicos, químicos y biológicos; cómo diseñar, dimensionar y evaluar técnica y económicamente sistemas de reciclaje y reúso; qué plantea la desalinización avanzada y la gestión de salmueras; y cómo se operan, controlan, monitorean y mantienen las plantas. Elegir una tecnología no depende solo de la calidad del permeado: cuentan también la energía y los reactivos, el manejo del concentrado, la frecuencia de limpieza, la vida útil de los módulos y los costos de inversión y de operación.

El Capítulo 16 reúne las referencias bibliográficas. Los cinco anexos son de uso práctico para quien diseña plantas de ósmosis inversa: una metodología de diseño profesional (A), un manual de ingeniería (B), un manual de simulación y modelado (C), una biblioteca profesional de ingeniería (D) y un compendio de normas técnicas aplicables (E). Los modelos y las herramientas computacionales ayudan a comparar escenarios, siempre que partan de hipótesis explícitas y se contrasten con datos experimentales o de operación.

Deseo que el libro sirva tanto a quien se está formando como a quien ya trabaja, enseña o investiga en este campo, y que ayude a decidir mejor en una región donde la desalinización, el reúso y la mejora de los procesos de tratamiento pueden contribuir a una gestión más segura y eficiente del agua.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS EN INGENIERÍA DEL AGUA

Ningún otro recurso natural pesa tanto en la vida y en las sociedades modernas como el agua. De ella dependen a la vez el crecimiento de la economía, la energía, la industria, los alimentos que se producen, el equilibrio de los ecosistemas y la salud pública. En todas las épocas, de las primeras civilizaciones a las economías industrializadas de hoy, el avance humano ha ido de la mano de contar con agua en cantidad suficiente y con buena calidad.

Resulta paradójico que la Tierra, llamada el "planeta azul", ofrezca tan poca agua dulce apta para consumo humano. Alrededor del 97 % del agua existente es salada, y solo cerca de 3 % es dulce. Gran parte de ese 3 % se encuentra retenida en glaciares, en casquetes polares o en acuíferos profundos, de modo que el agua superficial que queda para la población, la agricultura, la industria y los servicios es bastante menor.

Lo que va del siglo XXI trajo una presión creciente sobre el agua disponible. Influyen la población que aumenta, las ciudades que se expanden con rapidez, la agricultura intensiva, una industria que produce más y los efectos que impone el cambio climático. Por eso, muchas regiones del mundo sufren escasez de agua, acuíferos sobreexplotados, ríos, lagos y aguas subterráneas contaminados, y ecosistemas acuáticos cada vez más deteriorados.

Para responder a esos retos surgieron tecnologías que amplían la oferta de agua: tratan fuentes no convencionales, reusan aguas residuales, recuperan recursos y desalinizan el agua del mar. Entre las que se desarrollaron en décadas recientes, la separación con membranas ha resultado una de las opciones más eficientes, versátiles y sostenibles ante una demanda en aumento por agua de calidad superior.

Con las membranas, la Ingeniería del Agua cambió de rumbo: hoy se obtiene agua potable desde el mar, se aprovechan las aguas residuales en el riego y en la industria, se eliminan contaminantes emergentes, se concentran y recuperan compuestos de interés y se integran procesos avanzados dentro de la economía circular. Están presentes en miles

de instalaciones del mundo y siguen evolucionando con nuevos materiales, mejores procesos de fabricación y herramientas digitales que sirven para monitorear y optimizar su desempeño.

Este libro busca presentar, de manera completa, la Ingeniería de Membranas orientada al tratamiento del agua. Muchos textos especializados dan por sentado un nivel avanzado de Ingeniería Química; aquí, en cambio, los fundamentos científicos se construyen poco a poco, hasta llegar al diseño de procesos. Así, quienes estudian o ejercen Ingeniería Ambiental, Civil o Sanitaria, Biología, Química u otras disciplinas afines entenderán cómo operan estos sistemas, por qué funcionan como funcionan y qué criterios de ingeniería respaldan su diseño y operación.

El enfoque adoptado busca integrar ciencia, ingeniería e innovación. Cada capítulo combina fundamentos teóricos con aplicaciones industriales, estudios de caso, problemas resueltos, ejercicios de diseño y herramientas computacionales, permitiendo que el lector desarrolle una comprensión progresiva y aplicada de las tecnologías de membranas.

1.1 EL AGUA Y LOS DESAFÍOS DEL SIGLO XXI

Para cualquier nación, el agua es un recurso estratégico de primer orden. Con ella se producen alimentos, se abastece a la población, se mantiene la industria, se genera energía y se conservan los ecosistemas. Pero los ríos, lagos y acuíferos soportan una presión creciente, y por eso manejar el agua de modo sostenible es hoy un desafío mayor, a la vez científico, tecnológico y político, del siglo XXI.

A lo largo de la historia, las civilizaciones prosperaron allí donde había agua. Los primeros asentamientos urbanos nacieron a orillas de grandes ríos: el Nilo, el Éufrates, el Tigris, el Huang He y el Indo. Con esas aguas se pudo cultivar, comerciar y organizarse en sociedad. Hoy la tecnología permite llevar agua lejos y tratar orígenes de peor calidad, pero tenerla a la mano sigue marcando la economía de un país y el bienestar de su gente.

Varias razones explican que la demanda mundial de agua suba. Para empezar, hay más gente, y eso eleva el uso doméstico y obliga a producir más alimentos. A la vez, la industria usa agua para fabricar, generar vapor, refrigerar, limpiar y elaborar sus productos. La agricultura consume cerca del 70 % del agua dulce del mundo y, encima, debe producir más porque la población no deja de aumentar.

El cambio climático agrava el cuadro: altera la manera en que llueve, vuelve más frecuentes las sequías y las inundaciones y afecta la recarga natural de los acuíferos. Por ello, el agua superficial y subterránea disponible se reduce en muchas regiones, y se vuelve necesario acudir a fuentes alternativas: agua de mar, aguas salobres y aguas residuales tratadas para reúso.

Figura 1.1.

El ciclo integral del agua y los desafíos del siglo XXI



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011), Porter (1990), Scott (1995) y Wang et al. (2011).

La Figura 1.1 recorre cómo han evolucionado las membranas y deja ver cuán unidos van el progreso científico y lo que necesita la sociedad. Estudiar la ósmosis y la difusión, en un principio, dio lugar a nuevos procesos de separación; hoy estos entregan cada día millones de m³ de agua potable.

Tabla 1.1

Principales desafíos de la Ingeniería del Agua en el siglo XXI

Desafío	**Impacto sobre los recursos hídricos**	**Respuesta tecnológica**
Crecimiento poblacional	Incremento de la demanda de agua potable	Optimización del tratamiento, reúso y desalinización

Desafío	Impacto sobre los recursos hídricos	Respuesta tecnológica
Urbanización acelerada	Mayor generación de aguas residuales	Tecnologías avanzadas de tratamiento y reutilización
Cambio climático	Variabilidad hidrológica y sequías	Gestión integrada del recurso hídrico y fuentes alternativas
Contaminación industrial y agrícola	Deterioro de la calidad del agua	Procesos de membranas y tratamientos avanzados
Escasez hídrica	Reducción de la disponibilidad de agua dulce	Reúso de aguas residuales y desalinización

Nota. Elaboración propia con base en UNESCO (2024), UN-Water (2024), FAO (2023) y Naciones Unidas (2023).

1.2 LA CRISIS MUNDIAL DEL AGUA

La crisis mundial del agua constituye uno de los mayores desafíos para la humanidad durante el siglo XXI. A diferencia de otros recursos naturales cuya disponibilidad depende principalmente de la cantidad existente, el problema del agua está determinado simultáneamente por cuatro factores: **cantidad, calidad, distribución geográfica y capacidad de gestión**. En consecuencia, la escasez de agua no debe interpretarse únicamente como la ausencia física del recurso, sino también como la incapacidad de disponer de agua con la calidad adecuada, en el lugar y momento requeridos para satisfacer las necesidades de la población, la agricultura, la industria y los ecosistemas.

Aunque el planeta posee aproximadamente **1,386 millones de kilómetros cúbicos de agua**, cerca del **97 % corresponde a agua salada** contenida en océanos y mares. Del 3 % restante clasificado como agua dulce, alrededor de dos tercios permanecen almacenados en glaciares y casquetes polares, mientras que una parte importante se encuentra confinada en acuíferos profundos de difícil acceso. Como resultado, menos del 1 % del agua dulce mundial está disponible de forma inmediata en ríos, lagos y acuíferos superficiales, constituyendo la principal fuente para el abastecimiento humano y las actividades productivas.

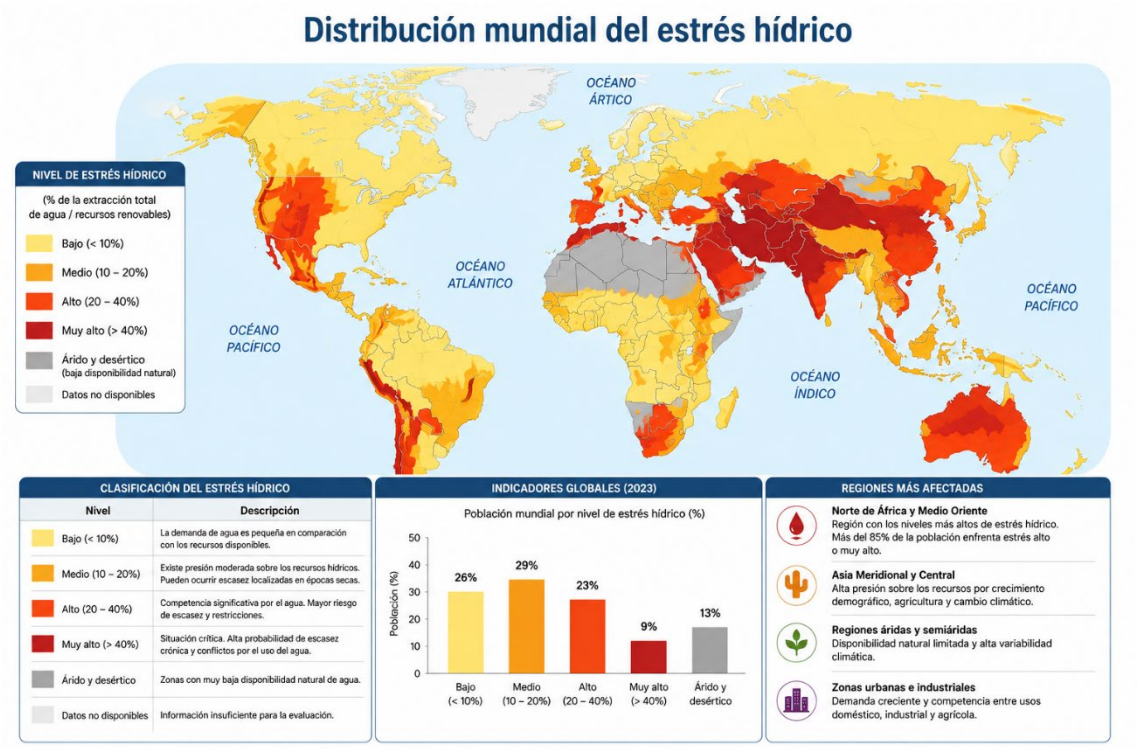
Esta escasez pesa más aún si se mira cómo ha crecido la demanda. Durante el último siglo, el uso mundial de agua se ha incrementado más rápido que la población, a causa de la industrialización, la urbanización, el mayor bienestar y una agricultura intensiva que se expande. Varios organismos internacionales prevén que la tendencia

seguirá en las próximas décadas, con más presión sobre las fuentes de agua y la necesidad de nuevas estrategias que aseguren la seguridad hídrica.

La distribución espacial del agua constituye otro elemento determinante. Existen regiones con abundantes recursos hídricos y baja densidad poblacional, mientras que otras concentran elevadas demandas sobre recursos extremadamente limitados. Esta desigualdad genera escenarios de estrés hídrico que afectan la competitividad económica, la producción agrícola y la estabilidad social.

Figura 1.2.

Distribución mundial del estrés hídrico



Nota. Elaboración propia con base en UNESCO (2024), UN-Water (2024), FAO (2023), World Resources Institute (2023) y Naciones Unidas (2023).

En la Figura 1.2 se ve, a grandes rasgos, dónde se ejerce más presión sobre el agua. El estrés hídrico es mayor allí donde se juntan mucha población, lluvias escasas y un trabajo agrícola e industrial muy intenso. Sirven de ejemplo Oriente Medio, el norte africano, Asia Central, el oeste estadounidense, el norte mexicano, la costa del Pacífico sudamericano, varias regiones australianas y una porción del sur europeo.

Dentro de un mismo país también se reparte desigualmente el agua. En el Perú, la mayoría de los habitantes y buena parte de la economía están asentados sobre el Pacífico, que cuenta con una porción relativamente pequeña de la disponibilidad hídrica nacional.

La vertiente amazónica, al contrario, concentra el mayor volumen de agua superficial y tiene muchos menos habitantes. Por eso, para desarrollarse, el país necesita gestionar bien el agua, reusarla y desalinizar.

1.2.1 CALIDAD DEL AGUA: UN DESAFÍO CRECIENTE

Que haya agua no depende solo de cuánta hay, sino de qué calidad tiene. Descargas domésticas, industriales, mineras y agrícolas han ido deteriorando cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos. Se suman los contaminantes emergentes: microplásticos, compuestos perfluorados, productos farmacéuticos y restos de artículos de cuidado personal, que los procesos convencionales logran eliminar solo en parte.

Si empeora la calidad del agua, tratarla cuesta bastante más y quedan menos opciones para abastecer de agua potable a una población. Por eso, muchas ciudades terminan adoptando tratamientos avanzados que remuevan contaminantes específicos y les permitan cumplir las normas fijadas para el consumo humano y otros usos.

Tabla 1.2

Principales factores que contribuyen a la crisis mundial del agua

Factor	Efecto sobre el recurso hídrico	Respuesta tecnológica
Crecimiento poblacional	Incremento de la demanda de agua potable y saneamiento	Optimización del uso del agua, reducción de pérdidas y reúso
Urbanización	Mayor generación de aguas residuales	Tratamientos avanzados y reutilización
Industrialización	Aumento del consumo de agua y generación de efluentes	Tecnologías de membranas y recuperación de recursos
Agricultura intensiva	Elevada extracción de agua y contaminación difusa	Riego eficiente y reúso de aguas tratadas
Cambio climático	Sequías, inundaciones y variabilidad hidrológica	Gestión integrada del recurso hídrico y desalinización
Contaminantes emergentes	Deterioro de la calidad del agua	Procesos avanzados de separación mediante membranas

Nota. Elaboración propia con base en UNESCO (2024), UN-Water (2024), FAO (2023), APHA et al. (2023) y Crittenden et al. (2012).

1.2.2 SEGURIDAD HÍDRICA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

El concepto de **seguridad hídrica** ha adquirido una importancia creciente durante las últimas décadas y constituye uno de los ejes centrales de las políticas internacionales relacionadas con el agua. Desde una perspectiva amplia, la seguridad hídrica puede definirse como la capacidad de una sociedad para garantizar el acceso sostenible a cantidades suficientes de agua de calidad adecuada, proteger a la población frente a riesgos asociados al agua y preservar los ecosistemas que sustentan el ciclo hidrológico.

El concepto va más allá de abastecer de agua potable: incluye también los alimentos, la energía, la industria, el cuidado del ambiente y la adaptación al clima cambiante. Por tanto, asegurar el agua exige manejar el recurso de forma integrada, juntando infraestructura, innovación tecnológica, regulación, educación y planificación del territorio.

Aquí las membranas tienen un rol estratégico: permiten usar fuentes no convencionales que antes se descartaban por inviables técnica o económicamente. Desalinizar agua de mar, tratar a fondo las aguas residuales para su reúso y recuperar agua dentro de procesos industriales son casos concretos en que la innovación tecnológica fortalece la seguridad hídrica y acerca un desarrollo más sostenible.

Reflexión para el ingeniero del agua

La crisis mundial del agua es más que escasez: es un problema complejo que abarca distribución, gobernanza, eficiencia, calidad y disponibilidad. Ante ese escenario, quien ejerce la ingeniería del agua no se limita a levantar plantas de tratamiento; ofrece soluciones que benefician la salud pública, las ciudades resilientes, la industria competitiva y el medio ambiente. Las membranas figuran entre las herramientas con más potencia contra este problema, pero el resultado depende de que el profesional entienda sus fundamentos científicos y también lo que implican en lo técnico, lo económico y lo social.

1.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS

Una curiosidad científica terminó convirtiéndose, décadas después, en recurso valioso para problemas de alcance mundial: así puede resumirse el recorrido de las membranas. Hoy miles de plantas potabilizadoras, de instalaciones de reúso, de desaladoras, de industrias farmacéuticas y de procesos biotecnológicos las tienen como pieza central de la separación. Detrás hay más de doscientos años de investigación en física, química, ingeniería y ciencia de materiales.

Las membranas no avanzaron en línea recta. Primero hubo que entender cómo se transporta la materia; luego, fabricar materiales a la vez selectivos y resistentes, abaratar la producción y reducir el gasto de energía al separar. Cada avance fue superando una limitación que frenaba su uso industrial.

Mirando el pasado, se distinguen cinco etapas importantes en cómo se desarrolló esta tecnología:

1. **Descubrimiento de los fenómenos osmóticos (siglos XVIII y XIX).**
2. **Desarrollo científico de las membranas semipermeables (1900–1950).**
3. **Nacimiento de las membranas sintéticas modernas (1950–1980).**
4. **Expansión industrial y comercial (1980–2010).**
5. **Membranas inteligentes y transformación digital (2010–actualidad).**

En cada una de ellas cambió lo que se sabía de las membranas y también lo que se podía hacer con ellas.

1.3.1 LOS PRIMEROS ESTUDIOS SOBRE ÓSMOSIS

Los antecedentes de las tecnologías de membranas se remontan al siglo XVIII, cuando científicos europeos comenzaron a estudiar el movimiento espontáneo del agua a través de materiales naturales. En aquella época no existía aún una teoría molecular que explicara el fenómeno; sin embargo, las observaciones experimentales demostraban que determinadas membranas permitían el paso del agua mientras retenían otras sustancias.

Uno de los primeros investigadores en describir este comportamiento fue **Jean-Antoine Nollet**, quien observó que una vejiga animal llena de alcohol aumentaba de volumen al sumergirse en agua. Aunque la explicación científica del fenómeno tardaría varias décadas en desarrollarse, este experimento constituye uno de los primeros registros de lo que actualmente se conoce como **ósmosis**.

Durante el siglo XIX, nuevos investigadores ampliaron estos estudios mediante el desarrollo de membranas experimentales y la medición de presiones osmóticas. Entre ellos destacan **Wilhelm Pfeffer**, quien construyó membranas semipermeables utilizando precipitados inorgánicos, y **Jacobus Henricus van't Hoff**, quien estableció la relación entre la presión osmótica y la concentración de las soluciones, sentando las bases termodinámicas del fenómeno.

Aunque estos trabajos tenían inicialmente un carácter científico, permitieron comprender que las membranas podían utilizarse como barreras selectivas para separar sustancias con diferentes tamaños moleculares o diferentes potenciales químicos.

Ingeniería Química aplicada

Hasta este momento conviene aclarar un aspecto importante.

Cuando un ingeniero escucha la palabra **membrana**, suele pensar inmediatamente en un filtro. Sin embargo, desde el punto de vista científico, **una membrana no es simplemente un filtro**.

Una membrana es un material capaz de permitir el transporte selectivo de determinadas especies químicas mientras restringe parcial o totalmente el paso de otras.

Esta diferencia será fundamental durante todo el libro.

Un filtro convencional separa principalmente por tamaño.

Una membrana puede separar por:

- tamaño molecular;
- carga eléctrica;
- afinidad química;
- solubilidad;
- difusión;
- presión;
- gradientes de concentración;
- potencial químico.

Por ello, las membranas constituyen procesos de separación mucho más sofisticados que una filtración convencional.

Error frecuente

Muchos estudiantes consideran que una membrana funciona como una malla extremadamente fina.

Con esa visión no se logra explicar procesos como la pervaporación, la nanofiltración o la ósmosis inversa.

Ahí la separación depende de fenómenos moleculares y del comportamiento fisicoquímico del material, así que conviene ir sumando poco a poco nociones elementales de Ingeniería Química.

Esos conceptos se irán presentando de manera gradual en el libro, sin suponer que el lector ya domina fenómenos de transporte o termodinámica.

1.3.2 EL NACIMIENTO DE LA INGENIERÍA DE MEMBRANAS

Casi todo el siglo XX las membranas fueron sobre todo un instrumento de laboratorio. Los materiales de entonces no lograban flujos lo bastante altos como para justificar su uso industrial.

El cambio decisivo ocurrió en la década de 1960 gracias al trabajo de **Sidney Loeb** y **Srinivasa Sourirajan**, quienes desarrollaron las primeras membranas asimétricas de acetato de celulosa para ósmosis inversa. Estas membranas combinaban una capa superficial extremadamente delgada y selectiva con un soporte poroso que proporcionaba resistencia mecánica sin aumentar significativamente la resistencia al flujo del agua.

Aquel hallazgo cambió por completo el campo. Por primera vez se obtenía agua desalinizada con un gasto de energía compatible con el uso industrial. Desde entonces la ósmosis inversa se extendió con rapidez y fue desplazando a la desalinización térmica.

Figura 1.3

Evolución histórica de las tecnologías de membranas.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Porter (1990), Strathmann (2011), Scott (1995) y Wang et al. (2011).

La Figura 1.3 resume los principales hitos tecnológicos que condujeron desde los primeros estudios sobre ósmosis hasta las actuales membranas inteligentes basadas en nanotecnología e inteligencia artificial. Más que una simple cronología, esta evolución muestra cómo la investigación científica respondió progresivamente a necesidades concretas de la sociedad: abastecimiento de agua, tratamiento de efluentes, recuperación de recursos y eficiencia energética.

Tabla 1.3

Principales hitos en la evolución de las tecnologías de membranas

Período	Desarrollo científico y tecnológico	Relevancia para la Ingeniería del Agua
Siglo XVIII	Primeras observaciones de la ósmosis	Comprensión inicial del transporte selectivo de agua
Siglo XIX	Desarrollo de membranas experimentales y teoría de la presión osmótica	Bases científicas de los procesos de membranas
1950–1970	Membranas asimétricas de acetato de celulosa	Inicio de la desalinización mediante ósmosis inversa
1980–2000	Membranas compuestas de película delgada (TFC)	Mayor eficiencia, durabilidad y expansión industrial
2000–Actualidad	Nanomateriales, membranas cerámicas, biomiméticas e inteligencia artificial	Optimización del desempeño y nuevas aplicaciones en tratamiento del agua

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011), Porter (1990), Scott (1995) y Wang et al. (2011).

Reflexión para el ingeniero del agua

Las grandes innovaciones casi nunca surgen para dar respuesta inmediata a una dificultad concreta, y las membranas lo demuestran. Por cerca de dos siglos, el estudio de la ósmosis y del paso de sustancias por membranas fue puramente científico. Ese conocimiento solo pudo volverse tecnología cuando coincidieron los progresos en materiales, en ingeniería química y en fabricación industrial con una necesidad creciente de abastecimiento; así hoy se producen cada día millones de m^3 de agua potable.

Para el ingeniero del agua, esta evolución deja una enseñanza fundamental: **la innovación sostenible requiere integrar ciencia básica, desarrollo tecnológico y aplicación práctica**. Comprender esa interacción permitirá al lector interpretar el resto del libro no solo como un conjunto de tecnologías, sino como el resultado de un proceso continuo de investigación, diseño e innovación orientado a resolver uno de los mayores desafíos de la humanidad.

1.4 IMPORTANCIA DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS EN LA INGENIERÍA DEL AGUA

En las últimas cinco décadas, pocos cambios han sido tan grandes para la Ingeniería del Agua como la llegada de las membranas. Los procesos convencionales siguen siendo indispensables al tratar agua potable y aguas residuales, pero se exige cada vez más calidad, sostenibilidad, ahorro de energía y recuperación de recursos, y eso ha llevado a sumar membranas en casi todos los sectores que tienen que ver con el agua.

A diferencia de los procesos convencionales de separación, que generalmente dependen de fenómenos como la sedimentación gravitacional, la coagulación-floculación, la filtración granular o las reacciones químicas, las membranas realizan la separación mediante mecanismos selectivos que actúan directamente sobre las especies presentes en el agua. Esta característica permite obtener efluentes de elevada calidad con instalaciones relativamente compactas y altamente automatizadas.

Desde una perspectiva ingenieril, las membranas no deben entenderse únicamente como un equipo dentro de una planta de tratamiento. Constituyen una **operación unitaria de separación**, comparable con procesos ampliamente conocidos en Ingeniería Química, como la destilación, la absorción, la adsorción o la extracción líquido-líquido. La diferencia radica en que, en lugar de utilizar cambios de fase o equilibrios entre fases, las membranas emplean una barrera semipermeable que controla el transporte selectivo de determinadas especies químicas.

Este concepto es particularmente importante para estudiantes provenientes de áreas distintas a la Ingeniería Química. A lo largo de este libro se demostrará que los procesos de membranas obedecen a los mismos principios generales que gobiernan otras operaciones de separación: existencia de una fuerza impulsora, resistencia al transporte y un mecanismo selectivo. La comprensión de estos tres elementos permitirá interpretar el funcionamiento de cualquier proceso de membranas, independientemente de su aplicación específica.

1.4.1 LAS MEMBRANAS COMO OPERACIÓN UNITARIA

Uno de los objetivos principales de este libro es introducir al lector en el concepto de **operación unitaria**, ampliamente utilizado en Ingeniería Química y de gran utilidad para comprender los procesos de tratamiento del agua.

Una operación unitaria puede definirse como una etapa de un proceso industrial en la cual ocurre una transformación física o una separación basada en principios científicos bien establecidos. Independientemente del producto final o del sector industrial, muchas operaciones unitarias comparten fundamentos comunes y pueden analizarse mediante las mismas herramientas de ingeniería.

Por ejemplo, la filtración convencional, la centrifugación, la sedimentación y los procesos de membranas tienen como finalidad separar componentes presentes en una mezcla. Sin embargo, cada uno utiliza un mecanismo físico diferente para lograr dicha separación.

Las membranas constituyen una operación unitaria particularmente versátil debido a que pueden separar sólidos suspendidos, microorganismos, macromoléculas, compuestos orgánicos, sales disueltas e incluso determinados gases, dependiendo del tipo de membrana empleada y de la fuerza impulsora aplicada.

Ingeniería Química aplicada

A partir de este punto comenzaremos a utilizar un concepto fundamental en Ingeniería Química: la **fuerza impulsora** (*driving force*).

Toda operación de separación requiere la existencia de una diferencia de potencial que provoque el movimiento de materia desde una región hacia otra. En las tecnologías de membranas, esta fuerza impulsora puede adoptar diversas formas:

- diferencia de presión;
- diferencia de concentración;
- diferencia de potencial eléctrico;
- diferencia de temperatura;
- diferencia de presión osmótica.

Estas fuerzas impulsoras originan tecnologías distintas, que se verán en los capítulos que siguen.

No es necesario memorizar esta clasificación en este momento. Lo importante es comprender que **ningún proceso de membranas funciona sin una fuerza impulsora**.

Veremos reaparecer esta idea una y otra vez a lo largo del texto.

Recuadro de reflexión

¿Por qué una membrana necesita una fuerza impulsora?

Por sí sola, una membrana no separa nada: es solo una barrera selectiva. Para que la materia se transporte hay que aportar energía al sistema, ya sea con una diferencia de presión, de concentración, de potencial eléctrico o de temperatura.

Esta idea será fundamental para comprender posteriormente por qué la ósmosis inversa requiere bombas de alta presión mientras que la electrodiálisis utiliza corriente eléctrica.

1.4.2 VENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS

El avance en ciencia de materiales no basta para explicar el auge de las membranas. Se extendieron rápido en la industria porque, si se escogen y diseñan bien, tienen muchas ventajas sobre los procesos convencionales.

Entre las principales ventajas pueden destacarse:

- elevada calidad del agua producida;
- excelente capacidad de remoción de microorganismos;
- operación continua;
- diseño modular;
- facilidad de automatización;
- menor ocupación de superficie;
- posibilidad de ampliación por módulos;
- integración con otras operaciones unitarias;
- reducción del consumo de reactivos químicos en determinadas aplicaciones;
- facilidad de monitoreo mediante instrumentación moderna.

Estas características han permitido incorporar tecnologías de membranas tanto en pequeñas plantas descentralizadas como en algunas de las mayores instalaciones de desalinización existentes en el mundo.

Aun así, siempre hay que contrastar esos beneficios con los límites técnicos y económicos de la tecnología. Igual que otra operación unitaria cualquiera, las membranas tienen restricciones asociadas al consumo de energía, al ensuciamiento, a la incrustación, al manejo del concentrado que genera el proceso y a cuánto duran los materiales.

Tabla 1.4

Comparación entre procesos convencionales y tecnologías de membranas

Característica	Procesos convencionales	Tecnologías de membranas
Principio de separación	Sedimentación, filtración granular, coagulación y reacciones químicas	Transporte selectivo a través de una membrana
Calidad del agua	Variable según el proceso	Muy elevada cuando el sistema está correctamente diseñado
Automatización	Media	Alta
Espacio requerido	Generalmente elevado	Reducido debido al diseño modular
Flexibilidad operacional	Limitada	Alta, mediante incorporación de módulos
Remoción de sales disueltas	Muy limitada	Alta en nanofiltración y ósmosis inversa
Remoción de microorganismos	Depende del tratamiento	Muy elevada en UF, NF y RO
Escalabilidad	Moderada	Alta
Integración con otros procesos	Variable	Excelente

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011) y AWWA (2017).

1.5 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS

Las tecnologías de membranas han experimentado un crecimiento extraordinario durante las últimas cuatro décadas. Inicialmente fueron desarrolladas para aplicaciones muy específicas de laboratorio y procesos farmacéuticos; sin embargo, los avances en ciencia de materiales, fabricación de membranas y diseño de módulos permitieron ampliar progresivamente su campo de aplicación hasta convertirlas en una de las tecnologías de separación más importantes utilizadas actualmente en la industria.

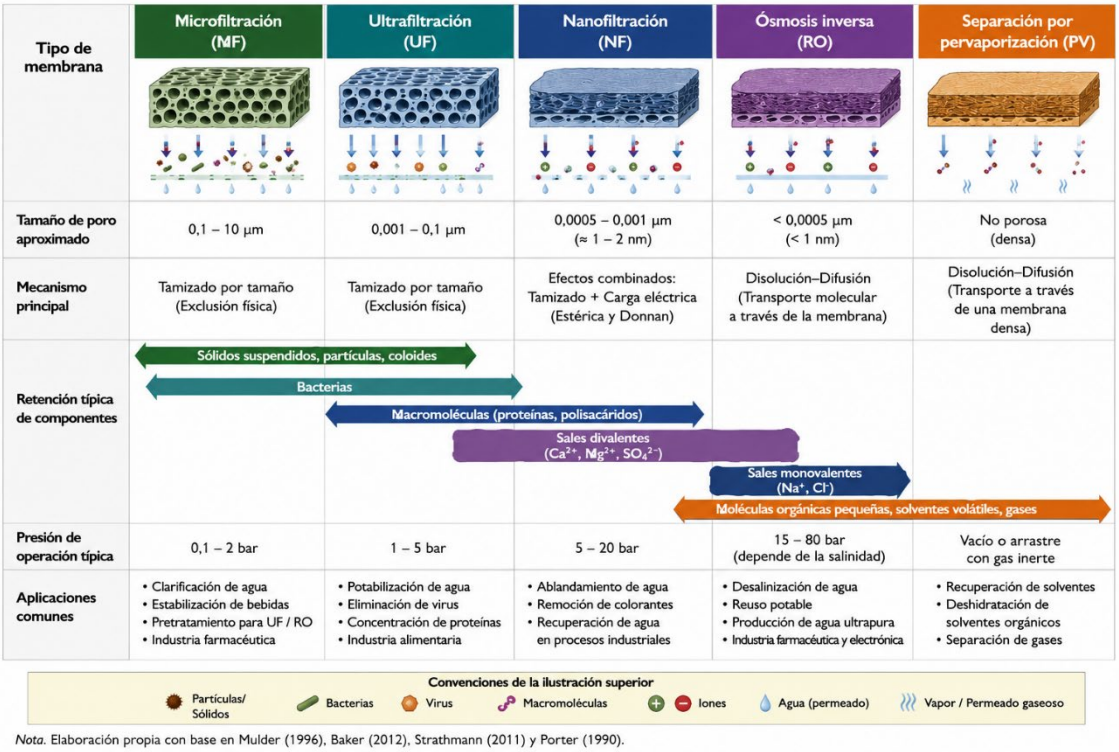
Hoy los especialistas en Ingeniería del Agua consideran indispensables a las membranas: con ellas se obtiene agua potable, se reutilizan aguas residuales, se desala el mar, se recuperan productos de alto valor agregado y se optimizan muchos procesos industriales.

A diferencia de otras tecnologías de tratamiento, las membranas poseen una característica que explica gran parte de su éxito industrial: **su extraordinaria versatilidad**. Mediante la selección adecuada del tipo de membrana y de las condiciones de operación es posible separar partículas suspendidas, bacterias, virus, macromoléculas, materia orgánica, sales disueltas e incluso determinados gases.

Esa capacidad las ha llevado a casi todas las fases del ciclo integral del agua.

Figura 1.4

Principales aplicaciones industriales de las tecnologías de membranas.]



Nota. Elaboración propia con base en Mulder (1996), Baker (2012), Strathmann (2011) y Porter (1990).

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Wang et al. (2011), Scott (1995), Schäfer (2005) y AWWA (2017).

La Figura 1.4 muestra las principales áreas donde actualmente se utilizan las tecnologías de membranas. Aunque cada sector presenta requerimientos particulares, todos comparten un objetivo común: obtener una separación altamente eficiente mediante un proceso compacto, automatizable y de elevada confiabilidad.

1.5.1 PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE

Entre los campos donde más crecieron las membranas está la producción de agua potable. Antes, las potabilizadoras funcionaban con coagulación, floculación y sedimentación, seguidas de filtración rápida y desinfección. Se siguen usando mucho, pero hoy los requisitos sanitarios son más estrictos y aparecen contaminantes emergentes, de modo que se agregan las membranas como una etapa adicional del tratamiento, y a veces como la tecnología principal.

Con microfiltración y ultrafiltración se remueven con eficiencia los sólidos suspendidos, las bacterias, los protozoarios y buena parte de los virus, y se obtiene un

agua de muy buena calidad microbiológica. Si además hay que retirar sales o compuestos orgánicos disueltos, se pasa a la nanofiltración o a la ósmosis inversa.

Hoy abundan las plantas potabilizadoras que emplean membranas como barrera física principal; así consumen bastante menos productos químicos y logran una calidad de agua más estable.

Aplicación industrial

Las ciudades con fuentes superficiales sujetas a variaciones estacionales de turbidez suelen incorporar ultrafiltración como barrera principal antes de la desinfección final. Esta configuración permite mantener una calidad constante del agua tratada incluso durante eventos de lluvias intensas.

1.5.2 DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR

La desalinización es probablemente el uso más conocido de las membranas. Como la población de las zonas costeras con pocos recursos hídricos ha ido en aumento, se construyeron grandes desaladoras que producen cada día cientos de miles de m^3 de agua potable.

Por varias décadas, los procesos térmicos monopolizaron la desalinización: destilación multietapa (MSF) y destilación de múltiple efecto (MED). Después, gracias a las membranas compuestas de película delgada, la ósmosis inversa logró eficiencias bastante mayores y gastó mucha menos energía.

Actualmente, más de la mitad de la capacidad mundial de desalinización utiliza ósmosis inversa como tecnología principal. Esta tendencia continúa fortaleciéndose gracias a mejoras en materiales, recuperación de energía y sistemas avanzados de control.

Ingeniería Química aplicada

¿Por qué la ósmosis inversa sustituyó progresivamente a muchos procesos térmicos?

La respuesta se encuentra en el **consumo energético**.

Los procesos térmicos requieren evaporar grandes cantidades de agua, lo que implica suministrar calor suficiente para provocar un cambio de fase. La ósmosis inversa, en cambio, utiliza principalmente energía mecánica para generar presión, evitando la evaporación del agua.

Desde la termodinámica, esa diferencia explica buena parte de lo que se ha reducido el consumo de energía en las últimas décadas.

Se verá con más detalle en el capítulo sobre ósmosis inversa.

1.5.3 REÚSO DE AGUAS RESIDUALES

Frente a la escasez creciente de agua, el reúso es una de las estrategias principales. Ya hay muchas ciudades e industrias donde las aguas residuales tratadas sirven como fuente alternativa para regar, para procesos industriales, para recargar acuíferos e incluso para producir agua potable de manera indirecta.

En ese proceso las membranas son una pieza esencial, pues forman una barrera muy eficiente que retiene microorganismos, sólidos en suspensión, compuestos orgánicos y sales.

Una de las configuraciones más exitosas corresponde al **biorreactor de membranas (MBR)**, tecnología que integra el tratamiento biológico con membranas de ultrafiltración o microfiltración, permitiendo producir un efluente de excelente calidad dentro de un sistema compacto y altamente automatizado.

Reflexión para el ingeniero del agua

Durante muchos años las aguas residuales fueron consideradas exclusivamente como un residuo que debía eliminarse. En la actualidad, el concepto ha cambiado profundamente.

Las aguas residuales constituyen una **fuente alternativa de agua, energía, nutrientes y materiales recuperables**.

Esta visión forma parte del paradigma de la **economía circular**, donde las tecnologías de membranas desempeñan un papel esencial para recuperar recursos y reducir la presión sobre las fuentes convencionales de abastecimiento.

Tabla 1.5

Principales aplicaciones de las tecnologías de membranas en Ingeniería del Agua

Aplicación	Tecnología predominante	Objetivo principal
Producción de agua potable	MF, UF	Eliminación de sólidos y microorganismos
Reúso de aguas residuales	UF, MBR, NF, RO	Producción de agua reutilizable

Aplicación	Tecnología predominante	Objetivo principal
Desalinización	RO	Eliminación de sales disueltas
Agua ultrapura	RO + EDI	Producción de agua para industria electrónica y farmacéutica
Industria alimentaria	UF, NF	Concentración y separación de compuestos
Minería	NF, RO	Recuperación de agua y reducción de efluentes
Generación de hidrógeno	RO + EDI	Producción de agua de alta pureza para electrólisis

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Wang et al. (2011), Strathmann (2011) y AWWA (2017).

1.5.4 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA Y DE BEBIDAS

Hoy se las asocia con el tratamiento del agua, pero las membranas se establecieron antes en otros sectores, como el alimentario y el farmacéutico. Allí se buscaban separaciones que no alteraran productos delicados frente al calor, evitando que se degradaran vitaminas, enzimas, proteínas y demás compuestos de gran valor.

La evaporación y la destilación obligan a calentar; con las membranas, en cambio, la separación se hace a temperatura ambiente o moderada, y los productos se deterioran mucho menos.

Un caso es la industria láctea. Con ultrafiltración se concentran las proteínas del suero, se estandariza cómo está compuesta la leche y se obtienen ingredientes funcionales para alimentos de gran valor nutritivo. Por su parte, la ósmosis inversa y la nanofiltración concentran las soluciones antes del secado, y la planta gasta menos energía.

En la producción de jugos de frutas, las membranas sustituyen progresivamente procesos tradicionales de clarificación, permitiendo obtener productos con mayor estabilidad, mejor apariencia y menor pérdida de compuestos aromáticos.

La industria cervecera y vinícola utiliza microfiltración para eliminar microorganismos y partículas en suspensión antes del envasado, prolongando la vida útil del producto sin necesidad de tratamientos térmicos intensivos.

Estas aplicaciones muestran que la membrana va más allá del tratamiento del agua: es una operación unitaria de uso extendido en la industria, cuando lo que más importa es la calidad del producto.

Caso industrial

Si una planta de leche concentra las proteínas con ultrafiltración previamente al secado por atomización, puede reducir de forma apreciable el consumo de energía. Al quedar menos agua por evaporar después, también bajan los costos de producción.

Este ejemplo muestra cómo una operación unitaria puede modificar favorablemente todo el balance energético de un proceso industrial.

1.5.5 INDUSTRIA FARMACÉUTICA Y BIOTECNOLÓGICA

La industria farmacéutica requiere agua de muy alta pureza para la fabricación de medicamentos, vacunas, soluciones inyectables y productos biotecnológicos. Asimismo, numerosos procesos de producción involucran la separación, concentración y purificación de proteínas, enzimas, anticuerpos monoclonales y otras biomoléculas de elevado valor.

Su alta selectividad y la posibilidad de operar con temperaturas y presiones relativamente suaves hacen que las membranas sean esenciales en estas operaciones.

En este sector son ampliamente utilizadas:

- microfiltración para esterilización de soluciones;
- ultrafiltración para concentración de proteínas;
- nanofiltración para eliminación de contaminantes específicos;
- ósmosis inversa para producción de agua purificada;
- electrodesionización para obtención de agua ultrapura.

Hoy, uno de los esquemas más usados para producir agua farmacéutica que cumpla los requisitos de las principales farmacopeas internacionales es combinar ósmosis inversa con electrodesionización.

Ingeniería Química aplicada

¿Por qué la industria farmacéutica utiliza varias tecnologías de membranas en serie?

Porque ninguna operación unitaria puede realizar todas las separaciones necesarias.

Cada membrana elimina un grupo específico de contaminantes.

Diseñar el proceso consiste, justamente, en elegir y combinar las operaciones unitarias que más convengan para lograr la calidad exigida al menor costo posible.

Este concepto será recurrente durante todo el libro.

1.5.6 INDUSTRIA MINERA

Pocas industrias consumen tanta agua en el mundo como la minería. Se usan grandes volúmenes para concentrar, lixiviar, flotar y transportar minerales, y además salen efluentes cargados de sales, sólidos, metales y otros contaminantes.

Con membranas se puede recuperar buena parte del agua empleada, de modo que baja tanto la captación de agua fresca como el volumen de efluentes que se descarga al ambiente.

En operaciones mineras modernas es frecuente encontrar sistemas de:

- ultrafiltración para remover sólidos finos;
- nanofiltración para reducir dureza;
- ósmosis inversa para reutilización del agua de proceso;
- destilación por membranas para tratamiento de salmueras concentradas.

Chile y Perú tienen mucha minería, y en ellos estas tecnologías cobran cada vez más importancia, porque el agua escasea en buena parte de las zonas donde se trabaja.

Aplicación al contexto peruano

Los principales yacimientos mineros del Perú están en regiones altoandinas, donde contar con agua es un factor estratégico para sacar adelante los proyectos.

Al recuperar y reutilizar el agua con membranas se extrae menos de las fuentes naturales y las operaciones mineras mejoran su comportamiento ambiental.

Por ello las membranas son una herramienta clave para una minería sostenible.

1.5.7 INDUSTRIA DE SEMICONDUCTORES Y MICROELECTRÓNICA

Pocas industrias requieren agua de calidad tan elevada como la fabricación de semiconductores.

En la fabricación de circuitos integrados basta una partícula microscópica para malograr un dispositivo electrónico.

Por esta razón se emplean sistemas de producción de **agua ultrapura (Ultra Pure Water, UPW)**, donde la combinación de membranas, intercambio iónico, electrodesionización y desinfección ultravioleta permite obtener concentraciones extremadamente bajas de sales, partículas y materia orgánica.

Aunque esta aplicación parece alejada de la Ingeniería del Agua, representa uno de los mejores ejemplos de cómo el diseño adecuado de procesos de membranas permite alcanzar niveles de pureza imposibles mediante tratamientos convencionales.

Tabla 1.6

Aplicaciones industriales de las tecnologías de membranas

Sector industrial	Tecnología predominante	Objetivo principal
Agua potable	MF, UF	Eliminación de sólidos y microorganismos
Desalinización	RO	Producción de agua potable a partir de agua de mar
Reúso	MBR, UF, NF, RO	Recuperación de agua
Industria alimentaria	UF, NF	Concentración y purificación
Industria farmacéutica	RO, EDI, UF	Agua farmacéutica y purificación de biomoléculas
Minería	UF, NF, RO	Recuperación y reutilización del agua
Microelectrónica	RO, EDI	Producción de agua ultrapura
Producción de hidrógeno verde	RO + EDI	Agua de alta pureza para electrólisis

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Wang et al. (2011), Strathmann (2011), AWWA (2017) y APHA et al. (2023).

Recuadro de reflexión

¿Existe alguna industria moderna que no utilice tecnologías de membranas?

La respuesta, en la práctica, es **cada vez menos**.

Las membranas han dejado de ser una tecnología exclusiva del tratamiento del agua para convertirse en una plataforma de separación utilizada en industrias tan diversas como la alimentaria, farmacéutica, biotecnológica, energética, minera, electrónica y química.

Este crecimiento responde a una tendencia común: la necesidad de procesos más eficientes, selectivos, automatizables y compatibles con los principios de la sostenibilidad y la economía circular.

1.6 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS

La diversidad de aplicaciones descritas en la sección anterior pone de manifiesto una característica fundamental de las tecnologías de membranas: **no existe una única membrana capaz de resolver todos los problemas de separación**. Por el contrario, se

ha desarrollado una amplia gama de materiales, configuraciones y procesos, cada uno diseñado para responder a necesidades específicas de la industria y del tratamiento del agua.

Esta diversidad puede resultar inicialmente confusa para el estudiante que se aproxima por primera vez al tema. Es frecuente encontrar términos como **microfiltración**, **ultrafiltración**, **nanofiltración**, **ósmosis inversa**, **electrodiálisis**, **destilación por membranas**, **ósmosis directa** o **biorreactores de membranas**, sin comprender claramente las diferencias entre ellos.

No se pretende aquí estudiar a fondo cada tecnología, sino dar una visión general que sirva como mapa de ideas para el resto de los capítulos.

1.6.1 ¿QUÉ ES UNA MEMBRANA?

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Membranas, una membrana puede definirse como una **barrera selectiva** capaz de controlar el transporte de una o varias especies químicas entre dos medios, permitiendo el paso preferencial de determinados componentes y restringiendo el transporte de otros.

Esta definición merece analizarse cuidadosamente.

En primer lugar, una membrana **no es simplemente un filtro**. Aunque algunas membranas retienen partículas por mecanismos semejantes a la filtración convencional, muchas otras realizan la separación mediante fenómenos de difusión, solubilidad, exclusión electrostática o diferencias de potencial químico.

En segundo lugar, una membrana no constituye un proceso por sí misma. Es únicamente el elemento activo dentro de una operación unitaria. Para que ocurra la separación es indispensable la existencia de una **fuerza impulsora**, aspecto que será desarrollado en el siguiente capítulo.

Finalmente, una membrana debe entenderse como un **material funcional**, cuyas propiedades físicas y químicas determinan directamente la eficiencia del proceso de separación.

Ingeniería Química aplicada

En Ingeniería Química, una operación unitaria se caracteriza por tres elementos fundamentales:

- una fuerza impulsora;

- una resistencia al transporte;
- un mecanismo de transferencia de materia.

Las tecnologías de membranas cumplen exactamente con esta definición.

Por ello, desde el punto de vista ingenieril, una membrana constituye una **operación unitaria de separación** y no simplemente un equipo o un accesorio de una planta de tratamiento.

Esta idea acompañará al lector durante todo el libro.

1.6.2 CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN

Las tecnologías de membranas pueden clasificarse utilizando diferentes criterios. Cada uno responde a una necesidad distinta dentro del diseño de procesos y del análisis ingenieril.

Los criterios más utilizados son:

- naturaleza del material de la membrana;
- geometría del módulo;
- fuerza impulsora;
- tamaño de las especies retenidas;
- mecanismo predominante de separación;
- aplicación industrial.

Cada una de estas clasificaciones resulta útil en un contexto específico. Sin embargo, para la Ingeniería del Agua, las dos más importantes corresponden a la **clasificación según el tamaño de las especies retenidas** y la **clasificación según la fuerza impulsora del proceso**.

Tabla 1.7

Principales criterios de clasificación de las tecnologías de membranas

Criterio de clasificación	Ejemplos
Material	Poliméricas, cerámicas, metálicas, compuestas
Geometría del módulo	Fibra hueca, espiral enrollada, tubular, placas y marcos
Fuerza impulsora	Presión, potencial eléctrico, concentración, temperatura
Tamaño de separación	MF, UF, NF, RO
Aplicación	Agua potable, reúso, alimentos, minería, farmacéutica

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011) y Crittenden et al. (2012).

1.6.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TAMAÑO DE SEPARACIÓN

Para tratar agua, lo más corriente es agrupar las membranas según el tamaño aproximado de lo que logran retener, sean partículas o moléculas.

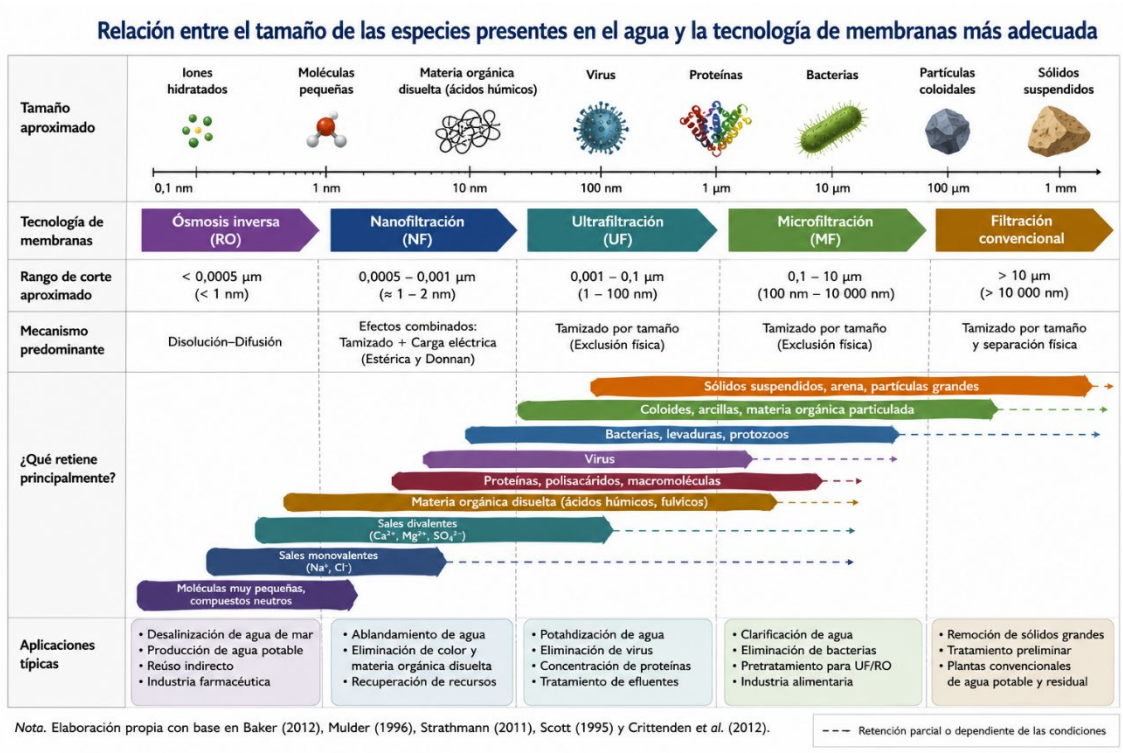
Esta clasificación comprende cuatro grandes familias:

- **Microfiltración (MF)**.
- **Ultrafiltración (UF)**.
- **Nanofiltración (NF)**.
- **Ósmosis Inversa (RO)**.

Debe aclararse que esta clasificación constituye una simplificación útil desde el punto de vista didáctico. En la práctica, los mecanismos de separación son considerablemente más complejos y no dependen exclusivamente del tamaño de las partículas.

Figura 1.5

Clasificación general de las membranas, según su tamaño de separación.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Scott (1995), Strathmann (2011) y Wang et al. (2011).

Pocas ilustraciones del libro son tan importantes como la Figura 1.5: resume cómo se relaciona el tamaño de los contaminantes del agua con la tecnología de membranas ideal para removerlos. Se retomará cuando se estudie la ósmosis inversa, la nanofiltración, la ultrafiltración y la microfiltración.

Tabla 1.8

Clasificación de las membranas, de acuerdo con su tamaño de separación

Tecnología	Tamaño aproximado de poro	Principales contaminantes retenidos
Microfiltración (MF)	0,1–10 µm	Sólidos suspendidos, algas, bacterias
Ultrafiltración (UF)	0,01–0,1 µm	Virus, coloides, macromoléculas
Nanofiltración (NF)	≈ 1 nm	Materia orgánica, dureza, algunos iones divalentes
Ósmosis inversa (RO)	Membrana densa (sin poros definidos)	Sales disueltas, compuestos orgánicos de bajo peso molecular, microorganismos

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011), Porter (1990) y Crittenden et al. (2012).

Error frecuente

Es común afirmar que la ósmosis inversa posee "poros más pequeños" que la nanofiltración.

Desde una perspectiva científica, esta afirmación no es completamente correcta.

Las membranas modernas de ósmosis inversa son **membranas densas**, donde el transporte ocurre principalmente mediante el mecanismo de **solución-difusión** y no por el paso de las moléculas a través de poros cilíndricos claramente definidos.

Comprender esta diferencia será esencial cuando se estudie el mecanismo de transporte en el Capítulo 2.

Reflexión para el ingeniero del agua

Una clasificación constituye mucho más que una forma de organizar conceptos. Para el ingeniero, representa una herramienta de decisión. La selección de una tecnología de membranas no comienza eligiendo una marca comercial o un fabricante; comienza identificando **qué contaminantes deben removerse, cuál es la calidad del agua de alimentación, cuál es la calidad requerida del permeado y qué restricciones energéticas, económicas y ambientales condicionan el proyecto**.

Por eso la clasificación de esta sección es solo un primer paso en el camino hacia el diseño de procesos, que se irá desarrollando más adelante.

1.7 FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS DEL TRANSPORTE A TRAVÉS DE MEMBRANAS

Hasta este punto del capítulo se ha presentado una visión general de las tecnologías de membranas y de su importancia para la Ingeniería del Agua. Sin embargo, aún no se ha respondido una pregunta fundamental: **¿qué hace posible que una membrana realice una separación?**

La respuesta requiere introducir uno de los conceptos más importantes de la Ingeniería Química: **el transporte de materia**.

Aunque este tema suele estudiarse en cursos especializados de Fenómenos de Transporte, en este libro se abordará desde una perspectiva aplicada, evitando desarrollos matemáticos innecesarios y priorizando la comprensión física del fenómeno. El objetivo no es formar especialistas en transporte de materia, sino proporcionar al lector las herramientas conceptuales necesarias para comprender el funcionamiento de las tecnologías de membranas.

Desde un punto de vista general, toda separación mediante membranas implica el movimiento de una o varias especies químicas desde una región hacia otra a través de una barrera semipermeable. Este movimiento no ocurre de manera espontánea; requiere la existencia de una **fuerza impulsora** que suministre la energía necesaria para vencer las resistencias al transporte.

Para entenderlo fácil, piense en la membrana como en una puerta inteligente: no a todas las moléculas les cuesta lo mismo cruzarla. Algunas pasan rápido, otras con lentitud y otras quedan rechazadas del todo. La rapidez con que una especie la atraviesa está determinada por sus propiedades fisicoquímicas, por cómo sea el material de la membrana y por las condiciones en que opera el sistema.

Entender este comportamiento es la base para diseñar y optimizar cualquier proceso de membranas.

1.7.1 EL CONCEPTO DE TRANSPORTE DE MATERIA

En la naturaleza, la materia tiende a desplazarse desde regiones donde posee un mayor potencial hacia regiones donde dicho potencial es menor. Este principio explica

fenómenos cotidianos como la difusión del aroma de un perfume en una habitación, la disolución de azúcar en una taza de café o el movimiento del oxígeno desde los pulmones hacia la sangre.

En Ingeniería Química este comportamiento se interpreta mediante el concepto de **gradiente**, es decir, una diferencia de una propiedad entre dos puntos del sistema.

Si existe un gradiente, surge una fuerza impulsora que puede provocar transporte de materia.

Dependiendo del tipo de gradiente, el transporte puede originarse por:

- diferencias de concentración;
- diferencias de presión;
- diferencias de temperatura;
- diferencias de potencial eléctrico;
- diferencias de potencial químico.

Estos gradientes constituyen el fundamento físico de prácticamente todas las operaciones unitarias de separación.

En las tecnologías de membranas ocurre exactamente el mismo principio.

La membrana únicamente controla el paso de las especies.

La energía necesaria para que exista transporte proviene siempre del gradiente aplicado.

Ingeniería Química aplicada

Un error frecuente consiste en pensar que la membrana "empuja" el agua.

En realidad, ocurre lo contrario.

La membrana no impulsa ningún flujo.

La membrana simplemente **ofrece una resistencia selectiva al transporte**.

El agua se mueve porque hay una diferencia de energía entre los dos lados de la membrana.

Esta diferencia de energía constituye la fuerza impulsora del proceso.

1.7.2 FUERZAS IMPULSORAS EN LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS

Lo que distingue a una tecnología de membranas de otra es, sobre todo, la fuerza impulsora con que se produce el transporte de materia.

Desde esta perspectiva pueden distinguirse cinco grandes grupos de procesos.

Tabla 1.9

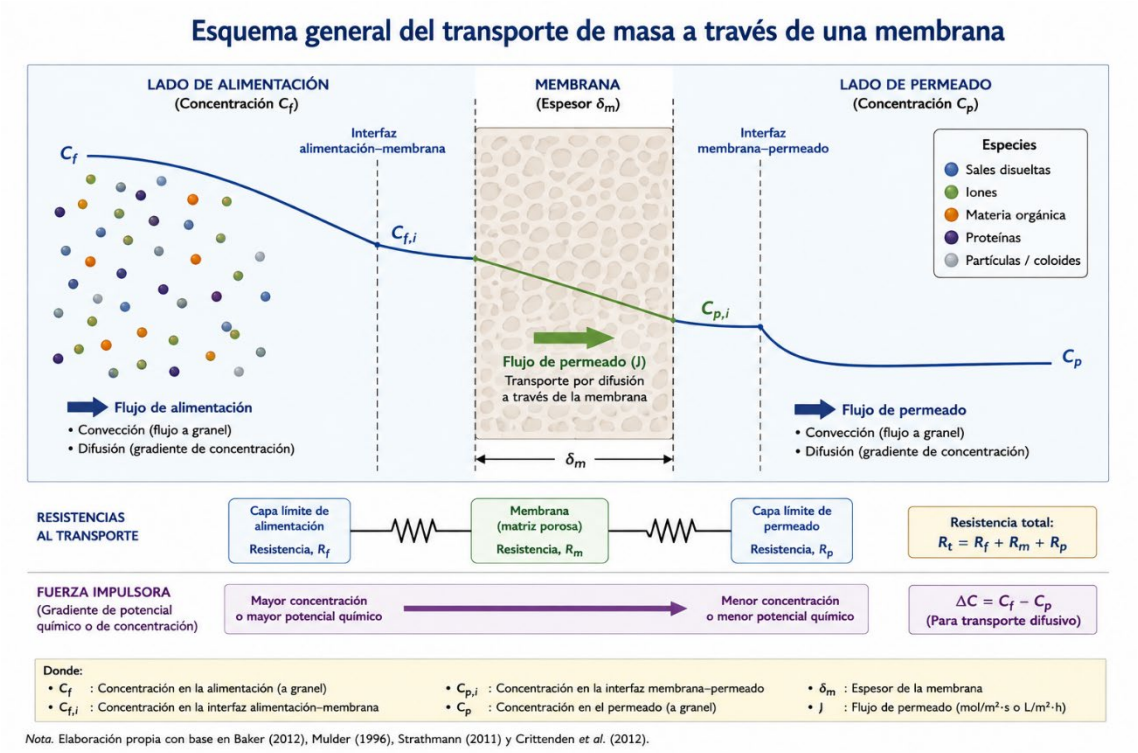
Fuerzas impulsoras utilizadas en las tecnologías de membranas

Fuerza impulsora	Tecnologías representativas	Aplicaciones principales
Diferencia de presión	MF, UF, NF, RO	Tratamiento de agua, desalinización, industria alimentaria
Diferencia de concentración	Ósmosis directa (FO)	Concentración de soluciones y recuperación de agua
Diferencia de potencial eléctrico	Electrodiálisis (ED) y electrodesionización (EDI)	Desmineralización y producción de agua ultrapura
Diferencia de temperatura	Destilación por membranas (MD)	Desalinización de salmueras y aprovechamiento de calor residual
Diferencia de presión parcial	Pervaporación y separación de gases	Procesos químicos y petroquímicos

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011), Porter (1990) y Scott (1995).

Figura 1.6

Principales fuerzas impulsoras utilizadas en las tecnologías de membranas.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011) y Crittenden *et al.* (2012).

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011) y Crittenden et al. (2012).

La Figura 1.6 resume uno de los conceptos fundamentales que acompañará al lector durante toda la obra: **cada tecnología de membranas utiliza una fuerza impulsora específica para generar el transporte selectivo de materia**. Esta clasificación no solo facilita la comprensión de las distintas tecnologías, sino que también constituye la base para el diseño y análisis energético de los procesos.

1.7.3 RESISTENCIA AL TRANSPORTE

La existencia de una fuerza impulsora no garantiza por sí sola que el transporte ocurra con la velocidad deseada. Toda operación unitaria presenta **resistencias** que limitan el flujo de materia.

En los procesos de membranas, estas resistencias pueden originarse en:

- la capa límite formada junto a la superficie de la membrana;
- la propia estructura del material de la membrana;
- los depósitos de sólidos o materia orgánica acumulados sobre la superficie (fouling);
- las incrustaciones minerales (scaling);
- las condiciones hidrodinámicas del sistema.

Este concepto importa mucho porque explica que dos membranas idénticas puedan comportarse de forma muy distinta según las condiciones de operación.

Cómo minimizar estas resistencias, para subir el flujo de permeado y alargar la vida útil de cada membrana, se analizará con detalle en los capítulos sobre fouling y diseño hidráulico.

Reflexión para el ingeniero del agua

Cuando baja el flujo de permeado, lo primero que se suele hacer es aumentar la presión con que trabaja el sistema. Pero esa medida no siempre soluciona el problema y a veces hasta lo acelera.

Desde una perspectiva ingenieril, el objetivo no consiste en aplicar la mayor fuerza impulsora posible, sino en **identificar cuál es la resistencia que limita el transporte y actuar directamente sobre ella**. Este principio constituye uno de los

fundamentos del diseño y la optimización de procesos de membranas y será desarrollado con mayor profundidad en los capítulos dedicados al fouling, la hidrodinámica y el diseño de sistemas.

1.8 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LA SEPARACIÓN MEDIANTE MEMBRANAS

Las operaciones de separación son un pilar de la Ingeniería Química, y también de la del Agua. Sirven para purificar, aislar o concentrar uno o más componentes de una mezcla, aprovechando que sus propiedades físicas o químicas son distintas. Hasta hace poco, esto se resolvía con sedimentación, filtración, destilación, absorción, adsorción, intercambio iónico o extracción líquido-líquido.

Las tecnologías de membranas forman parte de este conjunto de operaciones unitarias, pero presentan una característica que las diferencian de la mayoría de los procesos convencionales: **la separación ocurre simultáneamente con el transporte de materia a través de una barrera selectiva**.

Dicho de otro modo, la membrana no se limita a ser un medio físico que bloquea el paso de ciertas partículas; es un material pensado para regular de forma selectiva cómo se mueven moléculas e iones, según su comportamiento fisicoquímico y cómo opere el sistema.

Esta característica explica por qué las membranas han logrado sustituir numerosos procesos tradicionales en aplicaciones donde se requiere elevada calidad del agua, operación continua y automatización.

1.8.1 EL CONCEPTO DE SELECTIVIDAD

Uno de los parámetros más importantes en cualquier proceso de membranas es la **selectividad**.

En general, la selectividad indica qué tan bien una membrana distingue entre dos especies químicas mientras ocurre el transporte.

La membrana ideal dejaría pasar el agua sin restricción y bloquearía por completo todos los contaminantes.

Sin embargo, ninguna membrana real presenta este comportamiento perfecto.

En la práctica, todas las membranas muestran un compromiso entre dos propiedades fundamentales:

- permeabilidad;
- selectividad.

Este compromiso es uno de los grandes retos al desarrollar nuevos materiales.

Ingeniería Química aplicada

Existe un principio ampliamente conocido en Ingeniería de Membranas:

A mayor permeabilidad suele corresponder una menor selectividad.

Y viceversa.

Una membrana extremadamente permeable produce grandes caudales de agua, pero puede presentar menor capacidad de rechazo.

Una membrana muy selectiva elimina una mayor cantidad de contaminantes, aunque generalmente trabaja con menores flujos de permeado.

Gran parte de la investigación actual busca romper este compromiso mediante el desarrollo de nuevos materiales.

1.8.2 FLUJO DE PERMEADO

Otro concepto fundamental que acompañará al lector durante todo el libro corresponde al **flujo de permeado**.

Dicho simple, el flujo es la cantidad de agua que pasa por cada unidad de superficie de membrana en un lapso dado.

Aunque este concepto será formalizado matemáticamente en el siguiente capítulo, resulta conveniente introducir aquí su significado físico.

Si dos sistemas poseen la misma membrana, pero producen diferentes cantidades de agua, el ingeniero debe preguntarse inmediatamente:

- ¿La presión es diferente?
- ¿La temperatura cambió?
- ¿Existe fouling?
- ¿Cambió la calidad del agua de alimentación?

Todas estas variables modifican el flujo de permeado.

Por eso, para medir el desempeño operacional de un sistema de membranas, el flujo es uno de los indicadores principales.

Error frecuente

Muchos operadores consideran que un mayor flujo siempre significa un mejor funcionamiento.

Esta afirmación puede conducir a errores importantes.

Si el flujo se eleva demasiado, el fouling se forma más rápido, el consumo de energía aumenta y la membrana dura menos.

El objetivo del ingeniero no consiste en maximizar el flujo, sino en determinar el **flujo óptimo de operación**, equilibrando productividad, consumo energético y estabilidad operacional.

1.8.3 RECHAZO DE SOLUTOS

El segundo parámetro fundamental es el **rechazo**.

Mientras el flujo indica cuánta agua atraviesa la membrana, el rechazo expresa qué tan eficiente resulta la separación de los contaminantes.

Conceptualmente, el rechazo se interpreta como el porcentaje de un soluto determinado que la membrana mantiene retenido.

Este parámetro depende de numerosos factores:

- tamaño molecular;
- carga eléctrica;
- estructura química;
- presión;
- temperatura;
- concentración;
- características de la membrana.

Conocer esos factores ayudará después a entender por qué una membrana dada puede mostrar porcentajes de rechazo distintos si cambian las condiciones de operación.

Tabla 1.10

Parámetros fundamentales utilizados para evaluar una membrana

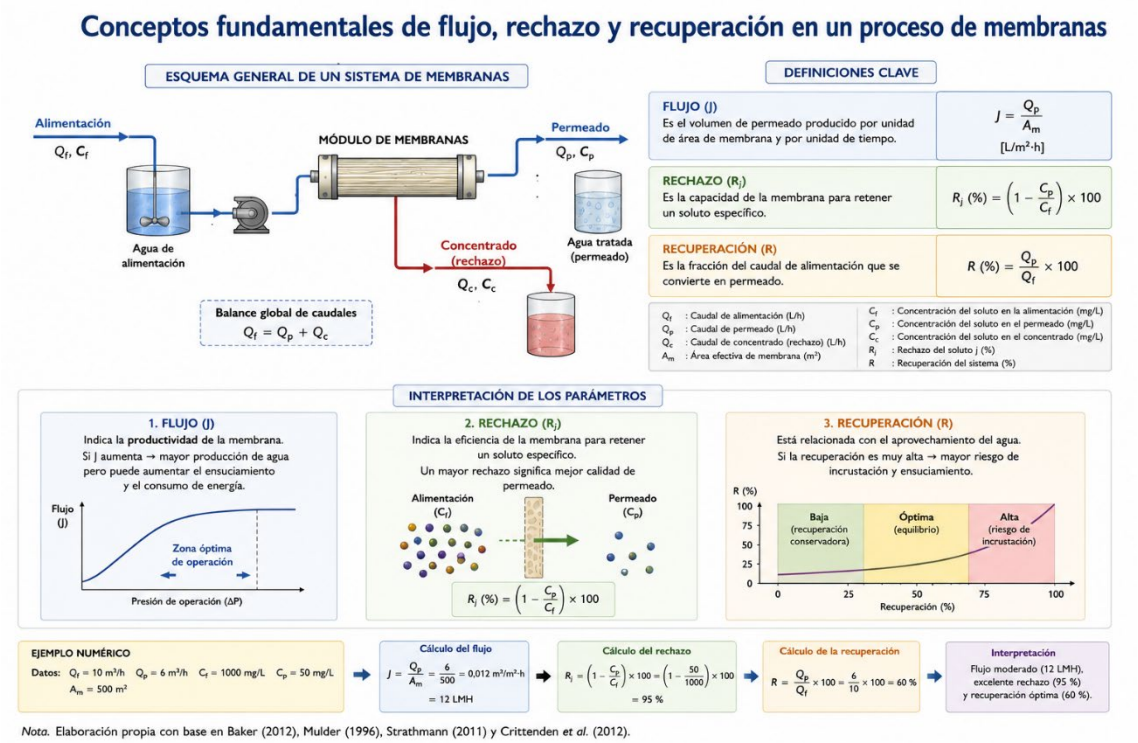
Parámetro	Significado físico	Importancia ingenieril
Flujo de permeado	Cantidad de agua producida por unidad de área	Determina la productividad del sistema

Parámetro	Significado físico	Importancia ingenieril
Rechazo	Capacidad para retener contaminantes	Define la calidad del agua producida
Recuperación	Fracción del agua alimentada que se convierte en permeado	Determina la eficiencia del aprovechamiento del recurso
Presión de operación	Energía suministrada al sistema	Influye sobre el consumo energético
Ensuciamiento (Fouling)	Acumulación de materiales sobre la membrana	Reduce el flujo y aumenta los costos de operación

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011), Crittenden et al. (2012) y AWWA (2017).

Figura 1.7

Conceptos fundamentales de flujo, rechazo y recuperación en un proceso de membranas.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011) y Porter (1990).

La Figura 1.7 sintetiza tres conceptos que aparecerán de manera recurrente a lo largo de todo el libro: **flujo de permeado, rechazo y recuperación**. Estos parámetros constituyen los indicadores básicos del desempeño de cualquier sistema de membranas y serán utilizados posteriormente para el diseño, la evaluación técnica y la optimización operacional.

1.8.4 INGENIERÍA DE MEMBRANAS COMO DISCIPLINA INTEGRADORA

Esta obra quiere mostrar, ante todo, que la Ingeniería de Membranas es una disciplina abierta, que reúne saberes de varias ramas de la ingeniería y de las ciencias aplicadas.

El diseño de un sistema de membranas requiere comprender simultáneamente:

- fenómenos de transporte;
- termodinámica;
- química del agua;
- ciencia de materiales;
- hidráulica;
- microbiología;
- automatización;
- análisis económico;
- sostenibilidad ambiental.

Por esa naturaleza multidisciplinaria, hoy se emplean membranas en sectores tan variados como la minería, la biotecnología, la industria alimentaria, la farmacéutica, la producción de hidrógeno verde y la de agua potable.

Más que una tecnología específica, las membranas representan una plataforma de separación sobre la cual continúan desarrollándose nuevas aplicaciones impulsadas por la innovación en materiales, digitalización y control avanzado de procesos.

Reflexión para el ingeniero del agua

Un ingeniero que domina únicamente el funcionamiento de una membrana puede operar una instalación existente. En cambio, un ingeniero que comprende los principios científicos que gobiernan el transporte, la selectividad y la interacción entre el agua y los materiales será capaz de **diseñar, optimizar e innovar**. Esa diferencia constituye el verdadero objetivo de este libro: formar profesionales capaces de entender los fundamentos que sustentan las decisiones de diseño y operación, más allá de la simple aplicación de procedimientos o manuales técnicos.

1.9 TENDENCIAS ACTUALES Y FUTURO DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS

Las membranas siguen evolucionando con rapidez, empujadas por la meta de obtener agua mejor, gastar menos energía y avanzar hacia tratamientos más sostenibles. Las comerciales de hoy están muy desarrolladas, pero aún quedan retos importantes: el ensuciamiento, la degradación química, el costo de producir agua y la recuperación de recursos.

La investigación de las dos últimas décadas hizo que la membrana deje de verse solo como separador y pase a ser un material funcional que interactúa con su entorno. Este giro dio paso a una nueva generación, con propiedades avanzadas y pensada para atender necesidades específicas de diversos procesos industriales.

Vistas desde la Ingeniería del Agua, las líneas de investigación principales caben en cinco áreas:

- desarrollo de nuevos materiales;
- optimización energética;
- digitalización y automatización;
- integración de procesos;
- economía circular.

Estas cinco áreas están cambiando cómo se diseñan y se operan las plantas de tratamiento.

1.9.1 NUEVOS MATERIALES PARA MEMBRANAS

Cómo rinde una membrana está muy ligado a las propiedades del material con que se fabrica. Durante años, el bajo costo y la facilidad de fabricación hicieron que casi todas las aplicaciones industriales usaran membranas poliméricas. Pero trabajar bajo condiciones más duras obligó a crear materiales nuevos, de mejor comportamiento mecánico, químico y térmico.

Actualmente, las principales líneas de investigación incluyen:

- membranas cerámicas de alta resistencia;
- membranas híbridas orgánico-inorgánicas;
- membranas biomiméticas inspiradas en las acuaporinas;

- membranas funcionalizadas con nanopartículas;
- membranas basadas en grafeno y óxido de grafeno;
- membranas elaboradas con materiales bidimensionales (MXenes).

Estos materiales buscan incrementar simultáneamente la permeabilidad, la selectividad y la resistencia al ensuciamiento, superando el compromiso tradicional entre flujo y rechazo que caracteriza a muchas membranas comerciales.

Aplicación industrial

Las membranas cerámicas están adquiriendo una importancia creciente en industrias donde las membranas poliméricas presentan limitaciones debido a altas temperaturas, solventes agresivos o condiciones extremas de operación. Su elevada resistencia química permite aplicar procedimientos de limpieza más intensivos, prolongando significativamente la vida útil del sistema.

1.9.2 DIGITALIZACIÓN E INDUSTRIA 4.0

La digitalización está cambiando a fondo cómo se operan las plantas de tratamiento.

Los sistemas modernos incorporan sensores distribuidos, instrumentación inteligente y plataformas de supervisión capaces de registrar continuamente variables como:

- presión;
- caudal;
- temperatura;
- conductividad;
- pH;
- turbidez;
- índice de ensuciamiento (SDI);
- potencial de oxidación-reducción;
- consumo energético.

Estos datos permiten desarrollar estrategias avanzadas de operación basadas en inteligencia artificial, aprendizaje automático (*Machine Learning*) y modelos predictivos.

Las plantas modernas ya no esperan a que surja el problema: procuran prever cuándo se ensuciarán las membranas y ajustar solas la operación para optimizarla.

Ingeniería Química aplicada

En adelante, la ciencia de materiales y el análisis de datos influirán por igual en cómo se diseñan las membranas.

Al combinar sensores en línea, inteligencia artificial y modelos de transporte, se podrán regular automáticamente los parámetros de operación para lograr el máximo rendimiento con el mínimo gasto de energía.

El ingeniero del agua deberá comprender tanto los fundamentos fisicoquímicos del proceso como las herramientas digitales utilizadas para controlar sistemas complejos.

1.9.3 ECONOMÍA CIRCULAR

Uno de los giros conceptuales más importantes de los últimos años es dejar de creer que una planta de tratamiento existe solo para eliminar contaminantes.

Actualmente se considera que una planta moderna debe recuperar:

- agua;
- energía;
- nutrientes;
- productos químicos;
- materiales de valor económico.

Dentro de este enfoque las membranas ocupan un lugar central, gracias a su gran capacidad de separación.

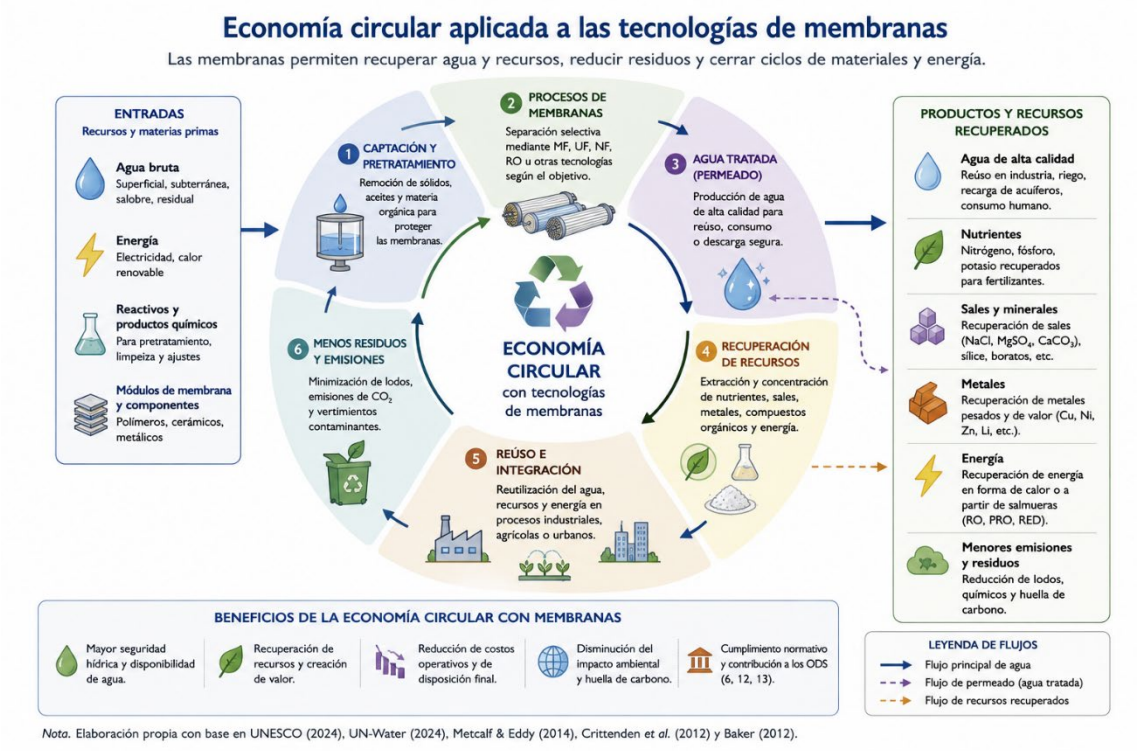
En numerosas instalaciones industriales ya se recuperan:

- fósforo;
- nitrógeno;
- sales;
- proteínas;
- metales;
- agua de proceso.

Así se consumen menos recursos naturales y, al mismo tiempo, se generan menos residuos.

Figura 1.8

Economía circular aplicada a las tecnologías de membranas.



Nota. Elaboración propia con base en UNESCO (2024), UN-Water (2024), Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Metcalf & Eddy (2014) y Strathmann (2011).

Tabla 1.11

Tendencias tecnológicas en Ingeniería de Membranas

Tendencia	Objetivo	Impacto esperado
Membranas biomiméticas	Incrementar permeabilidad y selectividad	Menor consumo energético
Grafeno y nanomateriales	Mayor flujo y resistencia	Procesos más eficientes
Inteligencia Artificial	Optimización operacional	Reducción de costos
Digital Twin	Simulación en tiempo real	Operación predictiva
Economía circular	Recuperación de recursos	Mayor sostenibilidad
Integración energética	Disminución del consumo eléctrico	Menor huella de carbono
Membranas autocurables (en investigación)	Extender la vida útil	Menores costos de mantenimiento

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Strathmann (2011), Shannon et al. (2008), Elimelech y Phillip (2011), UNESCO (2024) y literatura reciente sobre materiales avanzados.

Recuadro de Ingeniería

¿Desaparecerán las tecnologías convencionales?

La respuesta es **no**.

Es muy frecuente el error de creer que las membranas reemplazarán del todo a la coagulación, a la sedimentación o a la filtración rápida.

En realidad, la tendencia mundial apunta hacia la **integración de tecnologías**.

Una planta moderna combina operaciones convencionales con procesos avanzados de membranas, oxidación, adsorción y desinfección, aprovechando las ventajas específicas de cada una.

Corresponde al ingeniero del agua escoger la mejor combinación para cada problema, evaluando lo técnico, lo económico, lo energético y lo ambiental.

Ideas clave del Capítulo 1

Al terminar este capítulo, el lector debería tener presentes los siguientes conceptos básicos:

1. El agua es un recurso estratégico para lograr un desarrollo sostenible, y su disponibilidad, su calidad y su gestión plantean desafíos.
2. Las membranas nacieron porque se necesitaba obtener agua de alta calidad con procesos más eficientes y selectivos.
3. Una membrana es una **barrera selectiva** y no simplemente un filtro.
4. Toda separación mediante membranas requiere una **fuerza impulsora** y un mecanismo de transporte.
5. Las membranas constituyen una **operación unitaria de separación**, comparable con otras operaciones clásicas de la Ingeniería Química.
6. Qué tecnología de membranas conviene depende de los contaminantes presentes, de cómo sea el agua de alimentación y de lo que se busque con el tratamiento.
7. Hoy domina la tendencia de diseñar plantas modernas que combinen las membranas, los procesos convencionales y las tecnologías digitales.
8. La Ingeniería de Membranas es una disciplina interdisciplinaria que integra fenómenos de transporte, ciencia de materiales, química del agua, automatización y sostenibilidad.

1.10 INTRODUCCIÓN AL DISEÑO INGENIERIL DE SISTEMAS DE MEMBRANAS

Hasta este punto se han presentado las razones que justifican el desarrollo de las tecnologías de membranas, su evolución histórica, sus principales aplicaciones industriales y los fundamentos generales que gobiernan el transporte de materia a través de membranas. Sin embargo, el objetivo de la Ingeniería del Agua no consiste únicamente en comprender estos procesos desde una perspectiva científica. El verdadero desafío del ingeniero es **transformar ese conocimiento en soluciones técnicamente viables, económicamente sostenibles y ambientalmente responsables**.

Antes de escoger algún módulo del mercado o de calcular el área requerida, ya está en marcha el proyecto de una planta con membranas. Lo primero es entender el problema: analizar cómo es el agua que ingresa, definir la calidad que se necesita a la salida, identificar qué restricciones operativas existen y establecer qué exigencias técnicas, económicas y ambientales pesarán sobre la obra.

Visto así, diseñar es tomar decisiones donde intervienen varias áreas de la ingeniería y de las ciencias aplicadas. Gracias a la química del agua se reconocen los contaminantes y se anticipa la incrustación o el ensuciamiento. Con la hidráulica se estudia cómo circula el fluido en el interior de los módulos, y de las propiedades de las membranas se ocupa la ciencia de materiales. A los fenómenos de transporte y a la termodinámica les toca explicar cómo ocurre la separación; el análisis económico, por último, define si el proyecto es viable.

Por eso conviene que el ingeniero piense en términos de sistema. Una planta de membranas es más que módulos unidos por tuberías: cada decisión de diseño repercute a la vez en el gasto de energía, en el agua recuperada, en la calidad del permeado, en cada cuánto se hace limpieza química, en cuánto duran las membranas y en los costos de operación.

1.10.1 METODOLOGÍA GENERAL PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEMBRANAS

Aunque cada proyecto presenta características particulares, la mayoría de los sistemas de membranas pueden diseñarse siguiendo una metodología general compuesta por ocho etapas principales.

Etapa 1. Definición del problema

Antes de realizar cualquier cálculo, el ingeniero debe responder preguntas fundamentales como:

- ¿Cuál es el origen del agua?
- ¿Qué uso tendrá el agua tratada?
- ¿Qué normativa debe cumplirse?
- ¿Cuál es el caudal requerido?
- ¿Cuál es la calidad exigida del permeado?
- ¿Qué restricciones económicas existen?

Una definición incompleta del problema conduce, inevitablemente, a diseños ineficientes.

Etapa 2. Caracterización del agua

Luego hay que determinar cómo es el agua de alimentación.

Los parámetros mínimos incluyen:

- pH.
- Temperatura.
- Conductividad.
- Turbidez.
- Sólidos suspendidos totales.
- Sólidos disueltos totales.
- Dureza.
- Alcalinidad.
- Carbono orgánico total.
- Índice SDI.
- Hierro y manganeso.
- Sílice.
- Microorganismos.

En aplicaciones industriales esta caracterización puede ampliarse considerablemente dependiendo del proceso.

Tabla 1.12

Información mínima requerida para iniciar el diseño de un sistema de membranas

Información	Importancia
Caudal de diseño	Dimensionamiento hidráulico
Calidad del agua de alimentación	Selección de membranas
Calidad requerida del permeado	Definición del proceso
Variaciones estacionales	Robustez del diseño
Espacio disponible	Configuración de la planta
Disponibilidad energética	Selección tecnológica
Costos de operación	Evaluación económica
Normativa aplicable	Cumplimiento legal

Nota. Elaboración propia con base en Crittenden et al. (2012), Baker (2012), AWWA (2017) y Metcalf & Eddy (2014).

Etapa 3. Selección conceptual de la tecnología

Una vez caracterizada el agua, el ingeniero debe seleccionar la tecnología de membranas más apropiada.

Por ejemplo:

- sólidos suspendidos → Microfiltración;
- virus → Ultrafiltración;
- dureza → Nanofiltración;
- sales disueltas → Ósmosis inversa;
- agua ultrapura → Ósmosis inversa + Electrodeionización.

Es una de las decisiones de mayor peso en todo el proyecto.

Ingeniería aplicada

Observe que el ingeniero **todavía no realiza cálculos**.

Primero comprende el problema.

Después selecciona la tecnología.

Finalmente dimensiona el sistema.

Éste es exactamente el procedimiento utilizado en proyectos reales de ingeniería.

1.10.2 VARIABLES FUNDAMENTALES DEL DISEÑO

Antes de ver cada tecnología por separado, conviene presentar las variables principales que irán apareciendo una y otra vez en el libro.

Recuadro 1.1. Variables fundamentales de diseño

Caudal de alimentación

Caudal de permeado

Caudal de concentrado

Área de membrana

Flujo de permeado

Recuperación

Rechazo

Presión de operación

Temperatura

Consumo específico de energía

Estas variables constituyen el lenguaje básico utilizado por ingenieros, fabricantes y operadores de plantas de membranas.

En los capítulos siguientes aprenderemos a calcular cada una de ellas.

1.10.3 PRIMERAS ECUACIONES DE INGENIERÍA DE MEMBRANAS

Como acordamos, utilizaremos **texto plano** para todas las ecuaciones.

Ecuación 1.1. Balance global de caudales

Caudal de alimentación = Caudal de permeado + Caudal de concentrado

Forma abreviada:

$$Qf = Qp + Qc$$

donde

Qf = caudal de alimentación

Qp = caudal de permeado

Qc = caudal de concentrado

Interpretación física

Todo el caudal que entra al sistema sale en dos corrientes: una de agua tratada (permeado) y otra concentrada (rechazo). Así lo dicta el principio por el cual la masa se conserva.

Aplicación ingenieril

Sea cual sea la tecnología empleada, el diseño de todo sistema con membranas arranca con esta ecuación.

Ecuación 1.2. Recuperación

Recuperación (%) = (Caudal de permeado / Caudal de alimentación) × 100

Forma abreviada:

R (%) = (Qp / Qf) × 100

donde

R = recuperación del sistema (%)

Qp = caudal de permeado

Qf = caudal de alimentación

Interpretación física

La recuperación indica qué fracción del agua alimentada se transforma en agua útil. Recuperaciones muy bajas implican un mayor volumen de concentrado, mientras que recuperaciones excesivamente altas pueden incrementar el riesgo de incrustación y ensuciamiento.

Ecuación 1.3. Flujo de permeado

Flujo = Caudal de permeado / Área efectiva de membrana

Forma abreviada:

$$J = Qp / A$$

donde

J = flujo de permeado

Qp = caudal de permeado

A = área efectiva de membrana

Unidades

$L/m^2 \cdot h$

LMH (Liters per Square Meter per Hour)

Interpretación física

El flujo expresa la productividad de la membrana. Más flujo significa más agua producida por unidad de superficie, aunque no siempre implica mejor desempeño si pone en riesgo la estabilidad del sistema.

Error frecuente

Un error muy común es querer maximizar a la vez el flujo, el rechazo y la recuperación.

En la práctica, los tres parámetros dependen unos de otros, y subir uno puede perjudicar a los demás. Por eso, diseñar con membranas es, justamente, hallar un balance entre lo técnico, lo económico y lo operativo.

Reflexión para el ingeniero del agua

Las ecuaciones de esta sección parecen sencillas, pero sostienen los cálculos de todos los capítulos siguientes. Los modelos más complejos de la ingeniería suelen levantarse sobre principios básicos, entre ellos el balance de materia. Quien domine bien estas relaciones podrá interpretar con criterio lo que arrojan las simulaciones, los programas de diseño y las hojas de cálculo, en vez de tomarlos como una "caja negra".

1.10.4 INGENIERÍA SOSTENIBLE Y ECONOMÍA CIRCULAR

En décadas recientes, la Ingeniería del Agua ha cambiado de manera profunda su forma de pensar. Antes, una planta de tratamiento se diseñaba sobre todo para remover contaminantes y luego devolver el agua tratada al ambiente. Con ese criterio, las corrientes concentradas, los nutrientes y los sólidos separados eran residuos, y manejarlos suponía un gasto adicional para quien operaba la planta.

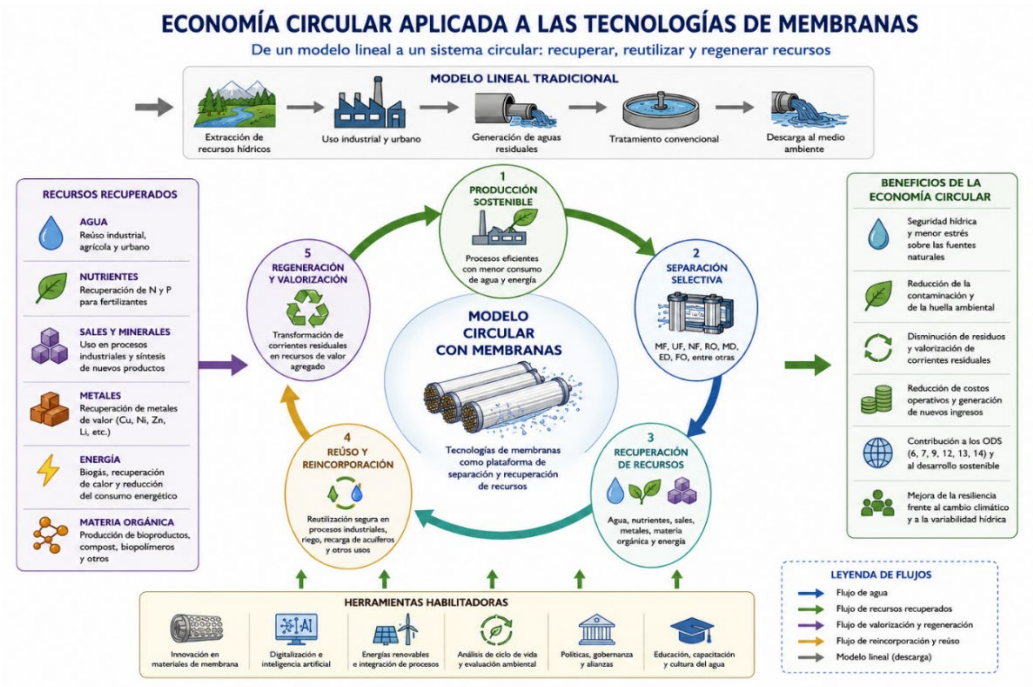
Actualmente, este paradigma está siendo reemplazado por el concepto de **economía circular**, en el cual los residuos dejan de ser considerados desechos para convertirse en fuentes potenciales de agua, energía, nutrientes y materias primas. Desde esta perspectiva, una planta de tratamiento moderna no solo produce agua de mejor calidad, sino que también recupera recursos que pueden reincorporarse a otros procesos productivos.

En este nuevo enfoque las membranas son fundamentales por su alta selectividad y su capacidad de separar compuestos valiosos con poco uso de reactivos químicos. Recuperar agua para reúso industrial, concentrar nutrientes para fertilizantes, reutilizar sales y valorizar compuestos orgánicos son aplicaciones que ayudan a gestionar el recurso hídrico de forma más sostenible.

El cambio importa sobre todo donde el agua es escasa, porque reutilizarla con seguridad puede ser una alternativa más sostenible que seguir explotando nuevas fuentes de abastecimiento.

Figura 1.9

Economía circular aplicada a las tecnologías de membranas



Nota. Elaboración propia con base en UNESCO (2024), UN-Water (2024), Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Metcalf & Eddy (2014) y Strathmann (2011).

En la Figura 1.9 se aprecia el paso de un modelo lineal, que consiste en extraer, usar y descargar el agua, a uno circular, donde agua tratada, nutrientes, energía y demás recursos recuperados vuelven a ciclos productivos nuevos. Aquí las membranas son la plataforma tecnológica que permite separar de forma selectiva y valorizar recursos; así disminuyen el uso de agua y los residuos, y resultan más sostenibles los procesos de la industria y de las ciudades.

Tabla 1.13

Contribución de las tecnologías de membranas a la economía circular

Recurso recuperado	**Tecnología de membranas**	**Aplicaciones**
Agua	UF, NF, RO, MBR	Reúso industrial, agrícola y urbano
Nutrientes	NF, RO	Recuperación de nitrógeno y fósforo
Sales	RO, ED, EDI	Procesos industriales y reutilización
Materia orgánica	UF, NF	Producción de bioproductos

Recurso recuperado	Tecnología de membranas	Aplicaciones
Metales	NF, ED	Minería e industria metalúrgica
Energía	Integración con biogás y recuperación de calor	Optimización energética de plantas

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Metcalf & Eddy (2014) y UNESCO (2024).

Reflexión para el ingeniero del agua

Hoy una planta moderna no se juzga únicamente por el efluente que descarga, sino también por lo que recupera, sea agua, energía o materiales útiles. Así se consumen menos recursos naturales y se aporta al desarrollo sostenible. Con este criterio, las membranas se afianzan entre las mejores herramientas para llevar a la práctica los principios de una economía circular en esta rama de la ingeniería.

1.11 EL PAPEL DEL INGENIERO DEL AGUA EN EL SIGLO XXI

Los problemas del agua son cada vez más complejos y, con ello, cambió mucho el perfil del ingeniero que trabaja en ellos. Antes se lo asociaba sobre todo con diseñar y operar los sistemas que abastecen agua potable o tratan aguas residuales. Hoy se le piden capacidades de alcance mucho mayor, donde se combinen lo científico, lo tecnológico, lo ambiental, lo económico y lo social.

Este profesional interviene hoy en planificar de manera integral los recursos hídricos, diseñar procesos avanzados de tratamiento, reusar el agua con seguridad, recuperar recursos, gestionar la energía de las plantas y aplicar tecnologías digitales que optimicen la operación de los sistemas.

Las membranas ilustran muy bien esta evolución del perfil profesional: usarlas bien exige comprender, al mismo tiempo, química del agua, fenómenos de transporte, hidráulica, ciencia de materiales, automatización, análisis económico y sostenibilidad ambiental.

Por ello, el profesional de este siglo debe trabajar con una mirada interdisciplinaria que le permita combinar saberes de diversas especialidades de la ingeniería y de las ciencias aplicadas.

1.11.1 COMPETENCIAS DEL INGENIERO ESPECIALIZADO EN MEMBRANAS

Quien se especialice en membranas debe saber más que los equipos comerciales que hay en el mercado. Necesita poder analizar un problema, escoger la tecnología que mejor convenga, dimensionar el sistema, comprobar si es viable técnica y económicamente, y optimizar su desempeño mientras dure la instalación.

Entre las competencias fundamentales destacan:

- interpretar la calidad físico-química y microbiológica del agua;
- seleccionar tecnologías de membranas de acuerdo con los objetivos del tratamiento;
- diseñar sistemas hidráulicos asociados a procesos de membranas;
- evaluar el potencial de ensuciamiento (*fouling*) e incrustación (*scaling*);
- calcular balances de materia y energía;
- estimar consumos específicos de energía;
- diseñar estrategias de limpieza química (CIP);
- integrar membranas con otras operaciones unitarias;
- evaluar costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX);
- aplicar herramientas de simulación, hojas de cálculo y programación científica.

Con estas competencias se pueden desarrollar proyectos de ingeniería del agua que apunten a la sostenibilidad y a la innovación.

Tabla 1.14

Competencias profesionales del ingeniero especializado en tecnologías de membranas

Área de competencia	Aplicación profesional
Química del agua	Caracterización del agua de alimentación y prevención de incrustaciones
Fenómenos de transporte	Cálculo de flujos y mecanismos de separación
Hidráulica	Diseño de tuberías, bombas y pérdidas de carga
Ciencia de materiales	Selección de membranas y compatibilidad química
Ingeniería de procesos	Diseño e integración de operaciones unitarias
Automatización y control	Monitoreo y optimización de plantas
Economía de proyectos	Evaluación de inversiones y costos de operación
Sostenibilidad	Reúso del agua y economía circular

Nota. Elaboración propia con base en UNESCO (2024), Metcalf & Eddy (2014), Crittenden et al. (2012), Baker (2012) y AWWA (2017).

1.11.2 RETOS FUTUROS PARA LA INGENIERÍA DEL AGUA

Las décadas que vienen traerán una presión cada vez mayor sobre el agua disponible, por el aumento de la población, la urbanización, el cambio climático y el mayor requerimiento de la industria y de la agricultura.

Frente a ello, los principales retos de la Ingeniería del Agua son:

- garantizar el acceso universal al agua potable y al saneamiento;
- incrementar la eficiencia en el uso del agua;
- reducir el consumo energético de los procesos de tratamiento;
- recuperar agua y recursos a partir de aguas residuales;
- disminuir la huella de carbono de las infraestructuras hidráulicas;
- usar la inteligencia artificial y el análisis de datos al operar las plantas;
- desarrollar materiales más resistentes y sostenibles para membranas;
- fortalecer la resiliencia de los sistemas frente a eventos climáticos extremos.

Las tecnologías de membranas desempeñarán un papel central en la respuesta a estos desafíos debido a su elevada eficiencia, modularidad y capacidad de integración con otros procesos avanzados.

Figura 1.10

Competencias que necesita el ingeniero del agua ante los cambios tecnológicos y la sostenibilidad.



Nota. Elaboración propia con base en UNESCO (2024), Naciones Unidas (2023), AWWA (2017), Baker (2012) y Crittenden et al. (2012).

Reflexión para el ingeniero del agua

Asegurar agua segura para todos figura entre los retos mayores de la humanidad. Quien ejerce la ingeniería del agua no se limita a proyectar infraestructura: sus soluciones inciden en la productividad, en la salud pública, en el abastecimiento de alimentos y en el cuidado de los ecosistemas. Las membranas son una herramienta potente, pero rinden de verdad solo cuando el profesional las integra con criterio científico, exigencia técnica y responsabilidad hacia la sociedad.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS FISICOQUÍMICOS Y FENÓMENOS DE TRANSPORTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Entre las aplicaciones más relevantes que tienen los fenómenos de transporte, tanto en la Ingeniería del Agua como en la Ingeniería Química, destacan las membranas. En la operación parecen equipos bastante simples, pero detrás actúan procesos fisicoquímicos y físicos que fijan qué tan rápido se transportan las especies, qué tan bien se separan y cuánta energía consume el proceso.

El capítulo previo ofreció un panorama de las membranas, de sus usos y de su lugar en la gestión sostenible del agua. Para entender por qué una membrana deja pasar el agua y detiene ciertos contaminantes, hace falta ahora estudiar los mecanismos básicos que rigen el transporte de materia.

El material de la membrana no es lo único que decide el comportamiento de estos procesos. Pesan también las propiedades del agua, el tipo de solutos, las fuerzas impulsoras disponibles, las resistencias que se oponen al paso de las especies y la hidrodinámica del sistema.

Visto así, una membrana pone en práctica directa varios principios básicos de la Ingeniería Química: conservación de la masa, balances de materia, difusión molecular, convección, transferencia de masa y termodinámica de soluciones.

Este capítulo busca introducir esas ideas poco a poco y vincularlas en todo momento con problemas concretos de la Ingeniería del Agua. Así, quien lea verá que las ecuaciones que más adelante sirven para dimensionar un sistema de membranas no son fórmulas sueltas, sino la expresión cuantitativa de fenómenos que se dan sin pausa mientras funciona una planta.

Al terminar el capítulo, el estudiante podrá interpretar los mecanismos elementales del transporte de materia, reconocer las fuerzas impulsoras más usadas en membranas y tomar la difusión, la convección y la transferencia de masa como punto de partida para diseñar y analizar procesos de separación.

Objetivos del capítulo

Al finalizar el estudio de este capítulo, el estudiante será capaz de:

- Explicar los fundamentos fisicoquímicos que gobiernan el transporte de materia en procesos de membranas.
- Interpretar la función de las fuerzas impulsoras dentro de los procesos de separación.
- Diferenciar los mecanismos de difusión, convección y transferencia de masa.
- Aplicar balances de materia a sistemas sencillos de membranas.
- Entender cómo afectan las propiedades del agua al rendimiento de una membrana.
- Vincular el diseño y la operación de los sistemas de membranas con los fenómenos de transporte.

Mapa conceptual del capítulo

El capítulo avanza en orden lógico, desde las nociones básicas hasta su uso en la Ingeniería de Membranas:

1. Propiedades fisicoquímicas del agua.
2. Formas de expresar la concentración.
3. Fuerzas impulsoras del transporte.
4. Difusión molecular.
5. Convección.
6. Transferencia de masa.
7. Flujo de materia.
8. Resistencia al transporte.
9. Polarización por concentración.
10. Introducción al modelo solución–difusión.
11. Balances de materia aplicados a membranas.

Cada tema sentará las bases para los capítulos siguientes, que tratan la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa.

2.2 EL AGUA COMO MEDIO DE TRANSPORTE

Para estudiar cómo se mueven las especies químicas al cruzar una membrana, primero conviene conocer el medio en el que ese transporte tiene lugar, es decir, el agua.

En la vida diaria se piensa en el agua como un líquido sencillo, pero para la Ingeniería Química es un sistema enormemente complejo. De sus características físicas y químicas dependen la rapidez con que se transportan los solutos, la aparición de incrustaciones y del ensuciamiento de las membranas, el intercambio térmico y la estabilidad de muchos procesos industriales.

Lo particular del agua nace de su estructura molecular. En cada molécula, un átomo de oxígeno se enlaza de forma covalente con dos de hidrógeno, y el ángulo entre ambos enlaces ronda los 104,5°. Esa geometría reparte las cargas eléctricas de manera desigual, de modo que la molécula resulta polar y muy apta para formar puentes de hidrógeno.

Por esta estructura, el agua tiene propiedades fuera de lo común: es de los mejores disolventes que se conocen y un medio ideal para transportar muchas especies químicas.

Entre las propiedades de mayor importancia para la Ingeniería de Membranas destacan:

- elevada constante dieléctrica;
- alta capacidad disolvente;
- elevada tensión superficial;
- viscosidad relativamente baja;
- alta capacidad calorífica;
- densidad dependiente de la temperatura;
- capacidad para formar puentes de hidrógeno.

Todas ellas repercuten de forma directa en el flujo de agua, en cómo difunden los solutos y en la energía que demandan los procesos de separación.

Ingeniería Química aplicada

Una membrana no separa agua pura; separa una **solución acuosa**.

Por esta razón, el ingeniero debe analizar simultáneamente las propiedades del agua y las características de los solutos presentes. Un mismo sistema de membranas puede

comportarse de forma muy diferente cuando trata agua superficial, agua subterránea, agua de mar o un efluente industrial, debido a las diferencias en composición química, viscosidad, temperatura y contenido de sólidos.

Tabla 2.1

Propiedades del agua relevantes para la Ingeniería de Membranas

Propiedad	Valor aproximado (25 °C)	Importancia en Ingeniería de Membranas
Densidad	997 kg/m³	Cálculos hidráulicos y balances de masa
Viscosidad dinámica	0,89 mPa·s	Determina pérdidas de carga y flujo
Constante dieléctrica	78,5	Influye en la disolución de especies iónicas
Tensión superficial	72 mN/m	Humectación y formación de películas
Calor específico	4,18 kJ/kg·K	Procesos térmicos y destilación por membranas
Conductividad térmica	0,60 W/m·K	Transferencia de calor
pH neutro	7,0 (25 °C)	Equilibrio químico y compatibilidad con membranas

Nota. Elaboración propia con base en Perry's Chemical Engineers' Handbook, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Crittenden et al. (2012) y Metcalf & Eddy (2014).

2.3 FORMAS DE EXPRESAR LA COMPOSICIÓN Y CONCENTRACIÓN DEL AGUA

Interpretar bien los resultados de un análisis fisicoquímico es de los primeros retos del ingeniero del agua. Una muestra puede caracterizarse con distintas unidades de concentración, y cada una se ajusta mejor a ciertos cálculos o usos. Elegirlas correctamente es esencial al diseñar sistemas de membranas, preparar soluciones químicas, plantear balances de materia y estimar, entre otros fenómenos, la transferencia de masa o la presión osmótica.

En la práctica profesional es común encontrar concentraciones expresadas en **mg/L**, **ppm**, **mol/L**, **meq/L**, **% en masa**, **fracción molar** o **conductividad eléctrica**. Aunque todas describen la composición de una solución, cada una proporciona información diferente y responde a necesidades específicas de cálculo.

Quien ejerce esta profesión debe saber pasar de una unidad a otra y entender qué significa físicamente cada una.

2.3.1 CONCENTRACIÓN MASA POR VOLUMEN

En Ingeniería del Agua, la expresión más común es la masa de soluto contenida en cada unidad de volumen de solución.

Ecuación 2.1. Concentración masa-volumen

Concentración = Masa del soluto / Volumen de la solución

Forma abreviada

$$C = m / V$$

donde

C = concentración

m = masa del soluto

V = volumen de la solución

Unidades habituales

mg/L

g/L

kg/m³

Interpretación física

Esta concentración señala cuánta sustancia hay disuelta en un volumen de agua conocido.

Por ejemplo:

500 mg/L de NaCl

significa que

En cada litro de agua existen 500 mg de cloruro de sodio.

Interpretación ingenieril

Esta unidad es la más utilizada en:

- diseño de plantas de tratamiento;
- balances de materia;
- caracterización de agua;
- control operacional;
- normativa ambiental.

2.3.2 PARTES POR MILLÓN (PPM)

La unidad ppm (partes por millón) se emplea ampliamente para expresar concentraciones muy pequeñas.

En soluciones acuosas diluidas puede considerarse que

Ecuación 2.2

1 ppm ≈ 1 mg/L

Esta equivalencia es válida porque la densidad del agua es aproximadamente

1000 kg/m³

a temperatura ambiente.

Ejemplo

Si un análisis reporta

Hierro = 2 ppm

podemos interpretar que

Hierro ≈ 2 mg/L

Observación importante

Esta equivalencia deja de ser exacta cuando la solución posee elevada concentración salina, como ocurre en agua de mar o salmueras.

En esos casos debe utilizarse la densidad real de la solución.

Ingeniería aplicada

Muchos errores de diseño ocurren por asumir que

ppm = mg/L

en cualquier condición.

En agua de mar esta aproximación puede introducir errores importantes en balances de masa y cálculos osmóticos.

2.3.3 MOLARIDAD

La molaridad indica los moles que hay en cada litro de solución.

Esta unidad es ampliamente utilizada en termodinámica, química del agua y presión osmótica.

Ecuación 2.3

Molaridad = Número de moles / Volumen de solución

Forma abreviada

$$M = n / V$$

donde

M = molaridad (mol/L)

n = número de moles

V = volumen (L)

Número de moles

El número de moles se calcula mediante

Ecuación 2.4

Número de moles = Masa / Peso molecular

Forma abreviada

$$n = m / PM$$

Donde

n = moles

m = masa

PM = peso molecular

Ejemplo resuelto

Se disuelven

58,44 g de NaCl

en

1 litro de agua.

Calcular la molaridad.

Paso 1

Calcular los moles.

$$n = 58,44 / 58,44$$

$$n = 1 \text{ mol}$$

Paso 2

Calcular la molaridad.

$$M = 1 / 1$$

$$M = 1 \text{ mol/L}$$

Interpretación física

La molaridad indica cuántas moléculas existen en un determinado volumen de solución.

Esta unidad será indispensable cuando estudiemos:

- presión osmótica;
- equilibrio químico;
- difusión;
- potencial químico.

2.3.4 MOLALIDAD

La molalidad expresa los moles de soluto contenidos por kilogramo de solvente.

Ecuación 2.5

Molalidad = Número de moles / Masa del solvente

Forma abreviada

$$m = n / kg \text{ de solvente}$$

Diferencia entre molaridad y molalidad

La molaridad depende del volumen.

La molalidad depende de la masa.

Como el volumen cambia con la temperatura y la masa prácticamente no cambia, la molalidad resulta especialmente útil en estudios termodinámicos.

Tabla 2.2

Comparación entre las principales unidades de concentración

Unidad	Definición	Aplicaciones principales
mg/L	Masa por litro de solución	Calidad del agua, normativa, diseño de plantas
ppm	Partes por millón	Concentraciones muy bajas
mol/L	Moles por litro	Presión osmótica, equilibrio químico
mol/kg	Moles por kilogramo de solvente	Termodinámica
% masa	Masa de soluto por 100 g de solución	Preparación de soluciones
meq/L	Miliequivalentes por litro	Balance iónico, dureza, alcalinidad
Fracción molar	Relación entre moles de un componente y moles totales	Termodinámica y equilibrio de fases

Nota. Elaboración propia con base en APHA et al. (2023), Metcalf & Eddy (2014), Crittenden et al. (2012) y Perry's Chemical Engineers' Handbook.

Ingeniería Química aplicada

Observe que en Ingeniería del Agua utilizaremos distintas unidades según el problema a resolver:

- Para diseñar una planta de tratamiento, normalmente trabajaremos con **mg/L** y **kg/m³**.
- Para calcular la presión osmótica o analizar el transporte molecular, emplearemos **mol/L**.
- Para balances de carga eléctrica, utilizaremos **meq/L**.
- Para procesos termodinámicos avanzados, recurriremos a la **fracción molar** y la **molalidad**.

El ingeniero debe elegir la unidad que mejor represente el fenómeno físico que desea analizar.

Error frecuente

Mezclar unidades de concentración en un mismo cálculo es un error muy frecuente. Antes de plantear un balance de materia o de usar una ecuación de diseño, hay que llevar todas las concentraciones a un sistema de unidades coherente.

2.3.5 EQUIVALENTES, MILIEQUIVALENTES Y NORMALIDAD

No siempre se expresa la concentración de una sustancia en masa o en cantidad de materia. Cuando se trata de equilibrio químico, intercambio iónico, alcalinidad, dureza, neutralización o electrodiálisis, suele ser más cómodo referirla a la capacidad de reacción de cada especie. Para ello se usan tres conceptos: equivalente químico, miliequivalente y normalidad.

Con estos conceptos se leen mejor los análisis de agua y se arman los balances iónicos. Mientras las magnitudes de masa o de moles ignoran la carga, los equivalentes incorporan la valencia o poder de reacción del ion, y por eso dejan comparar de inmediato especies distintas según cuánto participan en una reacción.

2.3.5.1 Equivalente químico

Un equivalente químico representa la cantidad de una sustancia capaz de reaccionar con una mol de carga eléctrica positiva o negativa, o bien con un mol de protones en una reacción ácido-base.

El peso equivalente de una sustancia se obtiene dividiendo su peso molecular entre la valencia del ion o el número de cargas que participa en la reacción.

Ecuación 2.6. Peso equivalente

Peso equivalente = Peso molecular / Valencia

Forma abreviada

$$PE = PM / z$$

donde

PE = peso equivalente (g/eq)

PM = peso molecular (g/mol)

z = valencia o número de cargas

Ejemplo

Para el ion calcio:

PM del Ca^{2+} = 40,08 g/mol

Valencia = 2

Entonces,

$$PE = 40,08 / 2$$

$$PE = 20,04 \text{ g/eq}$$

Esto significa que **20,04 g de calcio representan un equivalente químico**.

2.3.5.2 Miliequivalentes por litro (meq/L)

En Ingeniería del Agua, la unidad más utilizada es el **miliequivalente por litro (meq/L)**, ya que las concentraciones de los principales iones suelen ser relativamente bajas.

Un miliequivalente corresponde a la milésima parte de un equivalente.

Ecuación 2.7. Conversión de mg/L a meq/L

meq/L = mg/L / Peso equivalente

Forma abreviada

meq/L = C / PE

donde

C = concentración (mg/L)

PE = peso equivalente (mg/meq)

Ejemplo resuelto

Una muestra de agua contiene

Calcio = 80 mg/L

Calcular la concentración en meq/L.

Paso 1.

Calcular el peso equivalente.

$$PE = 40,08 / 2$$

$$PE = 20,04 \text{ mg/meq}$$

Paso 2.

Aplicar la ecuación.

meq/L = 80 / 20,04

meq/L = 3,99

Por lo tanto,

Calcio = 4,0 meq/L

Interpretación física

Mientras que los mg/L indican la masa presente, los meq/L representan la cantidad de carga química disponible para participar en reacciones. Esta unidad permite comparar directamente diferentes iones, independientemente de su peso molecular.

Ingeniería aplicada

Los balances iónicos utilizados para verificar la calidad de un análisis químico del agua se realizan siempre en meq/L y no en mg/L. Esta conversión permite comprobar la electroneutralidad de la solución y detectar posibles errores analíticos.

2.3.5.3 Normalidad

La normalidad es el número de equivalentes que hay en cada litro de solución.

En química general se emplea menos que antes, pero todavía resulta útil en ciertos procedimientos analíticos y al preparar soluciones de laboratorio.

Ecuación 2.8. Normalidad

Normalidad = Número de equivalentes / Volumen de solución

Forma abreviada

$$N = eq / L$$

Relación entre molaridad y normalidad

Cuando la valencia es conocida, ambas unidades se relacionan mediante:

Ecuación 2.9

Normalidad = Molaridad × Valencia

Forma abreviada

$$N = M \times z$$

Ejemplo

Una solución de ácido sulfúrico posee una concentración de

0,5 mol/L

Como el ácido sulfúrico libera dos protones,

$$z = 2$$

Entonces,

$$N = 0{,}5 \times 2$$

$$N = 1\ N$$

2.3.6 EXPRESIÓN DE LA DUREZA COMO $CACO_3$

Por su efecto directo sobre las incrustaciones que se forman en tuberías, calderas, intercambiadores de calor y membranas, la dureza es uno de los conceptos centrales de la Ingeniería del Agua.

Por razones históricas y de estandarización, la dureza se expresa como **carbonato de calcio equivalente ($CaCO_3$)**, independientemente del compuesto que origine dicha dureza.

Esta forma de expresión permite comparar aguas con diferentes composiciones químicas utilizando una única base de referencia.

Ecuación 2.10. Conversión a $CaCO_3$

$$\text{mg/L como } CaCO_3 = (\text{mg/L del ion} \times 50) / \text{Peso equivalente}$$

donde

50 = peso equivalente del $CaCO_3$ (mg/meq)

Ejemplo resuelto

Una muestra contiene

Calcio = 80 mg/L

Expresar la concentración como $CaCO_3$.

Paso 1.

Peso equivalente del calcio:

20,04 mg/meq

Paso 2.

Aplicar la ecuación.

$CaCO_3 = (80 \times 50) / 20,04$

$CaCO_3 = 199,6$ mg/L

Aproximadamente,

200 mg/L como $CaCO_3$

Tabla 2.3

Factores de conversión de algunos iones a $CaCO_3$

Ion	Peso molecular (g/mol)	Valencia	Peso equivalente (g/eq)	Factor para expresar como $CaCO_3$
Ca^{2+}	40,08	2	20,04	2,50
Mg^{2+}	24,31	2	12,15	4,12
Na^{+}	22,99	1	22,99	2,17
HCO_3^{-}	61,02	1	61,02	0,82
CO_3^{2-}	60,01	2	30,00	1,67
SO_4^{2-}	96,06	2	48,03	1,04
Cl^{-}	35,45	1	35,45	1,41

Nota. Factores calculados a partir de los pesos moleculares y equivalentes químicos. Se utilizan ampliamente en ingeniería del agua para balances iónicos y evaluación de dureza.

Experiencia del ingeniero

En proyectos de ósmosis inversa es frecuente que los análisis de agua reporten simultáneamente concentraciones en **mg/L**, **meq/L** y **mg/L como $CaCO_3$**. Un ingeniero debe ser capaz de interpretar estas tres formas de expresión y convertir entre ellas con rapidez. Una conversión incorrecta puede conducir a errores en el cálculo del potencial de incrustación, la dosificación de reactivos o la selección del pretratamiento, comprometiendo el desempeño del sistema de membranas.

2.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL AGUA QUE GOBIERNAN LOS PROCESOS DE MEMBRANAS

El rendimiento de una separación con membranas depende de la membrana, pero igualmente de cómo sea, fisicoquímicamente, el agua que recorre el sistema. Para quien trabaja en Ingeniería de Procesos, el agua es un medio continuo donde se dan a la vez el

transporte de energía, de materia y de cantidad de movimiento. Por eso sus propiedades marcan la intensidad de las fuerzas impulsoras, cuánto se resiste el sistema al paso de las especies, el desarrollo de capas límite y el modo en que los solutos interactúan con la cara de la membrana.

Para diseñar sistemas de membranas no alcanza con conocer cuánto contaminante hay. Se deben evaluar además la temperatura, la tensión superficial, la constante dieléctrica, la difusividad, la viscosidad y la densidad, porque todas entran al calcular el flujo de permeado, la caída de presión, el intercambio de masa y la energía que consume cada unidad de agua producida.

A diferencia de otras operaciones unitarias, las membranas trabajan con soluciones reales cuya composición puede variar significativamente durante la operación. Como consecuencia, las propiedades físicas del agua no permanecen constantes, sino que evolucionan conforme aumenta la concentración de solutos en la superficie de la membrana, fenómeno conocido como **polarización por concentración**, que será estudiado posteriormente.

2.4.1 DENSIDAD

La densidad es la masa por unidad de volumen. Es una propiedad básica para los balances de materia y de cantidad de movimiento, y también para los cálculos hidráulicos.

La densidad del agua disminuye con el incremento de la temperatura y aumenta con la concentración de sales disueltas. Aunque en muchos cálculos preliminares puede considerarse constante, en procesos de desalación y tratamiento de salmueras esta simplificación deja de ser válida.

La densidad se define mediante la siguiente relación:

Densidad = Masa / Volumen

Forma abreviada

$$\rho = m / V$$

donde

ρ = densidad (kg/m^3)

m = masa (kg)

V = volumen (m^3)

Para agua pura a 25 °C puede adoptarse como valor de referencia:

$$\rho = 997 \text{ kg/m}^3$$

Ahora bien, el ingeniero debe recordar que el agua de mar tiene normalmente una densidad de 1 020 a 1 030 kg/m³, según su salinidad y su temperatura.

Esta propiedad importa porque entra directamente en la presión hidrostática, en las pérdidas de carga y en la potencia que necesitan las bombas de alimentación.

2.4.2 VISCOSIDAD

Para el diseño con membranas, la viscosidad es probablemente la propiedad física más influyente del agua.

La viscosidad expresa la resistencia interna que ofrece un fluido al movimiento de sus capas. En términos físicos, representa la fricción molecular que debe vencer el sistema para que el agua pueda desplazarse a través de tuberías, canales y membranas.

Cuando la viscosidad sube, el flujo de permeado baja y las pérdidas de carga crecen, lo que obliga a entregar más energía al proceso.

La viscosidad dinámica suele representarse mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \mu \times (du/dy)$$

donde

τ = esfuerzo cortante (Pa)

μ = viscosidad dinámica (Pa·s)

du/dy = gradiente de velocidad

Esta expresión se verá con más detalle en el capítulo sobre Mecánica de Fluidos Aplicada a Membranas; por ahora basta entender que la viscosidad mide cuánto se resiste un fluido a fluir.

Para agua pura a 25 °C:

$$\mu = 0{,}89 \times 10^{-3} \text{ Pa·s}$$

Su valor baja al subir la temperatura, de modo que un aumento moderado de esta suele traducirse en más flujo de permeado. Aun así, conviene analizarlo con cuidado: el calor excesivo puede acelerar el deterioro químico de ciertas membranas poliméricas.

En el diseño, la viscosidad pesa en la elección de las bombas, en el cálculo de las pérdidas de carga, en la definición del régimen de flujo y en la estimación del consumo específico de energía.

2.4.3 DIFUSIVIDAD MOLECULAR

La difusión constituye el mecanismo responsable del transporte espontáneo de especies químicas debido a diferencias de concentración. La rapidez con la que ocurre este proceso depende del coeficiente de difusión, también denominado difusividad molecular.

Este parámetro mide con qué facilidad se desplaza una molécula en el agua por efecto de su agitación térmica aleatoria.

El coeficiente de difusión depende de diversos factores, entre ellos:

- tamaño molecular;
- temperatura;
- viscosidad del medio;
- naturaleza química del soluto;
- interacción entre el soluto y el solvente.

En general, moléculas pequeñas presentan coeficientes de difusión mayores que moléculas de gran tamaño, razón por la cual atraviesan con mayor facilidad las capas límite y determinados tipos de membranas.

Este concepto será la base para el estudio de la **Ley de Fick**, que se desarrollará en el siguiente apartado y constituirá uno de los pilares del análisis de transferencia de masa en procesos de membranas.

Tabla 2.4

Cómo afectan las propiedades del agua al desempeño de los procesos con membranas

Propiedad	**Influencia sobre el proceso**	**Parámetros afectados**
Densidad	Determina la presión hidrostática y los balances de materia	Caudal, presión, potencia de bombeo
Viscosidad	Controla la resistencia al flujo	Flujo de permeado, pérdidas de carga, consumo energético
Difusividad	Controla la velocidad de transporte molecular	Polarización por concentración, transferencia de masa
Temperatura	Modifica las propiedades físicas del agua	Flujo, viscosidad, difusión
Tensión superficial	Influye en la humectación de la membrana	Formación de películas y ensuciamiento
Constante dieléctrica	Determina la interacción entre especies iónicas	Separación de sales y equilibrio químico

Nota. Elaboración propia.

A la hora de diseñar, estas propiedades no deben estudiarse por separado. Si cambia la temperatura, por ejemplo, varían a la vez la densidad, la viscosidad y la difusividad del soluto, y con ellas el caudal de permeado y el gasto energético. Por esta interdependencia, los modelos de simulación de la Ingeniería de Membranas trabajan con propiedades físicas que cambian según la composición y las condiciones de operación.

Al finalizar esta sección, el lector debe comprender que el comportamiento hidráulico y la eficiencia de separación de una membrana no dependen únicamente de sus características estructurales, sino también del comportamiento fisicoquímico del agua que circula a través del sistema. Sobre esta base se desarrollará el siguiente apartado, dedicado al estudio de las **fuerzas impulsoras y los mecanismos de transporte de materia**, donde se introducirán formalmente la difusión, la convección y las ecuaciones que sustentan el diseño de los procesos de membranas.

2.5 FUERZAS IMPULSORAS DEL TRANSPORTE DE MATERIA

Todo proceso de separación requiere la existencia de una diferencia de potencial capaz de generar el movimiento de una o varias especies químicas. En Ingeniería Química esta diferencia se denomina **fuerza impulsora** (*driving force*) y constituye el origen físico de todos los fenómenos de transporte. Sin una fuerza impulsora no existe transporte neto de materia y, en consecuencia, tampoco puede producirse la separación.

En un proceso con membranas, la membrana no genera el movimiento del agua ni de los solutos; su tarea es regular de forma selectiva cuáles especies cruzan la barrera. La energía que provoca ese transporte siempre viene de un potencial diferencial que se impone al sistema.

Esta idea es clave porque muestra que tecnologías que parecen muy distintas, entre ellas la ósmosis inversa, la microfiltración, la destilación por membranas y la electrodiálisis, obedecen al mismo principio físico. Entre ellas varía la naturaleza de la fuerza impulsora, no su existencia.

En general, la materia se transporta de manera espontánea desde donde el potencial es mayor hacia donde es menor, y así el sistema tiende al equilibrio termodinámico. El ingeniero saca partido de esa tendencia para diseñar procesos que entreguen agua con la calidad exigida.

2.5.1 GRADIENTES COMO ORIGEN DEL TRANSPORTE

Una fuerza impulsora puede entenderse como el resultado de un gradiente entre dos zonas del sistema. Un gradiente es la variación en el espacio de una propiedad intensiva; por ejemplo, el potencial eléctrico, la temperatura, la presión o la concentración.

En términos matemáticos, el gradiente mide qué tan rápido cambia una propiedad al moverse en el espacio. Mientras más pronunciado sea ese cambio, mayor es la fuerza impulsora que se tiene para el transporte.

En Ingeniería de Membranas, las fuerzas impulsoras más importantes son:

- gradiente de presión;
- gradiente de concentración;
- gradiente de potencial eléctrico;
- gradiente de temperatura;
- gradiente de potencial químico.

Cada tipo de fuerza genera un mecanismo de transporte distinto y define qué clase de membrana corresponde usar.

Ingeniería aplicada

Una de las decisiones más importantes durante el diseño consiste en seleccionar la fuerza impulsora más conveniente para cada problema. Por ejemplo, cuando el objetivo es eliminar sólidos suspendidos, una diferencia de presión suele ser suficiente. Sin embargo, cuando se desea separar sales disueltas o producir agua ultrapura, el fenómeno está gobernado por diferencias de potencial químico y presión osmótica, lo que exige tecnologías más avanzadas y un mayor consumo energético.

2.5.2 TRANSPORTE IMPULSADO POR DIFERENCIAS DE PRESIÓN

Casi todas las tecnologías que hoy se aplican al tratamiento de agua operan con una diferencia de presión entre las dos caras de la membrana. La presión que entregan las bombas aporta la energía para superar las resistencias hidráulicas y hacer que el agua atraviese la membrana.

Como la presión transmembrana controla de manera directa cuánto permeado se produce y cuánta energía se consume, es de las variables de diseño que más pesan.

En términos generales, la diferencia de presión se expresa como:

$$\Delta P = P_{alimentación} - P_{permeado}$$

donde

ΔP = diferencia de presión o presión transmembrana (Pa)

$P_{alimentación}$ = presión en el lado de alimentación (Pa)

$P_{permeado}$ = presión en el lado del permeado (Pa)

En la práctica, subir la presión transmembrana suele aumentar el flujo de permeado. Esa proporcionalidad se pierde, sin embargo, cuando intervienen la compactación de la membrana, el fouling o la polarización por concentración.

Por esta razón, el diseño óptimo no consiste en aplicar la máxima presión posible, sino en determinar la presión que maximiza la producción de agua manteniendo un consumo energético razonable y una operación estable.

2.5.3 TRANSPORTE IMPULSADO POR DIFERENCIAS DE CONCENTRACIÓN

Si una membrana semipermeable separa dos soluciones de distinta concentración, las moléculas de agua se mueven de forma espontánea hacia el lado más concentrado, y con eso se achica la brecha de potencial químico entre las dos fases.

Este fenómeno constituye la base física de la ósmosis y de tecnologías como la ósmosis directa (*Forward Osmosis*). En estos procesos, la fuerza impulsora no proviene de una bomba, sino de la diferencia de concentración existente entre ambas soluciones.

Aunque el movimiento espontáneo del agua puede parecer un fenómeno simple, su descripción rigurosa requiere introducir el concepto de potencial químico, el cual será desarrollado posteriormente debido a su importancia en la formulación termodinámica del transporte.

Al diseñar, el ingeniero debe tener presente que una gran diferencia de concentración eleva a la vez la presión osmótica y la fuerza impulsora, y esto condiciona la energía que se necesita para producir agua por ósmosis inversa.

2.5.4 TRANSPORTE IMPULSADO POR POTENCIAL ELÉCTRICO

Si la solución contiene especies iónicas, también es posible transportarlas aplicando un campo eléctrico: los aniones se dirigen al electrodo positivo y los cationes migran al negativo.

Sobre este principio se apoyan la electrodiálisis y la electrodeionización, tecnologías muy extendidas para obtener agua desmineralizada y agua ultrapura.

En estos procesos, a diferencia de los impulsados por presión, el gasto de energía depende sobre todo de la corriente que se aplica y de lo bien que conduzca la electricidad el agua.

2.5.5 TRANSPORTE IMPULSADO POR DIFERENCIAS DE TEMPERATURA

Una diferencia de temperatura también puede mover materia, siempre que provoque diferencias de presión de vapor entre los dos lados de una membrana hidrofóbica.

Este mecanismo constituye el fundamento de la destilación por membranas, una tecnología de creciente interés debido a la posibilidad de aprovechar calor residual procedente de procesos industriales o fuentes de energía renovable.

Hoy su uso industrial es todavía menor que el de la ósmosis inversa, pero la destilación por membranas se perfila como una opción promisoria para salmueras muy concentradas y para efluentes en los que los procesos convencionales tienen limitaciones.

Tabla 2.5

Fuerzas impulsoras utilizadas en Ingeniería de Membranas

Fuerza impulsora	Variable que genera el transporte	Tecnologías representativas	Aplicaciones principales
Diferencia de presión	Presión transmembrana	Microfiltración, Ultrafiltración, Nanofiltración, Ósmosis inversa	Producción de agua potable, desalinización, reúso
Diferencia de concentración	Potencial químico	Ósmosis directa	Concentración de soluciones y recuperación de agua
Diferencia de potencial eléctrico	Campo eléctrico	Electrodiálisis, Electrodeionización	Desmineralización y agua ultrapura
Diferencia de temperatura	Presión parcial de vapor	Destilación por membranas	Desalinización y tratamiento de salmueras

Nota. Elaboración propia.

Entender las fuerzas impulsoras es el primer paso para plantear las ecuaciones del transporte de materia, aunque saber que existe una fuerza no basta para predecir qué tan rápido se separa algo. Además hay que conocer el mecanismo por el que las moléculas se mueven en el fluido y cruzan la membrana.

2.6 DIFUSIÓN MOLECULAR

La difusión es uno de los mecanismos básicos del transporte de materia, tanto en sistemas naturales como industriales. A escala microscópica, las moléculas de un fluido están siempre en movimiento por su energía térmica. Ese movimiento, llamado browniano, produce choques constantes entre ellas y, si la concentración difiere entre dos zonas del sistema, deriva en un desplazamiento neto.

En ausencia de fuerzas externas, la difusión representa el mecanismo dominante de transporte para especies disueltas. Las moléculas migran espontáneamente desde las regiones de mayor concentración hacia aquellas donde la concentración es menor, tendiendo a disminuir el gradiente de concentración hasta alcanzar el equilibrio termodinámico.

La difusión es central en la Ingeniería de Membranas, ya que interviene en el transporte del agua y también en el de los solutos. Incluso cuando la fuerza motriz es la presión, como ocurre en la ósmosis inversa, las especies avanzan por la capa activa mediante mecanismos difusivos. Por eso, entender la difusión molecular es imprescindible para interpretar casi cualquier tecnología de membranas.

En los procesos convectivos, las moléculas se mueven porque todo el fluido se desplaza; en la difusión, en cambio, lo que mueve la materia es el vaivén aleatorio de las propias moléculas. De ahí que haya difusión incluso con el fluido aparentemente quieto.

2.6.1 INTERPRETACIÓN MOLECULAR DE LA DIFUSIÓN

A nivel molecular, cada especie química tiene una energía cinética ligada a la temperatura del sistema. Gracias a ella, las moléculas chocan sin cesar y su trayectoria cambia todo el tiempo.

Cuando la concentración de una especie es mayor en una región determinada, el número de moléculas que abandonan esa región supera al número de moléculas que ingresan desde la región menos concentrada. Este desequilibrio produce un flujo neto dirigido hacia las zonas de menor concentración.

Es importante destacar que ninguna molécula "sabe" hacia dónde debe desplazarse. El transporte macroscópico observado es simplemente el resultado estadístico de millones de millones de movimientos aleatorios que ocurren simultáneamente.

Esta interpretación permite comprender por qué la difusión constituye un fenómeno irreversible: el sistema evoluciona espontáneamente hacia estados de mayor uniformidad y mayor entropía.

Ingeniería aplicada

Piénsese en la ósmosis inversa en planta: las sales disueltas tienden por naturaleza a pasar del lado de la alimentación al del permeado, empujadas por el gradiente de concentración entre ambas caras. La membrana está para oponer mucha resistencia a ese paso difusivo y, a la vez, dejar pasar preferentemente el agua; de ahí que la capa activa se diseñe buscando la máxima selectividad sin sacrificar demasiado la permeabilidad.

2.6.2 COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

La rapidez con la que una especie química difunde dentro de un medio se caracteriza mediante el coeficiente de difusión, también denominado difusividad molecular.

Este parámetro indica cuánto puede desplazarse una molécula en un medio por efecto de su agitación térmica, y depende de las propiedades tanto del soluto como del solvente.

En términos generales, el coeficiente de difusión aumenta cuando:

- aumenta la temperatura;
- disminuye la viscosidad del medio;
- disminuye el tamaño molecular;
- debilita las interacciones que se establecen entre soluto y solvente.

Por el contrario, moléculas grandes, altamente hidratadas o presentes en soluciones viscosas presentan coeficientes de difusión significativamente menores.

El coeficiente de difusión en medio acuoso de casi todos los compuestos que interesan en la Ingeniería del Agua está entre 10^{-9} y 10^{-11} m²/s.

Tabla 2.6

Coeficientes de difusión aproximados de algunas especies químicas en agua a 25 °C

Especie	Coeficiente de difusión (m²/s)	Aplicación en Ingeniería del Agua
Agua	$2{,}3 \times 10^{-9}$	Transporte del solvente
Sodio (Na^+)	$1{,}33 \times 10^{-9}$	Desalinización

Especie	Coeficiente de difusión (m²/s)	Aplicación en Ingeniería del Agua
Cloruro (Cl^-)	$2{,}03 \times 10^{-9}$	Desalinización
Calcio (Ca^{2+})	$0{,}79 \times 10^{-9}$	Dureza e incrustaciones
Sulfato (SO_4^{2-})	$1{,}07 \times 10^{-9}$	Formación de incrustaciones
Glucosa	$0{,}67 \times 10^{-9}$	Industria alimentaria
Albúmina	$0{,}06 \times 10^{-9}$	Ultrafiltración de proteínas

Nota. Valores representativos para soluciones diluidas a 25 °C. Los coeficientes de difusión pueden variar con la temperatura, la composición de la solución y las interacciones intermoleculares.

Estas diferencias explican en parte por qué ciertas especies cruzan una membrana con más facilidad que otras. El coeficiente de difusión, sin embargo, no es lo único que gobierna la separación: cuentan además la afinidad química entre soluto y material, el diámetro hidrodinámico de cada especie, las condiciones de operación y la propia estructura de la membrana.

2.6.3 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LA DIFUSIÓN

Pocas variables operacionales pesan tanto en los procesos de membranas como la temperatura, pues con ella cambian al mismo tiempo la viscosidad del agua, los coeficientes de difusión y la movilidad molecular.

Cuando sube la temperatura, las moléculas ganan energía cinética y chocan con más frecuencia y fuerza. Las especies químicas difunden entonces más rápido y, por lo general, el flujo de permeado aumenta.

Aun así, este beneficio hay que evaluarlo junto con otros efectos. Con temperaturas altas pueden compactarse más rápido algunas membranas poliméricas, aparecer reacciones químicas indeseadas o perder estabilidad ciertos materiales. Por eso la temperatura de operación debe mantenerse siempre dentro de lo que indica el fabricante y de lo que exige el diseño del proceso.

Desde la economía, calentar un poco el agua puede mejorar la productividad del sistema, pero si antes hay que calentar el agua que ingresa, también crece el consumo de energía. Corresponde al ingeniero pesar ambos efectos con un análisis conjunto, técnico y económico.

Experiencia del ingeniero

En muchas plantas industriales el flujo de permeado sube durante los meses cálidos, y a veces se interpreta equivocadamente como una mejora en el estado de las

membranas. Buena parte de ese aumento obedece simplemente a que el agua es menos viscosa y los coeficientes de difusión son mayores. Por eso, para evaluar el desempeño de una planta se deben usar flujos corregidos a una temperatura de referencia y no comparar directamente periodos con condiciones térmicas distintas.

En el siguiente apartado desarrollaremos la **Primera Ley de Fick**, considerada la ecuación fundamental de la difusión molecular y uno de los pilares de la transferencia de masa en Ingeniería Química. A partir de ella comenzaremos a establecer las bases matemáticas que posteriormente utilizaremos para modelar el transporte de agua y solutos a través de las membranas.

2.7 PRIMERA LEY DE FICK Y DIFUSIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

La difusión molecular constituye el mecanismo de transporte más importante cuando el movimiento de una especie química es gobernado exclusivamente por diferencias de concentración. Aunque el fenómeno fue observado experimentalmente durante el siglo XIX, fue Adolf Fick quien formuló la primera relación cuantitativa capaz de describir la velocidad de difusión en medios continuos.

La denominada **Primera Ley de Fick** establece que el flujo difusivo es directamente proporcional al gradiente de concentración e inversamente proporcional a la distancia sobre la cual ocurre dicho gradiente. En otras palabras, cuanto mayor sea la diferencia de concentración entre dos puntos, mayor será la velocidad con que las moléculas tenderán a difundirse. Del mismo modo, cuando la distancia entre ambas regiones aumenta, la difusión se vuelve más lenta debido al mayor recorrido que deben efectuar las moléculas.

Esta ley es un pilar de la Ingeniería Química, porque explica el transporte molecular en numerosas operaciones unitarias, como el secado, la extracción, la absorción, la adsorción y, muy en particular, la separación con membranas.

Físicamente, la ley de Fick es consecuencia de dos hechos: las moléculas se mueven de manera aleatoria y, según la termodinámica, cualquier sistema avanza por sí solo hacia el equilibrio.

2.7.1 FORMULACIÓN DE LA PRIMERA LEY DE FICK

Cuando el sistema es unidimensional y opera en régimen estacionario, el flujo difusivo se escribe con la relación siguiente.

Ecuación 2.11. Primera Ley de Fick

Flujo difusivo = − Coeficiente de difusión × Gradiente de concentración

Forma abreviada

$$J = - D \times (dC/dx)$$

donde

J = flujo difusivo (mol/m²·s)

D = coeficiente de difusión (m²/s)

dC/dx = gradiente de concentración (mol/m⁴)

El signo negativo posee un significado físico importante. Indica que el transporte ocurre en sentido contrario al incremento de la concentración; es decir, las moléculas se desplazan espontáneamente desde regiones más concentradas hacia regiones menos concentradas.

Interpretación física

Según la Primera Ley de Fick, tres factores principales determinan cuán rápido ocurre la difusión:

- qué tan fácilmente se mueven las moléculas dentro del medio, lo que expresa el coeficiente de difusión;
- la diferencia de concentración existente entre dos regiones;
- la distancia sobre la cual ocurre dicha diferencia.

Un gradiente elevado produce un flujo difusivo intenso, mientras que un gradiente pequeño origina una difusión lenta.

Interpretación ingenieril

Piénsese en las sales disueltas ante una membrana de ósmosis inversa: tienden de forma continua a difundir del lado de la alimentación al del permeado. Aunque la membrana opone gran resistencia, una pequeña fracción de solutos logra pasar igualmente por difusión. De ahí que ninguna membrana alcance un rechazo de 100 % y que la calidad del permeado dependa del material y también de cómo se opere el sistema.

2.7.2 FLUJO DIFUSIVO A TRAVÉS DE UNA PELÍCULA DE ESPESOR CONSTANTE

En muchas aplicaciones de ingeniería se puede suponer constante el coeficiente de difusión y lineal la variación de la concentración en una película de espesor homogéneo. Con esas condiciones, la ley de Fick toma una forma simplificada que resulta muy práctica para diseñar procesos.

Ecuación 2.12. Forma integrada de la Primera Ley de Fick

$$J = D \times (C1 - C2) / L$$

donde

J = flujo difusivo (mol/m²·s)

D = coeficiente de difusión (m²/s)

$C1$ = concentración en la región de alimentación (mol/m³)

$C2$ = concentración en la región de permeado (mol/m³)

L = espesor de la película o de la membrana (m)

Esta expresión muestra claramente la influencia de las variables de diseño.

El flujo aumenta cuando:

- aumenta el coeficiente de difusión;
- aumenta la diferencia de concentración;
- disminuye el espesor de la membrana.

Por el contrario, membranas muy gruesas ofrecen mayor resistencia al transporte molecular y producen menores flujos difusivos.

Ingeniería aplicada

Una de las metas principales al desarrollar nuevas membranas es lograr capas activas sumamente delgadas que conserven una alta selectividad. Un espesor menor reduce la resistencia al paso del agua, de modo que el flujo de permeado puede subir sin elevar la presión de operación. Pero si el espesor se reduce demasiado, se arriesgan la durabilidad y la resistencia mecánica de la membrana. El diseño actual busca justo el punto medio entre ambas exigencias.

2.7.3 HIPÓTESIS DE APLICACIÓN DE LA PRIMERA LEY DE FICK

La ley de Fick, como cualquier ecuación de ingeniería, se deduce bajo ciertas hipótesis. Para usarla directamente hay que tener en cuenta, entre otras, las condiciones siguientes:

- estado estacionario;
- difusión unidimensional;
- coeficiente de difusión constante;
- ausencia de reacciones químicas;
- medio homogéneo e isotrópico;
- temperatura uniforme.

Los procesos industriales reales no siempre cumplen estas hipótesis al pie de la letra. Aun así, la ley da una aproximación suficientemente buena para muchos problemas de ingeniería y sirve de punto de partida para modelos más complejos.

Ejemplo resuelto 2.1

Una membrana presenta un espesor de:

$$L = 2 \times 10^{-5}\ \text{m}$$

El coeficiente de difusión del soluto es:

$$D = 1{,}5 \times 10^{-9}\ \text{m}^2/\text{s}$$

La concentración del soluto es:

$C1 = 120\ \text{mol/m}^3$

$C2 = 30\ \text{mol/m}^3$

Calcular el flujo difusivo.

Solución

Aplicando la Ecuación 2.12:

$$J = D \times (C1 - C2) / L$$

Sustituyendo:

$$J = (1{,}5 \times 10^{-9}) \times (120 - 30) / (2 \times 10^{-5})$$

$$J = 6{,}75 \times 10^{-3}\ \text{mol/m}^2\cdot\text{s}$$

Interpretación del resultado

El flujo obtenido representa la cantidad de soluto que atraviesa cada metro cuadrado de membrana por segundo debido exclusivamente a la difusión molecular. Si el espesor de la membrana se redujera a la mitad, manteniendo constantes las demás variables, el flujo difusivo prácticamente se duplicaría. Este resultado explica por qué las membranas compuestas modernas emplean capas activas extremadamente delgadas para incrementar la productividad del proceso.

Tabla 2.7

Influencia de las variables sobre el flujo difusivo

Variable	Efecto sobre el flujo difusivo	Implicación para el diseño
Coeficiente de difusión	A mayor difusividad, mayor flujo	Favorecer materiales y condiciones que incrementen la movilidad molecular
Diferencia de concentración	A mayor gradiente, mayor transporte	Incrementa la fuerza impulsora, pero también la polarización por concentración
Espesor de la membrana	A mayor espesor, menor flujo	Buscar capas activas delgadas sin comprometer la resistencia mecánica
Temperatura	Generalmente incrementa el flujo	Debe respetarse el límite térmico de la membrana

Nota. Elaboración propia.

Hasta este punto hemos estudiado el transporte molecular debido exclusivamente a la difusión. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas reales de membranas el agua se encuentra en movimiento y el transporte ocurre simultáneamente por **difusión y convección**. Comprender la interacción entre ambos mecanismos será esencial para interpretar el comportamiento hidráulico de los módulos de membranas y desarrollar los modelos utilizados en ingeniería de diseño. Por esta razón, el siguiente apartado estará dedicado al estudio de la **convección y la transferencia de masa**, conceptos indispensables para analizar la polarización por concentración y el dimensionamiento de sistemas de membranas.

2.8 TRANSPORTE CONVECTIVO Y TRANSFERENCIA DE MASA

Los apartados previos trataron la difusión molecular, el mecanismo que mueve espontáneamente las especies químicas cuando hay diferencias de concentración. Pero en una instalación real el agua casi nunca está quieta: circula sin pausa por canales angostos, impulsada por bombas que aportan la energía para sostener la separación. Por eso, la materia no se transporta solo por el vaivén azaroso de las moléculas, sino también porque el fluido entero se desplaza.

Este segundo mecanismo de transporte recibe el nombre de **convección** y constituye uno de los procesos más importantes en la Ingeniería de Membranas. Mientras la difusión describe el movimiento relativo de las moléculas respecto al fluido, la convección representa el transporte asociado al movimiento del propio fluido. En consecuencia, ambas contribuciones ocurren simultáneamente y determinan el flujo total de las especies hacia la superficie de la membrana.

Al diseñar, hay que recordar que la interacción entre la difusión y la convección está detrás de fenómenos tan relevantes como el ensuciamiento de las membranas, la polarización por concentración y la caída gradual del flujo de permeado a lo largo de la operación.

2.8.1 TRANSPORTE POR CONVECCIÓN

Cuando un fluido se desplaza con una velocidad determinada, todas las especies disueltas son transportadas conjuntamente con él. Este movimiento colectivo origina un flujo de materia denominado **flujo convectivo**.

En la difusión, el transporte responde al gradiente de concentración; en la convección, en cambio, depende sobre todo de la rapidez del fluido y de cuánta especie transportada lleva.

El flujo convectivo puede expresarse mediante la siguiente relación.

Ecuación 2.13. Flujo convectivo

```
Flujo convectivo = Velocidad del fluido × Concentración
```

Forma abreviada

$$Jc = v \times C$$

donde

Jc = flujo convectivo ($mol/m^2 \cdot s$)

v = velocidad promedio del fluido (m/s)

C = concentración del soluto (mol/m^3)

La ecuación muestra que, al aumentar la velocidad del fluido, llega más materia a la membrana. Pero ese aumento también cambia el grosor de la capa límite hidrodinámica y, con ello, altera a la vez la difusión y el intercambio de masa.

Interpretación física

Por sí sola, la convección no logra separar especies químicas; solo lleva agua y solutos, sin interrupción, hasta la membrana. Ya allí, la separación queda en manos de la difusión y de la selectividad propia del material.

Interpretación ingenieril

En ósmosis inversa, subir la rapidez tangencial del agua que barre la membrana normalmente frena la acumulación de sales y atenúa la polarización por concentración. Si la velocidad es excesiva, en cambio, crecen las pérdidas de carga y el gasto de energía en bombeo. El mejor diseño es el que concilia ambos efectos.

2.8.2 FLUJO TOTAL DE MATERIA

Dentro de una membrana, el transporte total de una especie resulta de sumar el aporte difusivo y el convectivo. Esta superposición es un principio básico del intercambio de masa.

En términos generales:

Ecuación 2.14. Flujo total

```
Flujo total = Flujo convectivo + Flujo difusivo
```

Forma abreviada

$$J = Jc + Jd$$

o bien,

$$J = v \times C - D \times (dC/dx)$$

donde

J = flujo total de materia (mol/m²·s)

v = velocidad del fluido (m/s)

C = concentración (mol/m³)

D = coeficiente de difusión (m²/s)

dC/dx = gradiente de concentración (mol/m⁴)

Esta expresión es de las que más pesan en la Ingeniería de Membranas, pues reúne en una sola los dos mecanismos básicos del transporte de materia.

En regiones alejadas de la membrana, donde la velocidad del fluido es elevada, la convección suele dominar el transporte. En cambio, muy cerca de la superficie de la membrana la velocidad disminuye considerablemente debido a la condición de no

deslizamiento (*no-slip condition*), por lo que la difusión adquiere una importancia creciente.

2.8.3 LA CAPA LÍMITE HIDRODINÁMICA

Cuando un fluido circula sobre una superficie sólida, como la de una membrana, la velocidad del fluido no permanece constante en toda la sección transversal. Debido a los efectos viscosos, la velocidad disminuye progresivamente hasta hacerse prácticamente nula en la superficie de la membrana.

Como consecuencia se forma una región denominada **capa límite hidrodinámica**, dentro de la cual los gradientes de velocidad son muy elevados.

Esta capa altera de manera notable cómo se mueve la materia: los solutos tienen que cruzarla por difusión para llegar a la capa activa de la membrana. Si la capa límite es más gruesa, la resistencia sube y el flujo de materia baja.

Con esta noción se entenderán mejor, más adelante, el ensuciamiento de las membranas y la polarización por concentración.

Tabla 2.8

Comparación entre transporte difusivo y transporte convectivo

Característica	**Difusión**	**Convección**
Fuerza impulsora	Gradiente de concentración	Movimiento del fluido
Depende de la velocidad	No	Sí
Depende del coeficiente de difusión	Sí	No directamente
Ocurre con el fluido en reposo	Sí	No
Dominio principal	Escala molecular	Escala macroscópica
Importancia en membranas	Transporte de agua y solutos a través de la capa activa	Transporte de agua y solutos hacia la superficie de la membrana

Nota. Elaboración propia.

Experiencia del ingeniero

En la industria, muchas caídas de rendimiento nacen de un diseño hidráulico deficiente y no de una membrana inadecuada. Si los canales de alimentación están mal dimensionados, las velocidades tangenciales son insuficientes o el flujo se reparte de forma desigual, las capas límite engrosan y se aceleran la polarización por concentración y el fouling. Por eso el módulo debe diseñarse hidráulicamente con el mismo cuidado con que se escoge el material de la membrana.

2.9 TRANSFERENCIA DE MASA Y COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

Hasta aquí la difusión y la convección se vieron por separado, pero en una instalación real se dan al mismo tiempo y no se pueden analizar de forma aislada. El agua corre paralela a la cara de la membrana y arrastra los solutos por convección; el cruce de las especies por la capa límite y por la membrana misma, en cambio, ocurre sobre todo por difusión. El transporte de materia global queda entonces determinado por la importancia relativa de ambos mecanismos.

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Procesos, resulta poco práctico resolver simultáneamente las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento hidrodinámico y difusivo de cada sistema. Por esta razón, se introduce el concepto de **coeficiente de transferencia de masa**, parámetro que resume el efecto combinado de la difusión, la convección y la geometría del sistema.

Al diseñar equipos de separación se recurre mucho al coeficiente de transferencia de masa, porque permite estimar con qué rapidez una especie química viaja del seno del fluido a la membrana, o en sentido contrario.

En Ingeniería de Membranas este coeficiente es fundamental, ya que de él dependen cuánta polarización por concentración se genera, qué tan rápido se acumulan los solutos contra la membrana y, por tanto, el flujo máximo que se alcanza antes de que surjan incrustaciones o ensuciamiento.

2.9.1 CONCEPTO FÍSICO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

La transferencia de masa se parece a una corriente de gente que debe pasar por un pasillo estrecho. Aunque muchos quieran cruzar a la vez, la velocidad del avance la fijan el ancho del pasillo y lo fácil que sea moverse por él.

En las membranas sucede algo parecido. Las moléculas tienen que atravesar una zona pegada a la superficie, llamada capa límite de concentración, que opone una resistencia al transporte según el régimen hidrodinámico, las propiedades del fluido y la geometría del sistema.

Sin entrar a describir uno por uno estos efectos, el coeficiente resume qué tan fácil le resulta a una especie química vencer esa resistencia.

Si este coeficiente es mayor, la resistencia al transporte es menor y los solutos llegan más rápido a la cara de la membrana.

2.9.2 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA TRANSFERENCIA DE MASA

La corriente de materia que va del seno del líquido a la membrana se escribe con una relación parecida a las leyes básicas de transferencia que se usan en Ingeniería Química.

Ecuación 2.15. Flujo por transferencia de masa

$$J = k \times (Cb - Cs)$$

donde

J = flujo de materia (mol/m²·s)

k = coeficiente de transferencia de masa (m/s)

Cb = concentración en el seno del fluido (mol/m³)

Cs = concentración en la superficie de la membrana (mol/m³)

La ecuación señala que la diferencia entre la concentración en el centro de la corriente y la de la cara de la membrana determina, de forma proporcional, el flujo de materia.

Interpretación física

Si ambas concentraciones son iguales, no existe fuerza impulsora para el transporte y el flujo difusivo desaparece.

Cuando la diferencia de concentración aumenta, el flujo también aumenta.

Así, una vez más, la fuerza que mueve el proceso es el gradiente de concentración.

Interpretación ingenieril

El diseñador de una planta no puede modificar fácilmente las propiedades moleculares de un soluto, pero sí puede incrementar el coeficiente de transferencia de masa mediante un diseño hidráulico adecuado.

Entre las estrategias más utilizadas destacan:

- aumentar la velocidad tangencial del agua;
- generar mayor turbulencia;
- optimizar la geometría de los canales;

- emplear espaciadores (*feed spacers*);
- reducir zonas de flujo estancado.

Con ellas se adelgaza la capa límite y mejora el transporte de materia.

2.9.3 RESISTENCIA AL TRANSPORTE DE MASA

Una idea central de la Ingeniería Química es leer todo proceso de transporte como un juego entre fuerzas que impulsan y resistencias que frenan.

Con las membranas, la resistencia total al transporte se separa en tres aportes principales:

- resistencia de la película líquida;
- resistencia de la membrana;
- resistencia debida al ensuciamiento.

Estas resistencias actúan en serie, de forma análoga a las resistencias eléctricas de un circuito.

Como consecuencia, la resistencia total puede expresarse conceptualmente como:

Ecuación 2.16. Resistencia total

R total = R de la película + R de la membrana + R por fouling

Forma abreviada

$$Rt = Rp + Rm + Rf$$

donde

Rt = resistencia total

Rp = resistencia de la película límite

Rm = resistencia propia de la membrana

Rf = resistencia causada por el fouling

Volveremos a esta expresión en el Capítulo 11, dedicado al ensuciamiento de membranas y a las estrategias de limpieza química.

Ingeniería aplicada

En muchas plantas se trata de recuperar el flujo de permeado subiendo la presión de operación. Si la resistencia dominante es el fouling, eso solo eleva el consumo de energía sin devolver de forma apreciable la productividad. Antes de tocar las condiciones

de trabajo, hay que averiguar cuál resistencia domina en el proceso y actuar sobre esa en concreto.

2.9.4 INFLUENCIA DEL RÉGIMEN DE FLUJO

El valor del coeficiente de transferencia depende en buena medida del régimen hidrodinámico que haya en los canales por donde entra el agua.

Con flujo laminar, el transporte se da sobre todo por difusión y el espesor de la capa límite resulta bastante grande.

El movimiento caótico del fluido en régimen turbulento favorece la mezcla transversal, adelgaza la capa límite y eleva notablemente este coeficiente.

Por esa razón los módulos comerciales llevan espaciadores que provocan pequeñas perturbaciones en el flujo y así aumentan el transporte de materia sin tener que subir la presión en exceso.

Tabla 2.9

Factores que afectan el coeficiente de transferencia de masa

Variable	Efecto sobre k	Consecuencia en el proceso
Velocidad del fluido	Incrementa k	Reduce la polarización por concentración
Temperatura	Incrementa k	Aumenta la difusión molecular
Viscosidad	Disminuye k	Incrementa la resistencia al transporte
Difusividad	Incrementa k	Favorece el transporte de especies
Turbulencia	Incrementa k	Disminuye el espesor de la capa límite
Espesor de la película	Disminuye k cuando aumenta	Reduce el flujo de materia

Nota. Elaboración propia.

Ejemplo de aplicación en diseño

Imagínese un sistema de nanofiltración que ablanda agua subterránea. En las primeras semanas el flujo de permeado va bajando poco a poco, aunque la presión de alimentación no cambia. El análisis de laboratorio revela más calcio sobre la membrana.

Desde la Ingeniería de Procesos, esto apunta a una mayor resistencia de la capa límite y al inicio de la polarización por concentración. Antes de pensar en cambiar las membranas, conviene revisar la velocidad tangencial, los espaciadores, el reparto hidráulico y la eficacia del pretratamiento, pues cualquiera de ellos puede rebajar el coeficiente de transferencia y facilitar que se acumulen sales.

El ejemplo muestra que analizar el transporte de masa sirve para diagnosticar problemas tanto como calcular el flujo de permeado.

2.10 POLARIZACIÓN POR CONCENTRACIÓN

Pocos fenómenos influyen tanto en el desempeño de los procesos con membranas como la acumulación gradual de solutos junto a la superficie activa. La membrana deja pasar preferentemente el solvente, pero retiene buena parte de los solutos, que quedan en el lado de la alimentación. Por eso su concentración sube poco a poco cerca de la membrana hasta superar la que hay en el seno del fluido.

Este fenómeno recibe el nombre de **polarización por concentración** y constituye una consecuencia directa del desequilibrio entre el transporte convectivo hacia la membrana y el transporte difusivo en sentido contrario. Mientras la convección lleva continuamente nuevas especies hacia la superficie, la difusión intenta redistribuirlas nuevamente hacia el seno del fluido. Cuando ambos mecanismos alcanzan un equilibrio dinámico se establece un perfil estable de concentraciones dentro de la capa límite.

Desde una perspectiva termodinámica, la polarización por concentración representa un aumento local del potencial químico de las especies retenidas. Este incremento modifica las fuerzas impulsoras del proceso y reduce progresivamente la productividad de la membrana. Por ello, aunque no constituye un daño permanente, sí representa una limitación operacional que debe considerarse durante el diseño.

Conviene no confundir este fenómeno con el fouling. Al detenerse el flujo o cambiar el régimen hidráulico, la polarización por concentración se disipa. El fouling, en cambio, supone que materiales se depositan, física o químicamente, sobre la superficie de la membrana o dentro de ella, y generan una resistencia adicional que por lo común exige limpieza para eliminarse.

2.10.1 FORMACIÓN DE LA CAPA LÍMITE DE CONCENTRACIÓN

Mientras la membrana opera, el agua cruza la capa activa empujada por el diferencial de presión y la mayoría de los solutos queda retenida. Esa retención va acumulando especies químicas pegadas a la cara de la membrana.

En las proximidades de la membrana la velocidad del fluido disminuye considerablemente debido a los efectos viscosos. Como consecuencia, el transporte convectivo pierde eficacia y la redistribución de los solutos depende principalmente de la

difusión molecular. El resultado es la formación de una **capa límite de concentración**, donde la concentración aumenta desde el valor del seno del fluido hasta un valor máximo en la superficie de la membrana.

En el diseño, el grosor de esta capa es un parámetro crítico, pues define la resistencia adicional que enfrenta el transporte de materia y limita la rapidez con que se transfieren los solutos.

2.10.2 BALANCE DE TRANSPORTE EN LA CAPA LÍMITE

Para entender cómo se establece la polarización por concentración sirve plantear un balance de materia local. Cuando el sistema alcanza el estado estacionario, el soluto que llega a la membrana arrastrado por convección iguala al que vuelve al seno del líquido por difusión.

Cuando este equilibrio se alcanza, el perfil de concentración permanece constante, aunque el sistema continúe operando.

Esta condición puede expresarse conceptualmente mediante la siguiente igualdad.

Ecuación 2.17. Balance de transporte en la capa límite

Flujo convectivo que llega a la membrana = flujo difusivo que retorna al seno del líquido

Esta igualdad resume un principio esencial del diseño de procesos con membranas. Cuando el transporte convectivo supera con holgura al difusivo, la concentración en la superficie sigue subiendo hasta que las sales precipitan o se forman depósitos.

2.10.3 MODELO DE PELÍCULA

Uno de los modelos más utilizados para describir la polarización por concentración es el denominado **modelo de película** (*film theory*). Este modelo supone que el transporte de materia ocurre a través de una película líquida de espesor constante situada junto a la superficie de la membrana.

Esta aproximación simplifica mucho el fenómeno real, pero da resultados lo bastante exactos para una gran variedad de aplicaciones y es el cimiento de numerosos modelos que la industria emplea para diseñar.

Bajo estas hipótesis, la concentración superficial puede relacionarse con la concentración del seno del fluido mediante la siguiente expresión.

Ecuación 2.18. Modelo de película

$$Cm = Cb \times \exp (Jv / k)$$

donde

Cm = concentración en la superficie de la membrana (mol/m³)

Cb = concentración en el seno del fluido (mol/m³)

Jv = flujo volumétrico de permeado (m/s)

k = coeficiente de transferencia de masa (m/s)

exp = función exponencial

Interpretación física

Según la ecuación, la concentración en la superficie crece exponencialmente si el flujo de permeado es alto o si el coeficiente de transferencia es bajo. De ahí que los sistemas con poca velocidad tangencial o con un diseño hidráulico deficiente sean más propensos a esa polarización.

Interpretación ingenieril

La ecuación permite identificar dos estrategias de diseño para disminuir la polarización:

- reducir el flujo de operación cuando se trabaja cerca del flujo crítico;
- subir el coeficiente de transferencia con mejoras hidráulicas, por ejemplo aumentando la velocidad tangencial, optimizando los espaciadores o cambiando cómo son los canales de alimentación.

En términos generales, la segunda estrategia resulta preferible porque permite mantener una elevada producción de agua sin incrementar significativamente el riesgo de incrustación.

2.10.4 CONSECUENCIAS SOBRE EL DESEMPEÑO DE LAS MEMBRANAS

La polarización por concentración modifica simultáneamente diversos parámetros operacionales del sistema.

Primero, sube la concentración de sales pegada a la membrana, lo que eleva la presión osmótica local y recorta la fuerza motriz efectiva del proceso. El flujo de permeado cae así aunque la presión aplicada no varíe.

En segundo lugar, favorece la precipitación de compuestos poco solubles, incrementando el riesgo de incrustaciones minerales (*scaling*). Asimismo, la elevada concentración de materia orgánica y coloides en la superficie facilita la formación de depósitos y acelera el desarrollo del fouling.

Finalmente, la operación bajo condiciones severas de polarización puede aumentar el consumo energético específico, ya que el operador suele compensar la disminución del flujo incrementando la presión de alimentación, lo cual no siempre constituye la estrategia más adecuada.

Tabla 2.10

Efectos de la polarización por concentración sobre la operación de membranas

Efecto observado	Consecuencia operacional	Implicación para el diseño
Incremento de la concentración superficial	Aumento de la presión osmótica	Reducción de la fuerza impulsora efectiva
Disminución del flujo de permeado	Menor productividad	Incremento del área de membrana requerida
Mayor riesgo de precipitación	Formación de incrustaciones	Necesidad de pretratamiento y control químico
Mayor acumulación de materia orgánica	Desarrollo de fouling	Incremento de la frecuencia de limpieza
Aumento del consumo energético	Mayor costo operativo	Optimización hidráulica y selección adecuada del flujo de diseño

Nota. Elaboración propia.

Experiencia del ingeniero

En proyectos industriales es frecuente que una planta alcance inicialmente el flujo de diseño, pero que dicho flujo disminuya durante las primeras horas de operación continua. Este comportamiento no implica necesariamente un deterioro de la membrana. En muchos casos corresponde al establecimiento del régimen de polarización por concentración, que modifica las condiciones locales de transporte hasta alcanzar un nuevo estado estacionario. Un buen diseño hidráulico busca minimizar este efecto mediante una adecuada distribución del flujo, velocidades tangenciales apropiadas y un pretratamiento eficiente.

2.11 FLUJO CRÍTICO Y CONTROL DE LA POLARIZACIÓN POR CONCENTRACIÓN

Cuánto produce una planta con membranas depende directamente del flujo de permeado que logra durante su operación. Cabría pensar que la vía más sencilla para producir más es elevar indefinidamente la presión de alimentación, pero la experiencia industrial muestra límites claros en ese camino. Pasado cierto valor de flujo, los solutos se acumulan mucho más contra la membrana, se forman depósitos y el equipo se ensucia más rápido.

Como consecuencia, existe un intervalo de operación dentro del cual la membrana puede funcionar de manera estable durante largos periodos de tiempo y otro intervalo en el que el deterioro del rendimiento ocurre rápidamente. La frontera entre ambos regímenes se conoce como **flujo crítico** (*critical flux*).

Se introdujo la noción de flujo crítico para describir la condición de operación desde la cual los depósitos de partículas dejan de ser del todo reversibles y comienzan a desarrollarse mecanismos de fouling que ya son permanentes. Hoy es un criterio básico para diseñar y optimizar sistemas de membranas en el tratamiento de agua y de aguas residuales.

2.11.1 DEFINICIÓN DE FLUJO CRÍTICO

Se define el flujo crítico como el mayor caudal de permeado por unidad de área que se puede sostener por un periodo largo sin que el material se acumule de manera irreversible en la cara de la membrana.

Con un flujo menor al crítico, la polarización por concentración se mantiene casi estable y la mayoría de los depósitos sale arrastrada por la corriente tangencial o con un retrolavado sencillo.

Si el flujo pasa del valor crítico, los solutos llegan a la membrana más rápido de lo que el sistema puede devolverlos al seno del fluido. Empiezan entonces a formarse capas de depósitos que requieren limpiezas químicas con frecuencia creciente.

En la operación, pasar del flujo crítico suele significar una productividad que decae poco a poco, más gasto de energía y una vida útil más corta de las membranas.

2.11.2 FACTORES QUE DETERMINAN EL FLUJO CRÍTICO

El flujo crítico no es una propiedad propia de la membrana: varía con las características del agua que ingresa, con el diseño hidráulico del módulo y con las condiciones de operación a la vez.

Los factores de mayor peso son la velocidad tangencial del flujo, la temperatura de operación, la viscosidad del agua, la materia orgánica presente, los sólidos suspendidos y el tamaño de las partículas.

También cuenta la química de la cara externa de la membrana. Con aguas ricas en materia orgánica, las membranas hidrofílicas suelen ensuciarse menos que las hidrofóbicas.

Desde una perspectiva de diseño, el flujo crítico debe determinarse experimentalmente para cada aplicación específica, ya que dos aguas con composiciones aparentemente similares pueden presentar comportamientos muy diferentes frente al ensuciamiento.

2.11.3 ESTRATEGIAS PARA OPERAR POR DEBAJO DEL FLUJO CRÍTICO

El objetivo del diseño hidráulico consiste en mantener la operación dentro de un régimen donde la polarización por concentración sea controlable y el fouling irreversible permanezca reducido.

Las medidas que más se aplican para controlarlo son subir la velocidad tangencial, mejorar los espaciadores de alimentación, eliminar las zonas donde el flujo se estanca, programar retrolavados periódicos y sumar etapas de pretratamiento que bajen la carga de sólidos y de materia orgánica.

Estas medidas no eliminan completamente la polarización por concentración, pero permiten retrasar significativamente la aparición del fouling y prolongar la estabilidad operacional del sistema.

En términos económicos, conviene operar algo por debajo del flujo crítico: se obtiene casi toda la producción de agua posible y los gastos en limpieza y reposición de membranas se mantienen bajos.

2.11.4 COMPROMISO ENTRE PRODUCTIVIDAD Y ESTABILIDAD OPERACIONAL

Un principio central de la Ingeniería de Membranas es aceptar que el flujo máximo que la técnica permite no siempre es el que resulta más rentable.

Subir la presión de operación puede elevar al inicio el flujo de permeado. Pero si esa mayor presión acelera la formación de depósitos, la ganancia se pierde pronto, porque crecen los costos de energía, de limpiezas químicas, de reemplazo de membranas y de paradas de planta.

Por eso, antes de fijar las condiciones finales de diseño, el ingeniero tiene que evaluar a la vez la hidráulica, la calidad del agua, cómo avanza el fouling y cuánto cuesta operar.

La optimización de un sistema de membranas constituye, en esencia, un problema de equilibrio entre productividad, estabilidad operacional y sostenibilidad económica.

Tabla 2.11

Variables que influyen sobre el flujo crítico

Variable	**Tendencia del flujo crítico**	**Comentario ingenieril**
Velocidad tangencial	Aumenta	Favorece la transferencia de masa y reduce la polarización por concentración
Concentración de sólidos suspendidos	Disminuye	Incrementa la probabilidad de formación de depósitos
Materia orgánica natural	Disminuye	Favorece el fouling orgánico y el bloqueo de poros
Temperatura	Generalmente aumenta	Baja la viscosidad y sube la difusividad, siempre dentro del rango que tolera la membrana
Viscosidad del agua	Disminuye el flujo crítico	Incrementa la resistencia hidráulica y reduce el transporte de masa
Calidad del pretratamiento	Aumenta	Menos partículas llegan a la membrana, y eso la hace durar más

Nota. Elaboración propia.

Ejemplo de aplicación al diseño

Imaginemos una planta de ultrafiltración que produce agua para consumo humano desde una fuente superficial con fuerte variación estacional. En la temporada de lluvias suben los sólidos suspendidos y la materia orgánica, y el flujo crítico resulta menor que el observado en la época seca.

Si el sistema continúa operando con el mismo flujo de diseño establecido para la estación seca, la velocidad de acumulación de depósitos aumentará considerablemente, reduciendo la productividad y elevando la frecuencia de las limpiezas químicas. Una estrategia de operación más eficiente consiste en ajustar temporalmente el flujo de permeado y reforzar el pretratamiento durante los periodos de mayor carga contaminante.

El caso deja una enseñanza: elegir el equipo no cierra el trabajo de diseño. Quien opera la planta debe ir adaptándola a cada cambio del agua que llega, buscando que producción, gasto de energía y duración de las membranas queden balanceados.

Reflexión ingenieril

Un operador y un ingeniero se diferencian en cómo leen la caída del flujo de permeado. Ante ella, el operador suele subir la presión de alimentación para recobrar producción. El ingeniero, antes de tocar nada, busca la causa: puede ser polarización por concentración, fouling, scaling o simplemente un agua distinta. Con ese diagnóstico elige la salida más conveniente técnica y económicamente. Formar esa habilidad de diagnóstico es uno de los propósitos de este libro.

2.12 MODELO SOLUCIÓN–DIFUSIÓN

Las membranas utilizadas en microfiltración y ultrafiltración separan principalmente por mecanismos de exclusión de tamaño, donde los poros actúan como barreras físicas que retienen partículas mayores que su diámetro efectivo. Sin embargo, este mecanismo resulta insuficiente para explicar el comportamiento de las membranas densas empleadas en nanofiltración y ósmosis inversa, cuyos poros son inexistentes o de dimensiones comparables al tamaño molecular.

Para describir el transporte en este tipo de membranas se desarrolló el **modelo solución–difusión**, actualmente aceptado como el marco teórico más importante para explicar el funcionamiento de las membranas compuestas de película delgada (*Thin Film Composite, TFC*). Según este modelo, el transporte no ocurre mediante el paso de las moléculas a través de canales abiertos, sino a través de tres etapas consecutivas: disolución del componente en la membrana, difusión a través de la matriz polimérica y desorción hacia el lado del permeado.

Bajo este enfoque, ya no se trata de un tamiz molecular simple. La membrana pasa a ser un medio selectivo, y su estructura química gobierna con qué rapidez viaja cada

especie. Que una molécula pase o no depende de cuánta afinidad tenga con el material y de qué tan libremente se mueva en la fase polimérica.

Este enfoque explica por qué dos moléculas de tamaño similar pueden presentar comportamientos de separación muy diferentes cuando interactúan con una misma membrana.

2.12.1 ETAPAS DEL TRANSPORTE MEDIANTE SOLUCIÓN–DIFUSIÓN

El modelo considera tres etapas fundamentales.

El primer paso ocurre en la interfaz: las moléculas que vienen en la solución de alimentación llegan hasta la membrana y se reparten, según el equilibrio termodinámico, entre el líquido y el polímero. Ese reparto lo gobierna cuánto se atraen soluto y material.

A continuación, el gradiente de potencial químico empuja a las moléculas que penetraron en el polímero, y estas lo cruzan por difusión. La rapidez de este paso la fijan el coeficiente de difusión efectivo y el grosor de la capa activa.

En la última etapa, las moléculas arriban a la cara opuesta, dejan el polímero y se suman al permeado.

La resistencia total al transporte es la suma de lo que aportan estas tres etapas.

Interpretación ingenieril

De este modelo se concluye que una membrana moderna no se diseña solo regulando el diámetro de poro. Se debe optimizar también la composición química del polímero, su grado de reticulación, su hidrofilicidad, su carga superficial y el grosor de la capa activa. Cada uno de esos factores cambia cuánto se disuelven y cuán rápido difunden las especies transportadas.

2.12.2 PERMEABILIDAD DE LA MEMBRANA

Uno de los parámetros más importantes en Ingeniería de Membranas es la **permeabilidad**, que representa la capacidad del material para permitir el paso de una determinada especie.

Según el modelo solución–difusión, multiplicar el coeficiente de difusión por el de solubilidad da como resultado la permeabilidad.

Ecuación 2.19. Permeabilidad

$$\text{Permeabilidad} = \text{Difusividad} \times \text{Solubilidad}$$

Forma abreviada

$$P = D \times S$$

donde

P = permeabilidad

D = coeficiente de difusión

S = coeficiente de solubilidad

Esta relación muestra que una elevada permeabilidad puede deberse a una rápida difusión, a una elevada afinidad química entre la membrana y la especie transportada o a la combinación de ambos efectos.

En el desarrollo de materiales, lograr a la vez más permeabilidad y más selectividad es hoy uno de los grandes retos de la investigación.

2.12.3 TRANSPORTE DE AGUA

Con ósmosis inversa, el caudal de agua por unidad de área se calcula con una relación lineal: la permeabilidad hidráulica multiplica a la fuerza impulsora efectiva.

Ecuación 2.20. Flujo de agua

$$Jw = A \times (\Delta P - \Delta \pi)$$

donde

Jw = flujo de agua ($m^3/m^2 \cdot s$)

A = permeabilidad hidráulica de la membrana

ΔP = diferencia de presión aplicada

$\Delta \pi$ = diferencia de presión osmótica

Es una de las ecuaciones básicas para diseñar sistemas de ósmosis inversa.

Conviene entender bien su significado físico. El agua cruza la membrana solo cuando la presión aplicada es mayor que la diferencia de presión osmótica entre los dos lados del sistema. Si ambas se igualan, el flujo neto desaparece.

Esto trae una consecuencia directa al dimensionar: el agua que ingresa impone, mediante su presión osmótica, un límite inferior a la energía que puede consumir una planta de ósmosis inversa.

2.12.4 TRANSPORTE DE SOLUTOS

Un mecanismo sobre todo difusivo describe el paso de solutos por una membrana densa.

En su forma simplificada, el flujo de soluto puede expresarse como:

Ecuación 2.21. Flujo de soluto

$$Js = B \times (Cm - Cp)$$

donde

Js = flujo de soluto

B = coeficiente de permeabilidad del soluto

Cm = concentración en la superficie de la membrana

Cp = concentración del permeado

Según la ecuación, cuántas sales se transfieren lo determinan el gradiente de concentración y la permeabilidad particular de cada especie.

En consecuencia, dos sales diferentes pueden presentar rechazos muy distintos aun cuando posean concentraciones similares.

2.12.5 SELECTIVIDAD DE LA MEMBRANA

Una membrana busca dejar pasar mucha agua y, al mismo tiempo, frenar a los solutos.

Este comportamiento se evalúa mediante el concepto de **selectividad**, estrechamente relacionado con el rechazo observado experimentalmente.

En términos cualitativos, una membrana ideal debería combinar:

- elevada permeabilidad al agua;
- baja permeabilidad a las sales;
- elevada estabilidad química;
- resistencia mecánica;
- baja tendencia al fouling;
- larga vida útil.

En la práctica, estas propiedades suelen presentar relaciones de compromiso. Incrementar la permeabilidad frecuentemente reduce la selectividad y viceversa. Este fenómeno, conocido como **trade-off permeabilidad–selectividad**, constituye una de las principales limitaciones en el desarrollo de nuevos materiales.

Tabla 2.12

Parámetros fundamentales del modelo solución–difusión

Parámetro	Significado físico	Importancia en el diseño
Difusividad (D)	Movilidad de las moléculas dentro de la membrana	Controla la velocidad de transporte
Solubilidad (S)	Afinidad entre el polímero y la especie química	Determina la cantidad de moléculas que ingresan a la membrana
Permeabilidad (P)	Capacidad global de transporte	Define la productividad del material
Permeabilidad hidráulica (A)	Transporte de agua	Influye en el flujo de permeado
Permeabilidad del soluto (B)	Transporte de sales	Determina el rechazo y la calidad del permeado

Nota. Elaboración propia.

Experiencia del ingeniero

En la selección de membranas comerciales es frecuente centrar la atención únicamente en el porcentaje de rechazo de sales. Sin embargo, dos membranas con un rechazo prácticamente idéntico pueden presentar comportamientos muy diferentes debido a sus distintas permeabilidades hidráulicas. Una membrana con mayor permeabilidad puede producir el mismo caudal de agua operando a menor presión, reduciendo el consumo energético y los costos de operación durante toda la vida útil de la planta. Por ello, la evaluación de una membrana debe considerar simultáneamente **productividad, selectividad y eficiencia energética**, y no un único parámetro.

2.13 PRESIÓN OSMÓTICA Y FUNDAMENTO TERMODINÁMICO DE LA ÓSMOSIS INVERSA

Hasta aquí estudiamos cómo se transporta la materia por difusión, convección y transferencia de masa. Pero esos enfoques no bastan para dar cuenta de la ósmosis inversa, pues allí el agua se mueve siguiendo principios termodinámicos del potencial químico del solvente.

La presencia de solutos disueltos modifica la energía libre del agua y genera una tendencia natural al establecimiento del equilibrio entre soluciones de diferente concentración. Cuando dos soluciones están separadas por una membrana semipermeable que permite únicamente el paso del agua, el solvente migra espontáneamente desde la solución menos concentrada hacia la más concentrada. Este fenómeno recibe el nombre de **ósmosis** y constituye uno de los procesos naturales más importantes en sistemas biológicos e industriales.

Desde una perspectiva energética, el movimiento del agua continúa hasta que la diferencia de potencial químico queda compensada por una diferencia de presión

hidrostática. La presión necesaria para detener completamente este flujo espontáneo se denomina **presión osmótica**.

Por lo tanto, la membrana no tiene presión osmótica propia. Es la solución la que la posee, como propiedad termodinámica, y su valor sube con la suma de las especies disueltas y con la temperatura, además de variar con cuánto se disocian los solutos.

En Ingeniería del Agua, este concepto posee una importancia fundamental porque determina la presión mínima que debe aplicarse para producir agua mediante ósmosis inversa.

2.13.1 INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LA PRESIÓN OSMÓTICA

Puede interpretarse la presión osmótica como una presión "opuesta" al transporte del agua. Mientras la bomba impulsa el agua hacia la membrana mediante presión hidráulica, la diferencia de concentración genera una fuerza termodinámica que favorece el movimiento del agua en sentido contrario.

Dicho de otra forma, no habrá permeado en una planta de ósmosis inversa mientras la presión aplicada no supere la osmótica de la solución que entra.

Así se entiende por qué desalinizar agua de mar exige presiones bastante más altas que tratar agua salobre. Aunque la membrana sea la misma, el agua de mar tiene más sales y, en consecuencia, una presión osmótica mucho mayor.

2.13.2 ECUACIÓN DE VAN'T HOFF

Cuando la solución es diluida, Jacobus Henricus van't Hoff propuso una ecuación para estimar la presión osmótica, y se la tiene por el equivalente termodinámico de la ley de los gases ideales.

Ecuación 2.22. Presión osmótica

$$\pi = i \times C \times R \times T$$

donde

π = presión osmótica (Pa)

i = factor de Van't Hoff

C = concentración molar (mol/m³)

R = constante universal de los gases

R = 8,314 J/mol·K

T = temperatura absoluta (K)

La ecuación indica que la presión osmótica crece si suben la temperatura o la concentración de solutos.

Para soluciones concentradas, como el agua de mar, la ecuación de Van't Hoff proporciona una primera aproximación. En el diseño industrial suelen emplearse modelos termodinámicos más avanzados que consideran la actividad de los iones y las desviaciones del comportamiento ideal.

Interpretación ingenieril

La ecuación permite estimar rápidamente la presión mínima que deberá vencer una planta de ósmosis inversa. Sin embargo, el ingeniero debe recordar que la presión real de operación siempre será superior debido a las pérdidas de carga, la polarización por concentración y las limitaciones propias de la membrana.

2.13.3 RELACIÓN ENTRE PRESIÓN OSMÓTICA Y PRESIÓN DE OPERACIÓN

Lo que mueve el agua no es únicamente la presión de la bomba. La fuerza impulsora efectiva resulta de restar la presión osmótica a la hidráulica.

Por tanto, el caudal de agua responde a la presión neta que queda disponible.

Ecuación 2.23. Presión efectiva

```
Presión efectiva = Presión aplicada − Presión osmótica
```

Forma abreviada

$$\Delta Pe = \Delta P - \Delta \pi$$

donde

ΔPe = presión efectiva

ΔP = presión hidráulica aplicada

$\Delta \pi$ = diferencia de presión osmótica

Con ella se resume un pilar del dimensionamiento de sistemas de ósmosis inversa.

Si se aplica menos presión que la osmótica, casi no se mueve agua. Con presiones iguales se llega al equilibrio osmótico. Recién cuando la presión hidráulica gana a la osmótica aparece el flujo de permeado propio de la ósmosis inversa.

2.13.4 VALORES TÍPICOS DE PRESIÓN OSMÓTICA

El valor de la presión osmótica cambia mucho de acuerdo con la composición del agua.

Tabla 2.13

Presión osmótica aproximada para diferentes tipos de agua

Tipo de agua	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Presión osmótica aproximada (bar)	Aplicaciones
Agua potable	Menor de 500	Menor de 0,4	Abastecimiento urbano
Agua superficial	500 – 2 000	0,4 – 1,5	Tratamiento convencional
Agua salobre	2 000 – 10 000	1,5 – 8	Nanofiltración y ósmosis inversa
Agua de mar	35 000	25 – 28	Desalinización
Salmueras industriales	Mayor de 50 000	Mayor de 40	Concentración y recuperación de recursos

Nota. Valores orientativos utilizados para estudios preliminares. En el diseño definitivo deben calcularse considerando la composición iónica completa y la temperatura de operación.

Aplicación al diseño de plantas de ósmosis inversa

Supongamos una planta que va a tratar agua de mar con una presión osmótica de unos 27 bar.

Termodinámicamente, aplicar justo 27 bar no genera flujo neto de agua. Hay que trabajar por encima de ese valor para compensar las pérdidas hidráulicas y dar la fuerza impulsora necesaria.

Las plantas de agua de mar que hoy se construyen trabajan normalmente en un intervalo de 55 a 70 bar. El valor concreto depende de la salinidad, de la recuperación del sistema, de la temperatura del agua y de las membranas instaladas.

Queda claro que la presión de operación no puede elegirse de manera arbitraria. Se obtiene evaluando juntos la presión osmótica, la recuperación que se quiere, la energía consumida y la productividad.

Experiencia del ingeniero

En los proyectos preliminares se comete seguido este error: calcular la presión de operación con los catálogos de membranas y nada más. La presión óptima, sin embargo, varía con la composición exacta del agua que entra, con la recuperación elegida y con la hidráulica del sistema. Con una membrana idéntica, dos plantas pueden pedir presiones distintas si sus aguas no se parecen. Calcular la presión osmótica es, pues, un paso que no se puede saltar antes de dimensionar un sistema de ósmosis inversa.

2.14 BALANCES DE MATERIA APLICADOS A PROCESOS DE MEMBRANAS

Un diseño de separación empieza siempre por exigir que se conserve la materia, y eso se aplica con todo rigor. Aunque cambien la membrana o la complejidad del sistema, la planta cumple un balance de masa total y, aparte, uno por cada componente que trae la alimentación.

Los balances de materia son la herramienta principal en Ingeniería del Agua. Permiten hallar los caudales de permeado, concentrado y alimentación, estimar la recuperación, evaluar el rechazo de solutos y calcular la cantidad de módulos con la que se alcanza cierta producción de agua.

Aunque los programas de simulación realizan estos cálculos automáticamente, el ingeniero debe comprender los principios físicos que los sustentan. De esta manera podrá verificar los resultados obtenidos, identificar inconsistencias y evaluar alternativas de diseño antes de recurrir a herramientas computacionales.

El enfoque recomendable al desarrollar un sistema de membranas es gradual. Primero se plantea un balance simple de materia; luego se le suman los efectos del fouling, de la polarización por concentración, de las pérdidas hidráulicas y de la presión osmótica.

2.14.1 BALANCE GLOBAL DE MATERIA

En régimen estacionario, y si no hay reacciones químicas ni acumulación, toda la masa que entra al sistema tiene que salir de él.

Esta condición puede expresarse como:

Ecuación 2.24. Balance global de materia

Caudal de alimentación = Caudal de permeado + Caudal de concentrado

Forma abreviada

$$Qf = Qp + Qc$$

donde

Qf = caudal de alimentación

Qp = caudal de permeado

Qc = caudal de concentrado

Es la primera relación que se debe comprobar al diseñar cualquier sistema de membranas.

Interpretación ingenieril

Basta conocer la alimentación y el permeado producido para que el balance global entregue el caudal de concentrado de inmediato. Además, de él se parte para calcular la recuperación y para dimensionar tuberías, bombas y módulos desde el punto de vista hidráulico.

2.14.2 BALANCE DE UN COMPONENTE

Además del balance total, hay que revisar el comportamiento de cada soluto presente en el agua.

Para una especie determinada, el balance puede expresarse como:

Ecuación 2.25. Balance de un componente

$$Qf \times Cf = Qp \times Cp + Qc \times Cc$$

donde

Cf = concentración del componente en la alimentación

Cp = concentración en el permeado

Cc = concentración en el concentrado

Estamos ante el principio de conservación escrito para una especie química. Con él se calculan cuánta sal se rechaza, qué composición tiene el concentrado y cómo cambia la calidad del agua a medida que transcurre el proceso.

Interpretación física

El soluto que entra con la alimentación se reparte entre permeado y concentrado. Ninguna especie se pierde en el proceso; solo cambia de corriente.

2.14.3 RECUPERACIÓN DEL SISTEMA

La recuperación figura entre los parámetros más relevantes de la Ingeniería de Membranas, pues indica qué fracción del agua de alimentación termina como permeado.

La recuperación puede calcularse mediante:

Ecuación 2.26. Recuperación

Recuperación = Caudal de permeado / Caudal de alimentación

Forma abreviada

$$R = Qp / Qf$$

Cuando se expresa en porcentaje:

$$R\ (\%) = (Qp / Qf) \times 100$$

Interpretación ingenieril

Recuperar mucho significa aprovechar más agua y producir menos concentrado. Pero el lado de la alimentación se enriquece en sales, con lo cual crecen la presión osmótica y el peligro de incrustaciones.

Por eso no tiene sentido llevar la recuperación al máximo sin criterio. El valor óptimo se define según la calidad del agua, el tipo de membrana, el potencial de ensuciamiento y el análisis económico del sistema.

2.14.4 RECHAZO DE SOLUTOS

Para medir qué tan bien separa una membrana se usa el rechazo observado de cada especie química.

El rechazo expresa en qué medida la membrana impide que un soluto determinado llegue al permeado.

Ecuación 2.27. Rechazo

Rechazo = (Concentración de alimentación − Concentración del permeado) / Concentración de alimentación

Forma abreviada

$$Rj = (Cf - Cp) / Cf$$

Expresado como porcentaje:

$$Rj\ (\%) = [(Cf - Cp) / Cf] \times 100$$

Interpretación física

Un permeado con concentración mínima frente a la alimentación da un rechazo cercano al 100 %. Cuando las dos concentraciones casi coinciden, esa membrana prácticamente no separa el componente.

Interpretación ingenieril

Conviene no confundir dos conceptos: el rechazo intrínseco, propio de la membrana, y el que realmente se observa en la planta. Este segundo valor se ve afectado

por la temperatura, la hidráulica de operación, el fouling y la polarización por concentración.

2.14.5 FACTOR DE CONCENTRACIÓN

Los solutos que la membrana retiene no se van con el agua que pasa; se quedan en la corriente de alimentación, y por eso el concentrado se va volviendo cada vez más concentrado.

Una medida sencilla de este fenómeno es el factor de concentración.

Ecuación 2.28. Factor de concentración

$$FC = Cc / Cf$$

donde

FC = factor de concentración

Cc = concentración del concentrado

Cf = concentración de alimentación

Sirve este parámetro para calcular el peligro de que precipiten sales poco solubles y para decidir si se añaden antincrustantes o más etapas de pretratamiento.

Ejemplo resuelto 2.2

Una planta de nanofiltración trata un caudal de alimentación de **100 m³/h**. El caudal de permeado producido es de **75 m³/h**. La concentración de sulfatos en el agua de alimentación es de **1 200 mg/L**, mientras que en el permeado es de **60 mg/L**.

Determinar:

- el caudal de concentrado;
- la recuperación del sistema;
- el rechazo observado para los sulfatos.

Solución

Paso 1. Balance global

Aplicando la Ecuación 2.24:

$$Qc = Qf - Qp$$

$$Qc = 100 - 75$$

$$Qc = 25\ m^3/h$$

Paso 2. Recuperación

Aplicando la Ecuación 2.26:

$$R = 75 / 100$$

$$R = 0{,}75$$

Recuperación = 75 %

Paso 3. Rechazo

Aplicando la Ecuación 2.27:

$$Rj = (1200 - 60) / 1200$$

$$Rj = 0{,}95$$

Rechazo = 95 %

Interpretación del ejemplo

Un 75 % del agua alimentada sale convertida en permeado, mientras que el 25 % restante termina como rechazo. El rechazo alto de sulfatos confirma que la membrana se comporta bien con ese ion. Pero hay una advertencia: el concentrado se irá cargando de sales, con más presión osmótica y mayor riesgo de incrustaciones, y eso limita la recuperación máxima que se pueda admitir en el diseño.

Tabla 2.14

Parámetros fundamentales de diseño en sistemas de membranas

Parámetro	Símbolo	Aplicación en ingeniería
Caudal de alimentación	Qf	Dimensionamiento hidráulico
Caudal de permeado	Qp	Producción de agua
Caudal de concentrado	Qc	Gestión del rechazo
Recuperación	R	Aprovechamiento del recurso hídrico
Rechazo	Rj	Calidad del permeado
Factor de concentración	FC	Evaluación del riesgo de incrustaciones

Nota. Elaboración propia.

2.15 DISEÑO CONCEPTUAL DE SISTEMAS DE MEMBRANAS

Un sistema de membranas se diseña por iteraciones, y en ese proceso se articulan criterios económicos de la Ingeniería de Procesos, la termodinámica de soluciones, los fenómenos de transporte y la conservación de la materia. El software especializado simula casos complejos, aunque primero el ingeniero tiene que poder plantear por sí mismo un diseño conceptual que se apoye en balances de masa y en relaciones elementales.

Con el diseño conceptual se da el primer paso hacia el dimensionamiento de la planta. Su meta es comprobar si el proceso es técnicamente viable, calcular las etapas necesarias, establecer los caudales principales y escoger, de forma tentativa, la tecnología de membranas apropiada para el agua de alimentación disponible.

El diseño detallado fija las dimensiones precisas de cada equipo; el conceptual no tiene esa pretensión. Lo suyo es plantear la arquitectura general y revisar que la propuesta sea consistente con la calidad de agua exigida, la recuperación, el consumo energético y los costos de operación.

El procedimiento de diseño en Ingeniería del Agua admite un ordenamiento secuencial que facilita decidir en cada paso, y va desde caracterizar el agua hasta elegir de manera preliminar los módulos de membranas.

2.15.1 ETAPAS DEL DISEÑO CONCEPTUAL

Todo proyecto con membranas empieza por conocer bien el agua de alimentación. En esa etapa se evalúan los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos que afectan a la membrana, y gracias a ellos se reconoce cómo se ensuciará y se incrustará.

Importan sobre todo la dureza, la alcalinidad, la turbidez, los sólidos disueltos totales, la materia orgánica natural, el pH, la temperatura, la composición iónica y el SDI (índice de densidad de sedimentos). Con esa información se define cuál pretratamiento usar y se obtiene la presión osmótica esperada del sistema.

Una vez caracterizada el agua, se establecen los objetivos de diseño. En esta etapa se define la calidad requerida para el permeado, el caudal de producción, la recuperación esperada y las restricciones económicas o ambientales asociadas al proyecto.

En seguida se elige la tecnología de membranas. Para ello se pesan al mismo tiempo el tamaño de lo que debe separarse, la calidad del agua que entra, la recuperación pedida y la energía que se espera gastar.

Con la tecnología ya elegida, se plantean los balances de materia. De ellos salen los caudales de permeado, concentrado y alimentación, además de una presión de operación preliminar. Por último se hace un primer cálculo del número de módulos que cubren la producción especificada.

2.15.2 VARIABLES FUNDAMENTALES DE DISEÑO

Para un dimensionamiento preliminar es necesario saber qué variables rigen el sistema. Se reúnen en cuatro categorías: el agua de alimentación y sus propiedades, la hidráulica, la membrana y las condiciones en que se opera.

Del agua depende cuánta presión osmótica habrá, qué potencial de incrustación existe y qué pretratamiento corresponde. La hidráulica determina las pérdidas de carga, el régimen de flujo y la forma en que el agua se distribuye en los módulos. A la membrana le pertenecen su permeabilidad, su rechazo y su resistencia al ensuciamiento. Y al operar se decide hasta dónde ceder entre productividad, recuperación y energía.

Un buen diseño requiere analizar todas estas variables en conjunto, pues el cambio en una de ellas afecta el comportamiento de todo el sistema.

Tabla 2.15

Variables fundamentales para el diseño de sistemas de membranas

Grupo de variables	Parámetros principales	Influencia sobre el diseño
Calidad del agua	SDT, dureza, pH, alcalinidad, SDI, turbidez, materia orgánica	Selección del pretratamiento y evaluación del riesgo de fouling y scaling
Variables hidráulicas	Caudal, presión, velocidad tangencial, pérdidas de carga	Determinación del flujo de permeado y consumo energético
Membrana	Permeabilidad, rechazo, material, configuración del módulo	Productividad y calidad del permeado
Condiciones de operación	Recuperación, temperatura, presión de trabajo	Estabilidad operacional y costos de operación

Nota. Elaboración propia.

2.15.3 METODOLOGÍA GENERAL DE CÁLCULO

Desde la mirada del ingeniero, el diseño preliminar se desarrolla con una secuencia ordenada de cálculos.

Lo primero es fijar el caudal de permeado que exige el proceso.

Enseguida se escoge una recuperación preliminar, tomando como guía las características del agua que entra.

Con esos datos, el balance global de materia da el caudal de alimentación.

Después, con la presión osmótica del agua estimada, se fija una presión de operación que sea compatible con la membrana elegida.

Con el flujo de diseño que da el fabricante, ya se puede obtener el área total necesaria.

Ecuación 2.29. Área total de membranas

```
Área total = Caudal de permeado / Flujo de diseño
```

Forma abreviada

$$At = Qp / J$$

donde

At = área total de membranas (m^2)

Qp = caudal de permeado (m^3/h)

J = flujo de diseño ($m^3/m^2 \cdot h$)

Finalmente, el número preliminar de módulos puede estimarse mediante la relación:

Ecuación 2.30. Número de módulos

```
Número de módulos = Área total requerida / Área efectiva por módulo
```

Forma abreviada

$$Nm = At / Am$$

donde

Nm = número de módulos

Am = área efectiva de un módulo comercial

Estas ecuaciones constituyen la base del dimensionamiento preliminar y serán utilizadas repetidamente en los capítulos posteriores.

2.15.4 CASO DE ESTUDIO INTRODUCTORIO

Se requiere diseñar conceptualmente un sistema de nanofiltración para producir **150 m³/h** de agua destinada al abastecimiento de una industria alimentaria. El agua de alimentación presenta una concentración de sólidos disueltos de **3 500 mg/L**, una dureza elevada y un índice SDI aceptable para operación con membranas. Se propone una recuperación inicial del **80 %**.

El primer paso consiste en calcular el caudal de alimentación.

Aplicando la Ecuación 2.26:

$$Qf = Qp / R$$

Sustituyendo:

$$Qf = 150 / 0{,}80$$

$$Qf = 187{,}5\ m^3/h$$

El caudal de concentrado será:

$$Qc = 187{,}5 - 150$$

$$Qc = 37{,}5\ m^3/h$$

Suponiendo un flujo de diseño de **20 L/m²·h**, equivalente a **0,020 m³/m²·h**, el área total requerida será:

$$At = 150 / 0{,}020$$

$$At = 7\ 500\ m^2$$

Si cada módulo comercial posee un área efectiva de **37 m²**, el número preliminar de módulos será:

$$Nm = 7500 / 37$$

$$Nm = 203\ módulos$$

Este resultado representa únicamente una primera aproximación. En un proyecto real deberán incorporarse factores de ensuciamiento, márgenes de seguridad, limitaciones hidráulicas, configuración por etapas, recirculación de concentrado y estrategias de operación.

Reflexión ingenieril

Tomar un equipo del catálogo no es diseñar un sistema de membranas. Para diseñar hay que comprender cómo se afectan mutuamente la hidráulica, la termodinámica, el costo del proceso, el transporte y la calidad del agua. Con los datos analíticos disponibles, el ingeniero debe construir una solución que funcione técnicamente, ahorre energía y se sostenga en lo económico. Esa habilidad de integrar es una de las que este libro quiere desarrollar.

2.16 CRITERIOS DE INGENIERÍA

Habiendo expuesto las bases científicas del transporte de materia y de la termodinámica aplicada a las membranas, es hora de condensar los criterios que deberían orientar el diseño y la operación. Lo que sigue no son reglas absolutas. Son recomendaciones nacidas de la experiencia con plantas industriales.

Criterio 1

Nunca seleccionar una tecnología de membranas sin realizar previamente una caracterización completa del agua de alimentación.

La composición química del agua determina la presión osmótica, el potencial de incrustación, el riesgo de fouling y el tipo de pretratamiento requerido. Una caracterización incompleta conduce frecuentemente a errores de diseño y a elevados costos de operación.

Criterio 2

El diseño comienza con los balances de materia, no con la selección de la membrana.

El ingeniero necesita conocer, antes de abrir los catálogos de fabricantes, la recuperación y el nivel de calidad exigidos para el agua, además de los caudales que tendrán la alimentación, el permeado y el concentrado.

Criterio 3

La recuperación máxima no siempre representa el mejor diseño.

Recuperaciones elevadas reducen el volumen de concentrado, pero incrementan la presión osmótica, la concentración superficial de sales y el riesgo de incrustaciones. El valor óptimo debe establecerse mediante un análisis técnico y económico.

Criterio 4

El flujo de diseño debe mantenerse por debajo del flujo crítico.

Mantener la operación siempre sobre el flujo crítico obliga a limpiar químicamente con más frecuencia, acorta la duración de las membranas y sube los costos de operación.

Criterio 5

La presión de operación se calcula a partir de la presión osmótica, no solo según lo que pueda dar la bomba.

Una presión insuficiente limita la producción de permeado, mientras que una presión excesiva incrementa innecesariamente el consumo energético y acelera la compactación de determinadas membranas.

Criterio 6

En gran parte, de un buen pretratamiento depende que una planta de membranas funcione bien.

Una membrana de excelente calidad no puede compensar un pretratamiento deficiente.

Criterio 7

La velocidad tangencial pesa tanto como la presión de operación como variable de diseño.

Una adecuada distribución hidráulica reduce la polarización por concentración y retrasa el desarrollo del fouling.

Criterio 8

Las ecuaciones deben interpretarse físicamente antes de aplicarse.

Todo cálculo de ingeniería debe responder a un fenómeno físico claramente identificado. El uso indiscriminado de ecuaciones sin comprender sus hipótesis constituye una de las principales fuentes de errores de diseño.

Criterio 9

Toda simulación debe verificarse mediante balances de materia.

Los programas comerciales facilitan el diseño, pero no reemplazan el criterio ingenieril.

Criterio 10

El objetivo del diseño no consiste en maximizar el flujo, sino en optimizar simultáneamente productividad, calidad del agua, estabilidad operacional y consumo energético.

2.17 LECCIONES APRENDIDAS

Al finalizar este capítulo, el estudiante debe haber incorporado las siguientes ideas fundamentales:

- El transporte de materia constituye el fundamento científico de todas las tecnologías de membranas.
- Cuando una membrana trabaja, difusión y convección ocurren a la vez.

- El diseño hidráulico y las propiedades del fluido participan, ambos, en el valor del coeficiente de transferencia de masa.
- La polarización por concentración es un fenómeno reversible que se puede controlar con un diseño apropiado.
- El fouling representa un fenómeno diferente y generalmente requiere estrategias específicas de limpieza.
- La presión osmótica fija la presión mínima con la que puede funcionar un sistema de ósmosis inversa.
- Los balances de materia constituyen la herramienta principal para el dimensionamiento preliminar de plantas de membranas.
- Todo diseño óptimo implica ceder en algo, porque se equilibran productividad, recuperación, consumo de energía y calidad del agua.

2.18 CASO INTEGRADOR DE INGENIERÍA

Una empresa agroindustrial requiere producir **250 m³/día** de agua desmineralizada para alimentar una caldera de alta presión. El agua subterránea disponible presenta una conductividad de **2 800 µS/cm**, una dureza total de **420 mg/L como $CaCO_3$**, un contenido elevado de sulfatos y un índice SDI aceptable después de un pretratamiento convencional.

El ingeniero responsable debe desarrollar el diseño conceptual del sistema respondiendo, como mínimo, a las siguientes preguntas:

1. ¿Justifica la calidad del agua usar nanofiltración u ósmosis inversa?
2. ¿Qué información adicional debe obtenerse antes de iniciar el diseño?
3. ¿Cuál sería una recuperación preliminar razonable?
4. ¿Qué riesgos de incrustación podrían presentarse?
5. ¿Qué parámetros deberán monitorizarse durante la operación?
6. ¿Qué información será necesaria para estimar la presión osmótica?
7. ¿Cómo influirá la temperatura sobre el desempeño del sistema?
8. ¿Qué variables deberán incorporarse posteriormente al modelo hidráulico?

Este caso no pretende obtener una única respuesta correcta. Su finalidad es integrar los conceptos desarrollados durante el capítulo y preparar al estudiante para los capítulos tecnológicos siguientes.

2.19 SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

Los procesos con membranas son una aplicación directa de la termodinámica de soluciones, el transporte y la conservación de la materia. Quien domina estas bases puede interpretar la hidráulica de las membranas, estimar cuánta presión se necesita, valorar cuánto influye la polarización de concentración y plantear balances que permitan dimensionar sistemas en forma preliminar.

Según lo visto en el capítulo, lo que rinde una membrana no depende únicamente de cómo está construida. Intervienen además el agua tratada, el régimen hidrodinámico y el juego conjunto de la difusión, la convección y la transferencia de masa. También se concluyó que proyectar una planta con membranas requiere sumar conocimientos de Termodinámica, Mecánica de Fluidos, Ingeniería Química e Ingeniería del Agua.

Lo tratado en estas páginas es el cimiento para los capítulos siguientes, donde veremos los materiales de membranas, cómo ocurre la separación y las tecnologías disponibles.

CAPÍTULO 3

CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES DE MEMBRANAS

3.1 INTRODUCCIÓN

La membrana es el elemento que ocupa el centro en cada proceso de separación de la Ingeniería del Agua. Una planta cuenta con bombas, tuberías, instrumentos de control y recipientes a presión, todos con funciones esenciales. Aun así, quedan en manos de la membrana la calidad del permeado, la eficiencia con que se separa, el gasto de energía y buena parte de la viabilidad económica.

Visto como ingeniero, una membrana es un material con permeabilidad selectiva, capaz de regular el paso de una o más especies químicas si se le aplica una fuerza impulsora adecuada. Dos rasgos sobresalen. Uno: no bloquea todo; deja circular algunas especies y detiene otras. Otro: la separación no sucede por sí sola, sino que demanda una diferencia de presión, de concentración, de potencial eléctrico o de temperatura que provea la energía necesaria.

El enorme progreso de las tecnologías de membranas en las últimas cinco décadas tiene su origen en la ingeniería de materiales, la química de superficies, la ciencia de polímeros y la nanotecnología. Las primeras membranas comerciales eran limitadas: poca permeabilidad, estabilidad química baja y escasa resistencia mecánica. En cambio, las cerámicas, las híbridas, las nanocompuestas y las compuestas de película delgada permiten hoy procesos de gran eficiencia, incluso en condiciones más severas.

Si el ingeniero del agua quiere elegir una membrana con acierto y anticipar su desempeño en planta, debe conocer cómo son los materiales. Con una misma alimentación, la solución puede ser muy distinta si cambian la temperatura, la carga de orgánicos, el riesgo de incrustación, qué tan agresivo es el medio químico o los años de servicio que se esperan de la instalación.

Por eso no se puede escoger una membrana mirando únicamente el rechazo de sales ni el flujo de permeado que garantiza el fabricante. Se revisan a la par las

propiedades fisicoquímicas del material, su estructura, su comportamiento mecánico, su estabilidad frente a los oxidantes y la manera en que reacciona con lo que trae el agua.

El capítulo expone la base científica que explica por qué la estructura molecular de cada membrana marca su selectividad, su durabilidad y su desempeño hidráulico. Con ese cimiento se estudiarán después las diversas tecnologías de separación de los capítulos posteriores.

3.2 CONCEPTO DE MEMBRANA DESDE LA INGENIERÍA DE MATERIALES

Muchas publicaciones técnicas definen la membrana, sin más, como una barrera semipermeable. Como introducción la descripción sirve, pero no alcanza para entender el comportamiento de los materiales que hoy se emplean en Ingeniería del Agua.

Para la Ingeniería de Materiales, la membrana es un sólido muy estructurado. Su ordenamiento molecular regula en simultáneo el transporte de masa y la resistencia mecánica, y además determina de qué forma reacciona químicamente con el medio.

Varias características estructurales gobiernan el transporte por la membrana: la rugosidad, la energía libre superficial, la carga eléctrica en la superficie, los grupos funcionales, la hidrofilicidad, la densidad de reticulación, la cristalinidad del polímero y, además, cuántos poros hay y de qué tamaño son.

Estas propiedades no actúan de manera independiente. Una modificación destinada a incrementar la permeabilidad puede alterar simultáneamente la resistencia mecánica, la estabilidad química o la selectividad del material. Por ello, el desarrollo de nuevas membranas constituye un problema clásico de optimización multicriterio.

Desde el punto de vista industrial, una membrana debe satisfacer simultáneamente diversos requisitos. Debe presentar una elevada permeabilidad para minimizar el área instalada, una alta selectividad para garantizar la calidad del permeado, suficiente resistencia mecánica para soportar las presiones de operación y estabilidad química frente a oxidantes, ácidos, bases y agentes de limpieza. Además, debe mantener estas propiedades durante miles de horas de funcionamiento continuo.

La dificultad para satisfacer simultáneamente todos estos requisitos explica por qué no existe una membrana universal capaz de resolver todos los problemas de

separación. Cada aplicación exige un equilibrio diferente entre permeabilidad, selectividad, estabilidad y costo.

3.2.1 FUNCIONES QUE DEBE CUMPLIR UNA MEMBRANA

Funcionalmente, hoy se le exigen a una membrana al menos seis funciones.

Primero, separar de manera selectiva las especies que contiene la corriente de alimentación.

La segunda función es soportar las diferencias de presión sin experimentar deformaciones permanentes que alteren su estructura.

Tercera función: que el flujo se mantenga estable durante periodos largos de operación, con el mínimo impacto de la polarización por concentración y del fouling.

Cuarto, aguantar químicamente lo que lleva el agua y también los reactivos con que se hacen las limpiezas químicas.

Quinto, no perder sus propiedades estructurales cuando cambian la temperatura y la presión, algo habitual en la operación industrial.

Finalmente, la membrana debe permitir procesos de fabricación reproducibles y económicamente competitivos que hagan viable su aplicación a gran escala.

Se ve así que la membrana es un componente de ingeniería sumamente especializado. Para diseñarla hay que juntar conocimientos de ciencia de materiales, química de polímeros, mecánica, transferencia de masa e ingeniería de procesos.

Tabla 3.1

Requisitos de ingeniería para una membrana destinada al tratamiento de agua

Propiedad	**Importancia para el diseño**	**Consecuencia de un desempeño deficiente**
Alta permeabilidad	Reduce el área instalada y el consumo energético	Mayor número de módulos y mayor CAPEX
Alta selectividad	Garantiza la calidad del permeado	Incumplimiento de especificaciones de calidad
Resistencia mecánica	Soporta la presión de operación	Rotura o compactación de la membrana
Estabilidad química	Permite limpiezas y operación prolongada	Degradación prematura del material
Resistencia al fouling	Mantiene el flujo de permeado	Mayor frecuencia de limpieza química
Fabricación reproducible	Asegura uniformidad entre módulos	Variabilidad operacional y menor confiabilidad

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Un error común al proyectar el tratamiento de agua es decidir la membrana solo por el rechazo en porcentaje o por el precio de adquisición. En cambio, si se evalúa el costo a lo largo de la vida útil, puede ser bastante más conveniente la que dura más frente a los químicos, tiende menos al fouling y permea más, aunque cueste más al comienzo. El ingeniero la debe tratar como pieza estratégica del sistema y no como simple repuesto.

3.3 CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LAS MEMBRANAS

Hay varias formas de clasificar las membranas, y la elección depende de qué se quiere estudiar. En la literatura científica se las agrupa a menudo por el material con que se fabrican, por su mecanismo de separación, por la geometría del módulo o por el uso industrial. En Ingeniería del Agua resulta especialmente útil la clasificación estructural, pues relaciona la morfología del material con su hidráulica, su selectividad y sus restricciones al operar.

Cómo se separa algo en una membrana lo determina su estructura interna. Por tanto, antes de optar por una tecnología hay que comprender de qué manera el orden microscópico del material condiciona el paso del agua y de los solutos.

Desde esta perspectiva, las membranas pueden agruparse en dos grandes categorías: **membranas porosas** y **membranas densas**. Esta clasificación constituye la base para comprender el funcionamiento de la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración, la ósmosis inversa y otros procesos avanzados de separación.

3.3.1 MEMBRANAS POROSAS

Una red continua de poros conectados entre sí caracteriza a las membranas porosas; por ella pasa el agua, impulsada en lo principal por diferencias de presión. Aquí se separa por exclusión física, ya que las partículas mayores que el diámetro efectivo del poro quedan retenidas, sea en la superficie o dentro de la estructura.

Si los poros son de diámetro relativamente grande, la mecánica de fluidos modela el flujo con ecuaciones de flujo capilar. Cuando las dimensiones se acercan al camino libre medio molecular, se recurre a aproximaciones más elaboradas.

Dado que ofrecen poca resistencia al paso del agua, las membranas porosas suelen tener una permeabilidad hidráulica elevada. Su debilidad es que casi no frenan las

especies disueltas. Por eso se aplican principalmente a eliminar sólidos suspendidos, coloides, microorganismos y macromoléculas.

Un parámetro que pesa mucho al diseñar el material es cómo se distribuyen los tamaños de poro. Si la distribución es muy amplia, se resiente la selectividad; si es estrecha, el comportamiento hidráulico se vuelve más uniforme y predecible.

Sobre todo cuatro usos industriales corresponden a las membranas porosas: clarificación de aguas superficiales, biorreactores de membranas, tratamiento terciario de efluentes y, como etapa previa, la obtención de agua ultrapura.

Interpretación ingenieril. El diseño de una membrana porosa exige encontrar un equilibrio entre permeabilidad y resistencia mecánica. Incrementar la porosidad mejora el flujo de permeado, pero también puede reducir la rigidez estructural y favorecer la deformación del material bajo altas presiones.

3.3.2 MEMBRANAS DENSAS

Las membranas densas presentan una estructura continua sin poros abiertos que permitan el paso directo del fluido. En estos materiales el transporte ocurre mediante los mecanismos descritos por el modelo solución-difusión desarrollado en el capítulo anterior.

El agua y algunos solutos entran primero en la matriz polimérica y se disuelven en ella. Después difunden a través del polímero, movidos por diferencias de potencial químico, hasta ser liberados en la cara opuesta. La selectividad entonces no responde a un tamaño de poro, sino a cómo interactúa cada especie con el material.

Ello explica el alto rechazo de las membranas de nanofiltración y de ósmosis inversa con las sales disueltas, los contaminantes emergentes y los orgánicos de bajo peso molecular.

Las membranas densas tienen una capa activa delgadísima, por lo general de menos de una micra, apoyada en estructuras porosas que le dan la resistencia mecánica para soportar las altas presiones de operación.

Para quien diseña materiales, producir estas membranas es un gran reto tecnológico: variaciones mínimas de composición química o de grado de reticulación cambian de forma importante la permeabilidad y la selectividad.

Interpretación ingenieril. El espesor de la capa activa representa uno de los parámetros de diseño más sensibles. Reducir dicho espesor incrementa el flujo de agua, pero exige desarrollar soportes mecánicos capaces de absorber los esfuerzos generados durante la operación sin comprometer la integridad de la membrana.

3.3.3 MEMBRANAS SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS

Aparte de tener o no poros, las membranas se pueden clasificar según cómo se distribuye su estructura a lo largo del espesor.

En las membranas simétricas, las propiedades son casi las mismas de un lado al otro. Poro, porosidad y composición química cambian poco a lo largo del espesor. Tuvieron un papel destacado en las primeras etapas de la tecnología, pero hoy casi no se usan en la industria porque oponen mucha resistencia hidráulica.

Las membranas asimétricas nacieron para superar esa limitación. Su capa de separación es finísima y descansa sobre una estructura muy porosa que da resistencia mecánica sin aumentar de manera apreciable la resistencia al flujo.

Gracias a este diseño pudieron crecer a la vez la selectividad y la productividad. Es de los avances más importantes que ha tenido la tecnología de membranas.

Tabla 3.2

Comparación entre membranas porosas y membranas densas

Característica	Membranas porosas	Membranas densas
Mecanismo predominante	Exclusión por tamaño	Solución-difusión
Fuerza impulsora principal	Diferencia de presión	Presión y potencial químico
Aplicaciones típicas	Microfiltración y ultrafiltración	Nanofiltración y ósmosis inversa
Rechazo de sales	Bajo	Alto
Flujo hidráulico	Elevado	Moderado
Sensibilidad a la presión osmótica	Baja	Alta

Nota. Elaboración propia.

3.4 MATERIALES POLIMÉRICOS UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE MEMBRANAS

Los polímeros son hoy la familia de materiales más empleada en membranas para tratar agua. Dominan porque durante la fabricación se pueden ajustar sus propiedades químicas y estructurales, lo que da materiales muy selectivos, de buena resistencia mecánica y de producción relativamente barata.

Un polímero es, para la Ingeniería de Materiales, una macromolécula formada al repetirse unidades estructurales llamadas monómeros. Cómo es químicamente cada monómero, cuántas unidades se enlazan, cómo se distribuyen los pesos moleculares y cómo se acomodan las cadenas en el espacio, todo eso fija las propiedades de la membrana terminada.

En la fabricación de membranas modernas no basta con seleccionar un polímero que presente buena resistencia química. Es necesario controlar simultáneamente la hidrofilicidad, la permeabilidad al agua, la estabilidad dimensional, la resistencia mecánica, la susceptibilidad al ensuciamiento y la compatibilidad con los procedimientos de limpieza química.

Con polímeros nuevos, en las últimas décadas las plantas de membranas producen bastante más, gastan menos energía por unidad producida y sirven en más aplicaciones industriales.

3.4.1 RELACIÓN ENTRE ESTRUCTURA MOLECULAR Y PROPIEDADES DE LA MEMBRANA

Cómo está ordenado el polímero a nivel molecular define directamente las propiedades de la membrana. Dentro de un material polimérico coexisten zonas cristalinas y zonas amorfas.

Las regiones cristalinas presentan un elevado orden molecular y una fuerte interacción entre cadenas poliméricas. Como consecuencia, proporcionan alta resistencia mecánica, buena estabilidad térmica y baja permeabilidad.

Por el contrario, las regiones amorfas presentan una estructura menos ordenada, permitiendo una mayor movilidad molecular y facilitando el transporte de agua y solutos.

De la proporción entre ambas zonas depende gran parte del comportamiento. Con más cristalinidad la membrana resiste mejor, mecánica y químicamente, pero suele permear menos. Con más fracción amorfa fluye más agua, a costa de perder estabilidad dimensional y de deformarse con más facilidad bajo presión.

Interpretación ingenieril. Durante el desarrollo de una membrana, el fabricante debe optimizar el grado de cristalinidad para obtener un material que combine elevada resistencia mecánica con una permeabilidad adecuada. Este equilibrio constituye uno de los principales desafíos de la ingeniería de polímeros aplicada a membranas.

3.4.2 HIDROFILICIDAD E HIDROFOBICIDAD

Entre las propiedades de superficie, pocas pesan tanto como la afinidad de la membrana por el agua. De ella dependen cómo se humecta, cuánta materia orgánica adsorbe y cuán propensa es al fouling.

Las membranas hidrofílicas presentan grupos funcionales capaces de establecer enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua. Como consecuencia, el agua humecta fácilmente la superficie, disminuyendo la adsorción de compuestos orgánicos hidrofóbicos y reduciendo la tendencia al ensuciamiento.

Las membranas hidrofóbicas, por el contrario, presentan baja afinidad por el agua y una mayor interacción con sustancias orgánicas no polares. Aunque esta característica puede resultar desfavorable para procesos de filtración convencional, constituye una propiedad esencial en tecnologías como la destilación por membranas, donde los poros deben permanecer libres de agua líquida para permitir únicamente el transporte de vapor.

Modificar la química de la superficie es hoy una estrategia principal para controlar la hidrofilicidad y lograr un mejor desempeño operacional. Se hace con tratamientos de plasma, con injertos poliméricos o incorporando nanopartículas.

3.4.3 PRINCIPALES POLÍMEROS UTILIZADOS EN INGENIERÍA DEL AGUA

Según las condiciones de operación, la tecnología de separación empleada y la calidad del agua que entra, se decide cuál polímero usar.

La **poliamida aromática** constituye el material predominante en membranas de nanofiltración y ósmosis inversa debido a su elevada selectividad y excelente rechazo de sales. Sin embargo, presenta sensibilidad frente a agentes oxidantes, particularmente al cloro libre, lo que obliga a implementar procedimientos rigurosos de decloración antes del ingreso del agua a la membrana.

El **polisulfona (PSf)** y la **polietersulfona (PES)** destacan por su elevada estabilidad térmica y resistencia mecánica. Estas propiedades las convierten en materiales ampliamente utilizados para fabricar membranas de ultrafiltración y como soporte estructural de membranas compuestas.

El **fluoruro de polivinilideno (PVDF)** presenta una excelente resistencia química y elevada estabilidad frente a agentes oxidantes. Por ello, constituye uno de los materiales

más empleados en biorreactores de membranas y sistemas de ultrafiltración para tratamiento de aguas residuales.

La **celulosa acetato**, uno de los primeros materiales utilizados industrialmente en ósmosis inversa, posee buena resistencia al cloro y un comportamiento hidráulico adecuado. No obstante, presenta limitaciones relacionadas con su estabilidad térmica y su susceptibilidad a la hidrólisis, razones por las cuales ha sido reemplazada progresivamente por membranas compuestas de poliamida en la mayoría de las aplicaciones modernas.

Tabla 3.3

Principales materiales poliméricos utilizados en membranas

Material	Propiedades relevantes	Aplicaciones principales	Limitaciones
Poliamida aromática (PA)	Elevado rechazo de sales, alta selectividad	Nanofiltración y ósmosis inversa	Sensible al cloro libre
Polisulfona (PSf)	Alta resistencia mecánica y térmica	Ultrafiltración y soporte de membranas compuestas	Hidrofobicidad moderada
Polietersulfona (PES)	Buena estabilidad química y mecánica	Ultrafiltración y microfiltración	Requiere modificación superficial para reducir el fouling
PVDF	Excelente resistencia química y oxidativa	Ultrafiltración y biorreactores de membranas	Hidrofóbico en estado natural
Acetato de celulosa (CA)	Buena resistencia al cloro	Ósmosis inversa de primera generación	Menor estabilidad térmica y química

Nota. Elaboración propia.

3.4.4 MEMBRANAS COMPUESTAS DE PELÍCULA DELGADA

Uno de los avances más importantes en la tecnología de membranas fue el desarrollo de las membranas compuestas de película delgada (*Thin Film Composite, TFC*). Estas membranas presentan una estructura multicapa en la que cada componente cumple una función específica.

De poliamida aromática suele ser la capa activa, que mide cientos de nanómetros y separa el agua de los solutos. Por debajo se coloca una capa de polisulfona o polietersulfona con microporos, que soporta mecánicamente sin ofrecer resistencia importante al flujo. Cierra el conjunto un tejido de poliéster, cuya rigidez estructural resiste las presiones altas de operación.

Con varias capas superpuestas se mejoran a la vez la selectividad, la permeabilidad y el aguante mecánico, y se superan los límites de las membranas simétricas con las que arrancaron los primeros procesos de separación.

Interpretación ingenieril. La separación funcional de cada capa constituye un principio clásico de diseño en Ingeniería de Materiales. En lugar de exigir que un único material satisfaga simultáneamente todos los requisitos mecánicos, hidráulicos y químicos, cada capa se optimiza para desempeñar una función específica. Este enfoque explica el extraordinario éxito de las membranas TFC en aplicaciones de desalinización y producción de agua ultrapura.

3.4.5 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES

La selección del material de una membrana representa una decisión de diseño que debe considerar simultáneamente aspectos técnicos, económicos y operacionales.

Para agua potable, normalmente se prioriza la alta selectividad junto con poco gasto de energía. Con efluentes industriales de alta temperatura o gran agresividad química, ganan peso la estabilidad química, la resistencia térmica y que la limpieza resulte sencilla.

Asimismo, el ingeniero debe evaluar la compatibilidad del material con los productos químicos empleados durante las operaciones de limpieza, ya que agentes oxidantes, solventes orgánicos o soluciones fuertemente alcalinas pueden degradar determinadas membranas y reducir significativamente su vida útil.

La decisión final no debe basarse exclusivamente en el costo inicial del material. Un análisis del costo del ciclo de vida, que incluya productividad, frecuencia de limpieza, consumo energético, reemplazo de membranas y disponibilidad operacional, proporciona una base mucho más sólida para la selección tecnológica.

3.5 MEMBRANAS CERÁMICAS E INORGÁNICAS

Las membranas poliméricas cambiaron el tratamiento de agua desde mediados del siglo XX, pero se quedan cortas con temperaturas altas, soluciones muy corrosivas, presiones extremas o solventes orgánicos agresivos. Las cerámicas e inorgánicas nacieron para esos casos, ya que resisten donde los polímeros se degradan químicamente o pierden resistencia mecánica.

Desde el punto de vista de la ciencia de materiales, las membranas cerámicas están constituidas por óxidos metálicos sinterizados, tales como alúmina (Al_2O_3), zirconia (ZrO_2), titania (TiO_2) y sílice (SiO_2). Estos materiales presentan una estructura altamente estable, con enlaces químicos de elevada energía que les confieren una notable resistencia térmica, química y mecánica.

A diferencia de las membranas poliméricas, cuyo comportamiento está condicionado por la movilidad de las cadenas macromoleculares, las membranas cerámicas mantienen prácticamente inalteradas sus propiedades dentro de amplios intervalos de temperatura y pH. Esta característica permite utilizarlas en aplicaciones industriales particularmente exigentes, como el tratamiento de efluentes petroquímicos, farmacéuticos, mineros y alimentarios.

Cuando reponer membranas cuesta mucho, o cuando las paradas de planta generan pérdidas importantes, invertir más al inicio en membranas cerámicas se justifica: para la Ingeniería del Agua son una alternativa muy confiable.

3.5.1 ESTRUCTURA DE UNA MEMBRANA CERÁMICA

Las membranas cerámicas modernas tienen una arquitectura multicapa que, en lo funcional, se parece a la de las compuestas poliméricas. La diferencia es que cada capa es de material cerámico, con distinto tamaño de poro y distinta función estructural.

La capa externa posee poros extremadamente pequeños y constituye la superficie responsable de la separación. Debajo de ella se encuentran capas intermedias con poros progresivamente mayores, cuya función consiste en disminuir la resistencia hidráulica y distribuir uniformemente los esfuerzos mecánicos. Finalmente, un soporte cerámico macroporoso proporciona la rigidez necesaria para soportar elevadas presiones y esfuerzos durante la operación.

Esta estructura jerárquica permite combinar elevada selectividad con una excelente resistencia mecánica y una baja pérdida de carga.

Interpretación ingenieril. La distribución gradual del tamaño de poro constituye un ejemplo clásico de optimización estructural. La capa selectiva controla la separación, mientras que las capas inferiores cumplen funciones exclusivamente mecánicas e hidráulicas. Este principio de diseño reduce significativamente la resistencia total al flujo y mejora la durabilidad de la membrana.

3.5.2 PROPIEDADES DE LOS PRINCIPALES MATERIALES CERÁMICOS

El material cerámico se escoge según las condiciones propias del proceso y las propiedades que exige cada aplicación.

La **alúmina** es el material más utilizado debido a su elevada resistencia mecánica, buena estabilidad química y costo relativamente moderado. Se emplea ampliamente en procesos de microfiltración y ultrafiltración.

La **zirconia** presenta una resistencia superior frente a medios altamente alcalinos y temperaturas elevadas. Además, posee una excelente estabilidad frente al desgaste mecánico, razón por la cual se utiliza en procesos con elevada carga de sólidos abrasivos.

La **titania** destaca por su elevada estabilidad química y por sus propiedades fotocatalíticas, que permiten desarrollar membranas autolimpiantes mediante irradiación ultravioleta. Estas aplicaciones constituyen actualmente una de las principales líneas de investigación en Ingeniería del Agua.

La **sílice**, aunque menos utilizada como material estructural, participa frecuentemente en membranas compuestas y materiales híbridos destinados a aplicaciones especializadas.

Tabla 3.4

Comparación de los principales materiales cerámicos

Material	Resistencia química	Resistencia térmica	Resistencia mecánica	Aplicaciones principales
Alúmina (Al_2O_3)	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Microfiltración y ultrafiltración
Zirconia (ZrO_2)	Excelente	Excelente	Excelente	Efluentes industriales, minería
Titania (TiO_2)	Excelente	Muy alta	Alta	Fotocatálisis y membranas autolimpiantes
Sílice (SiO_2)	Alta	Muy alta	Moderada	Membranas híbridas y aplicaciones especiales

Nota. Elaboración propia.

3.5.3 VENTAJAS OPERACIONALES DE LAS MEMBRANAS CERÁMICAS

Al diseñar plantas industriales, las cerámicas brindan beneficios que los polímeros difícilmente alcanzan. Los enumeramos a continuación.

Resisten el calor tan bien que, en ciertas aplicaciones, pueden trabajar a más de 200 °C, de modo que las corrientes calientes se tratan sin enfriarlas antes.

Asimismo, presentan una notable estabilidad frente a soluciones fuertemente ácidas o alcalinas, permitiendo procedimientos de limpieza química mucho más agresivos sin comprometer la integridad del material.

Otra ventaja importante corresponde a su elevada resistencia al desgaste. En industrias como la minera o la cerámica, donde las corrientes contienen partículas abrasivas, las membranas cerámicas mantienen su desempeño durante periodos significativamente mayores que las membranas poliméricas.

Duran, además, mucho más que los materiales orgánicos, y eso compensa en algo el mayor desembolso inicial.

3.5.4 LIMITACIONES TÉCNICAS Y ECONÓMICAS

Pese a sus muchas ventajas, las membranas cerámicas tienen limitaciones que se deben tomar en cuenta al diseñar.

La principal corresponde a su elevado costo de fabricación, asociado a los procesos de conformado, sinterización y mecanizado de materiales cerámicos de alta pureza.

También son más frágiles frente a los golpes que pueden sufrir en el transporte y en la instalación. Soportan muy bien la compresión, pero aguantan peor la flexión y el choque que ciertos polímeros.

Además, conseguir grandes áreas efectivas es más complicado y caro que con las membranas enrolladas de poliamida. Por eso su empleo en procesos de gran capacidad para agua potable queda en parte limitado.

Escoger entre membranas poliméricas y cerámicas es una decisión económica que debe sustentarse en el costo del ciclo de vida; mirar solo el precio de adquisición no basta.

3.5.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA APLICACIONES INDUSTRIALES

Para decidir si se usa una membrana cerámica hay que evaluar las condiciones de operación en su conjunto.

En aplicaciones donde predominan temperaturas moderadas, aguas relativamente limpias y presiones convencionales, las membranas poliméricas continúan representando la alternativa más competitiva.

En cambio, cuando el proceso involucra altas temperaturas, limpieza frecuente con agentes químicos agresivos, corrientes con elevada carga de sólidos o ambientes altamente corrosivos, las membranas cerámicas ofrecen ventajas técnicas que pueden compensar ampliamente su mayor costo inicial.

Entre los aspectos por considerar al elegir están la duración esperada, la disponibilidad operacional que se necesita, lo que cuestan las paradas de planta, cada cuánto se cambian las membranas y el mantenimiento que exigen.

Tabla 3.5

Comparación entre membranas poliméricas y cerámicas

Criterio	**Membranas poliméricas**	**Membranas cerámicas**
Costo inicial	Bajo a moderado	Elevado
Vida útil	Moderada	Muy alta
Temperatura máxima de operación	Limitada por el polímero	Muy elevada
Resistencia química	Dependiente del material	Excelente
Resistencia al desgaste	Moderada	Muy alta
Facilidad de limpieza química	Moderada	Muy alta
Aplicaciones típicas	Agua potable, desalación, reúso	Minería, alimentos, industria química, farmacéutica

Nota. Elaboración propia.

La evolución reciente de la Ingeniería de Materiales ha demostrado que el futuro de las membranas no depende únicamente del desarrollo de nuevos polímeros o nuevas cerámicas, sino de la integración de ambos tipos de materiales mediante estructuras híbridas y nanocompuestos capaces de combinar elevada permeabilidad, excelente selectividad y extraordinaria estabilidad química. En el siguiente apartado se estudiarán estas nuevas generaciones de membranas, incluyendo los nanomateriales, los materiales bidimensionales y las estrategias de modificación superficial que actualmente representan la frontera de la investigación en Ingeniería del Agua.

3.6 MEMBRANAS HÍBRIDAS Y MATERIALES AVANZADOS

La evolución de las tecnologías de membranas ha estado históricamente condicionada por un compromiso entre permeabilidad y selectividad. En términos

generales, un incremento de la permeabilidad suele ir acompañado de una disminución de la capacidad de separación, mientras que una elevada selectividad normalmente implica una reducción del flujo de agua. Esta relación, conocida como compromiso permeabilidad-selectividad (*permeability-selectivity trade-off*), constituye una de las principales limitaciones de las membranas convencionales.

Durante las últimas décadas, la Ingeniería de Materiales ha desarrollado diversas estrategias destinadas a superar esta limitación mediante la incorporación de nanomateriales, estructuras híbridas y modificaciones superficiales capaces de controlar el transporte molecular a escala nanométrica. Estas nuevas generaciones de membranas buscan combinar las ventajas de los polímeros tradicionales con las propiedades excepcionales de materiales inorgánicos, nanopartículas y materiales bidimensionales.

Estas innovaciones, vistas desde la Ingeniería del Agua, persiguen cuatro metas básicas: más flujo de permeado, mejor rechazo de contaminantes, menor tendencia al fouling y membranas que duren más.

3.6.1 MEMBRANAS DE MATRIZ MIXTA

Las membranas de matriz mixta (*Mixed Matrix Membranes, MMM*) están constituidas por una matriz polimérica en cuyo interior se dispersan partículas inorgánicas de tamaño micro o nanométrico. Estas partículas actúan modificando la estructura del polímero y creando trayectorias preferenciales para el transporte de determinadas especies químicas.

Entre los materiales incorporados con mayor frecuencia se encuentran las zeolitas, sílice, nanotubos de carbono, óxidos metálicos y estructuras metal-orgánicas (*Metal Organic Frameworks, MOF*). Cada uno de ellos aporta propiedades específicas relacionadas con la adsorción, la selectividad, la resistencia mecánica o la hidrofilicidad.

Fabricar estas membranas obliga a resolver un problema central: repartir las partículas de manera uniforme dentro de la matriz polimérica. Si se forman aglomerados o quedan defectos en la interfaz entre polímero y partícula, aparecen caminos de flujo indeseados y el rechazo de la membrana cae de forma notable.

Interpretación ingenieril. El diseño de membranas de matriz mixta requiere optimizar simultáneamente la naturaleza del polímero, el tamaño de las partículas, su concentración y la compatibilidad química entre ambas fases. Un incremento

indiscriminado del contenido de nanopartículas puede deteriorar la integridad mecánica del material y reducir su confiabilidad durante la operación.

3.6.2 MEMBRANAS MODIFICADAS SUPERFICIALMENTE

Para mejorar el comportamiento de una membrana se recurre con frecuencia a una estrategia sencilla: cambiar solo la química de su superficie y dejar casi intacta la estructura interna del material.

Estas modificaciones pueden realizarse mediante tratamientos de plasma, injertos poliméricos, deposición de capas ultradelgadas o inmovilización de grupos funcionales específicos.

Lo que se busca es gobernar cómo interactúa la superficie con las especies disueltas o suspendidas en el agua. Una superficie más hidrofílica, por lo común, adsorbe menos materia orgánica, forma menos biopelículas y resiste mejor el fouling.

Para agua potable y para reutilizar aguas residuales, modificar la superficie se ve hoy como una de las rutas más esperanzadoras: se espera con ello limpiar con químicos menos veces y conseguir membranas que duren más.

3.6.3 NANOMATERIALES APLICADOS A MEMBRANAS

Con la nanotecnología se pueden conseguir materiales con propiedades que los polímeros convencionales no alcanzan.

El dióxido de titanio (TiO_2) en forma de nanopartículas da superficies fotocatalíticas. Bajo luz ultravioleta, estas degradan compuestos orgánicos, de modo que una fracción del fouling orgánico desaparece sobre la misma membrana.

La plata en forma de nanopartículas tiene acción antimicrobiana. Con ella se forman menos biopelículas y baja el biofouling, que es uno de los problemas más frecuentes en las plantas de tratamiento de agua.

Los nanotubos de carbono son muy resistentes mecánicamente y, como casi no hay fricción en su interior, facilitan mucho el paso del agua. Llevarlos a escala industrial todavía tropieza con problemas de fabricación y de costo; sin embargo, figuran entre las líneas de investigación más dinámicas para lograr membranas de alta productividad.

Asimismo, el grafeno y sus derivados han despertado un enorme interés debido a la posibilidad de fabricar membranas ultradelgadas con elevada selectividad y permeabilidad.

Tabla 3.6

Principales nanomateriales utilizados en membranas

Nanomaterial	Propiedad principal	Aplicaciones potenciales
TiO_2	Fotocatálisis y autolimpieza	Reducción del fouling orgánico
Ag	Actividad antimicrobiana	Control del biofouling
Nanotubos de carbono	Alta permeabilidad y resistencia mecánica	Membranas de alta productividad
Óxido de grafeno	Elevada selectividad y resistencia	Desalinización y separación molecular
Zeolitas	Selectividad molecular	Membranas de matriz mixta
MOF	Porosidad altamente controlada	Separaciones selectivas avanzadas

Nota. Elaboración propia.

3.6.4 MATERIALES BIDIMENSIONALES

Con el grafeno, la ciencia de materiales cambió de rumbo, gracias a sus propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas fuera de lo común. En membranas, el óxido de grafeno forma canales de escala nanométrica por los que el agua pasa con rapidez, mientras que muchas especies químicas quedan retenidas.

Otros materiales bidimensionales, como los dicalcogenuros de metales de transición y el nitruro de boro hexagonal, también están siendo evaluados para aplicaciones de separación altamente selectiva.

Si bien buena parte de estas tecnologías sigue en desarrollo, se perfilan como de las áreas con más potencial para la siguiente generación de procesos con membranas.

3.6.5 DESAFÍOS PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Aunque la investigación ha avanzado mucho, llevar nuevos materiales al mercado exige superar varios obstáculos tecnológicos y económicos.

Los obstáculos principales son: que la fabricación se repita igual cada vez, que el material sea estable por años, que encaje con los procesos industriales ya existentes, lo que cuesta producirlo y los posibles riesgos ambientales del uso de nanopartículas.

Para la Ingeniería del Agua, un material nuevo triunfa únicamente si al mismo tiempo ofrece mejor rendimiento técnico, menor costo a lo largo de su ciclo de vida y gran confiabilidad operacional en periodos extensos.

Tabla 3.7

Comparación entre membranas convencionales y membranas avanzadas

Característica	Membranas convencionales	Membranas avanzadas
Material predominante	Polímeros	Polímeros modificados, nanocompuestos e híbridos
Control del fouling	Moderado	Mejorado mediante modificación superficial
Productividad	Alta	Potencialmente superior
Selectividad	Elevada	Elevada con posibilidades de optimización específica
Complejidad de fabricación	Baja a moderada	Alta
Estado de desarrollo	Comercial consolidado	Comercial emergente e investigación avanzada

Nota. Elaboración propia.

En el terreno del diseño, la meta actual no se limita a lograr más rechazo o más flujo. Se apunta a materiales inteligentes que se adapten de forma dinámica a cómo se opera, que se ensucien poco y que gasten menos energía. Estos avances están muy ligados a la digitalización de plantas, a la ingeniería de superficies y a la inteligencia artificial aplicada al diseño de materiales nuevos.

3.8 CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS

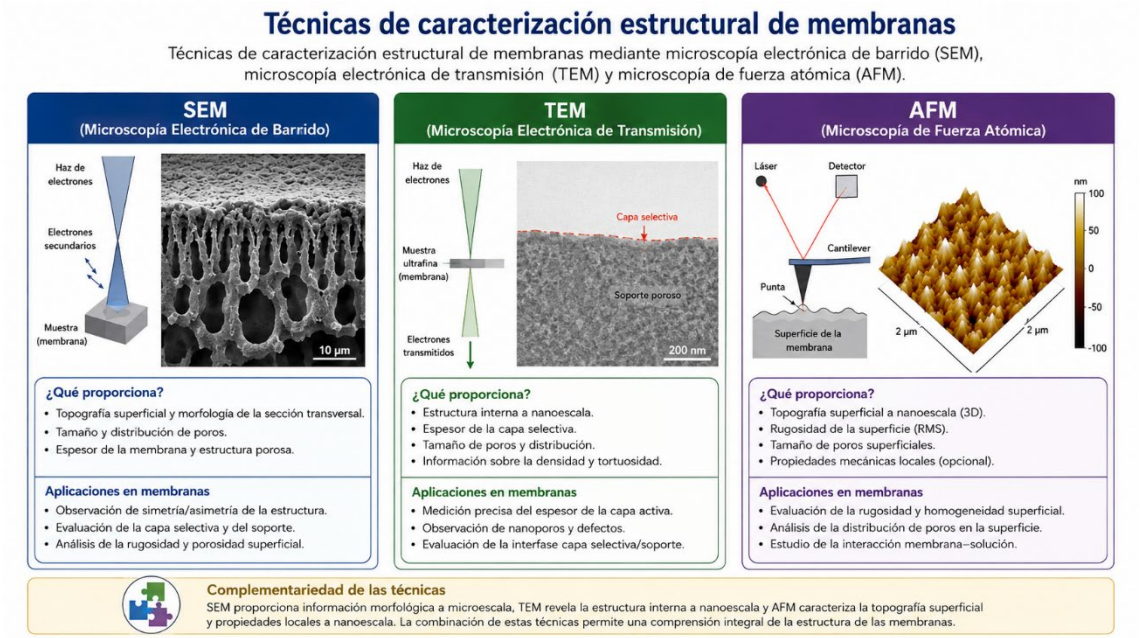
Las propiedades físicas, químicas y estructurales de una membrana determinan directamente su desempeño. Por eso, antes de usarla en una aplicación industrial se la somete a una serie de ensayos que definen su transporte, su resistencia mecánica, su estabilidad química y su comportamiento superficial.

La caracterización de membranas es una especialidad de la Ingeniería de Materiales que vincula, con valores cuantitativos, la estructura del material con su conducta en operación. Además, entrega los datos que hacen falta para desarrollar membranas nuevas, controlar la calidad durante la fabricación y evaluar el deterioro causado por el envejecimiento o el fouling.

Para el diseño, caracterizar no es solo trabajo de laboratorio. Los parámetros medidos entran como datos a los modelos matemáticos con que se dimensionan los sistemas de membranas y se simulan los procesos industriales.

Figura 3.1

Técnicas de caracterización estructural de membranas



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Strathmann (2011).

3.8.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

El primer paso de la caracterización es estudiar la estructura física de la membrana. De ese examen salen la porosidad total, el tamaño y la distribución de los poros, el grosor de la capa activa y qué tan homogéneas son las capas que forman el material.

Para ello, la herramienta más usual es la microscopía. Con la electrónica de barrido se observan, con gran resolución, tanto la superficie como la sección transversal; así se ubican defectos, grietas, deformaciones y zonas estructuralmente heterogéneas.

Por su parte, la microscopía electrónica de transmisión proporciona información detallada sobre la organización interna de materiales nanométricos y membranas compuestas, siendo especialmente útil en investigación y desarrollo.

Al estudiar modificaciones superficiales se suma la microscopía de fuerza atómica. Mide cuán rugosa es la superficie y produce imágenes tridimensionales con resolución nanométrica.

Interpretación ingenieril. La rugosidad superficial constituye un parámetro de gran importancia práctica. Superficies excesivamente rugosas favorecen la acumulación de materia orgánica y microorganismos, incrementando la probabilidad de fouling. En consecuencia, la modificación superficial destinada a reducir la rugosidad puede mejorar significativamente el desempeño hidráulico de la membrana.

3.8.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Qué tanto una membrana atrae al agua, cómo resiste los agentes químicos y cómo interactúa con los contaminantes del proceso depende de su composición química.

Para reconocer los grupos funcionales de la superficie se acude con frecuencia a la espectroscopía, en especial a la infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). Detecta enlaces químicos característicos y muestra qué cambios dejaron el envejecimiento o la limpieza química.

Otra técnica de uso amplio es la de rayos X con detección de fotoelectrones, o XPS. Con ella se conocen el estado químico y la composición elemental de los nanómetros más externos de la membrana.

La espectroscopía Raman complementa estos análisis permitiendo identificar cambios estructurales en materiales carbonosos, grafeno y nanocompuestos.

Hoy estas técnicas son de rutina en los laboratorios que desarrollan materiales nuevos para membranas.

3.8.3 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

Para el ingeniero del agua, quizás la etapa más valiosa sea la caracterización hidráulica, puesto que de ella se deduce directamente cómo operará la membrana.

Los ensayos hidráulicos entregan la permeabilidad hidráulica y el flujo de agua pura. También informan cuánta resistencia intrínseca tiene la membrana y qué rechazo muestra ante solutos patrón diversos.

El flujo de agua pura constituye el primer indicador del desempeño hidráulico de una membrana.

Ecuación 3.1. Flujo de agua pura

$$J = Q / A$$

donde

J = flujo de permeado ($L/m^2 \cdot h$)

Q = caudal de permeado (L/h)

A = área efectiva de membrana (m^2)

Si el ensayo se repite a varias presiones, la pendiente que resulta de graficar flujo contra presión da la permeabilidad hidráulica del material.

En el diseño de plantas este parámetro es básico: de él depende el área total de membranas que se necesita para llegar a una producción de agua determinada.

3.8.4 ÁNGULO DE CONTACTO

Para evaluar la hidrofilicidad de la superficie se mide el ángulo de contacto de una gota de agua puesta sobre la membrana.

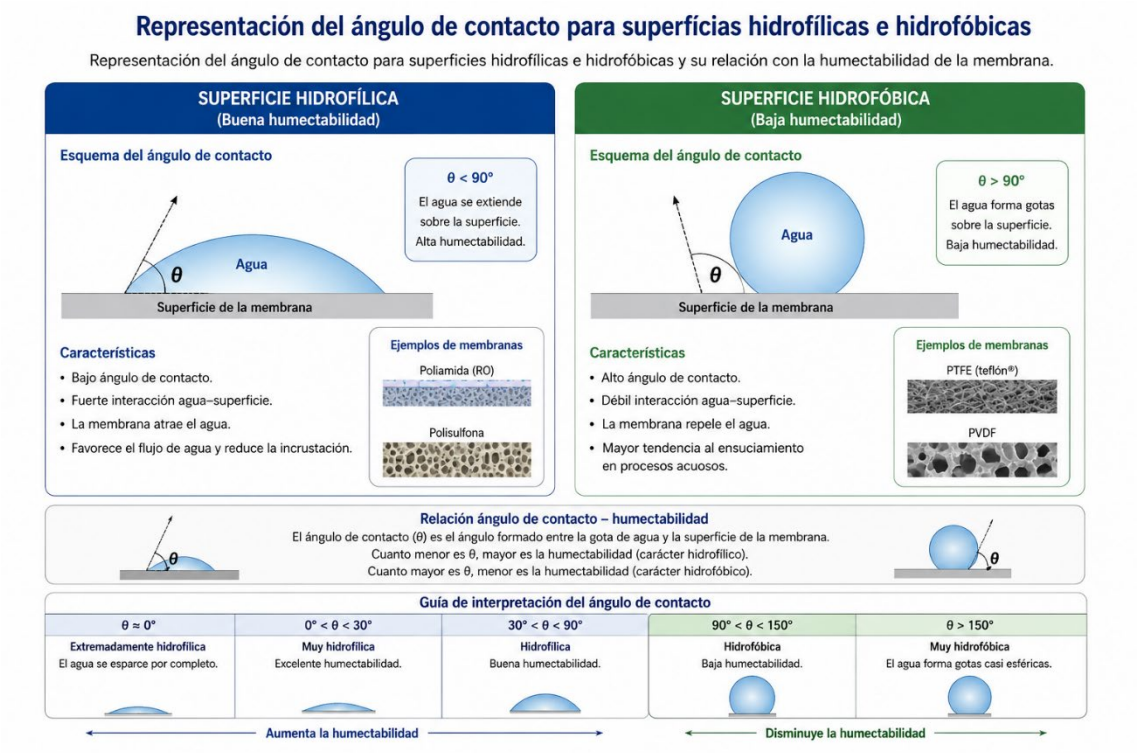
Un ángulo pequeño significa que el agua moja la superficie con facilidad, es decir, que esta es hidrofílica.

En cambio, los ángulos altos corresponden a superficies hidrofóbicas, que tienden más a adsorber compuestos orgánicos.

En general, cuanto menor es el ángulo de contacto, menos susceptible suele ser la membrana al fouling; por eso este parámetro se usa mucho para valorar tratamientos de modificación superficial.

Figura 3.2

Representación del ángulo de contacto para superficies hidrofílicas e hidrofóbicas



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012).

3.8.5 RESISTENCIA MECÁNICA

Las membranas deben soportar esfuerzos continuos durante miles de horas de operación. En consecuencia, la caracterización mecánica constituye una etapa indispensable para garantizar la confiabilidad del proceso.

Las pruebas mecánicas más comunes miden la tracción, la elasticidad (módulo), cuánto se alarga la membrana antes de romperse y la presión de estallido.

Estos parámetros permiten seleccionar adecuadamente los materiales para diferentes condiciones de presión y establecer factores de seguridad durante el diseño de recipientes y módulos de membranas.

En membranas compuestas, además, hay que revisar qué tan bien adhiere la capa activa al soporte estructural; si se delamina, el sistema puede fallar antes de lo previsto.

3.8.6 CARACTERIZACIÓN DEL DESEMPEÑO FRENTE AL FOULING

Cómo se ensucia una membrana es hoy uno de los criterios que más cuentan cuando se la elige para un proceso industrial.

La evaluación experimental suele realizarse mediante ensayos prolongados utilizando soluciones patrón que contienen proteínas, sustancias húmicas, coloides o microorganismos representativos del proceso real.

En esos ensayos se registran cómo evoluciona el flujo de permeado, cuánto crece la presión diferencial y qué parte del flujo se recupera una vez hecha la limpieza.

Estos resultados permiten clasificar las membranas según su resistencia relativa al fouling y estimar su comportamiento durante largos periodos de operación.

Tabla 3.8

Principales técnicas de caracterización de membranas.

Propiedad evaluada	**Técnica de caracterización**	**Información obtenida**	**Aplicación en ingeniería**
Morfología	SEM, TEM, AFM	Tamaño de poro, espesor y rugosidad	Diseño estructural
Composición química	FTIR, XPS, Raman	Grupos funcionales y composición superficial	Compatibilidad química
Propiedades hidráulicas	Ensayos de flujo	Permeabilidad y rechazo	Dimensionamiento de plantas
Hidrofilicidad	Ángulo de contacto	Humectabilidad superficial	Evaluación del fouling

Propiedad evaluada	Técnica de caracterización	Información obtenida	Aplicación en ingeniería
Propiedades mecánicas	Ensayos de tracción	Resistencia y deformación	Diseño mecánico
Resistencia al fouling	Ensayos de operación prolongada	Estabilidad del flujo	Evaluación del ciclo de vida

Nota. Elaboración propia.

La caracterización conecta la ciencia de materiales con la ingeniería de procesos. Quien investiga la usa para crear materiales; quien diseña, para elegir la membrana más adecuada, comprobar la calidad del producto que entrega el fabricante y averiguar por qué cae el rendimiento en operación. Esa unión entre caracterizar y diseñar sostiene la Ingeniería del Agua actual.

3.9 FABRICACIÓN INDUSTRIAL DE MEMBRANAS

El comportamiento de una membrana no depende únicamente del material empleado para su fabricación. Dos membranas elaboradas con el mismo polímero pueden presentar permeabilidades, selectividades y resistencias mecánicas completamente diferentes si han sido obtenidas mediante procesos de fabricación distintos.

Para la Ingeniería Química, hacer una membrana es transformar materiales, y en esa transformación intervienen la transferencia de masa y de calor, la cinética de la separación de fases y las reacciones químicas de polimerización. Con un control fino de esas variables se consiguen estructuras cuya porosidad, espesor y propiedades de superficie se ajustan a usos concretos.

Actualmente, la industria emplea diversos métodos de fabricación, siendo los más importantes la inversión de fases, la polimerización interfacial, el estiramiento de polímeros semicristalinos, la sinterización de materiales cerámicos y las técnicas de electrohilado (*electrospinning*). Cada uno de estos procedimientos genera estructuras diferentes y responde a necesidades tecnológicas particulares.

La selección del método de fabricación constituye una decisión estratégica, ya que determina no solo el desempeño técnico de la membrana, sino también su costo de producción, reproducibilidad y posibilidad de fabricación a escala industrial.

3.9.1 INVERSIÓN DE FASES

Para las membranas poliméricas de microfiltración y ultrafiltración, y para los soportes estructurales de las membranas compuestas, el método de fabricación más difundido es la inversión de fases.

Se parte de una solución homogénea en la que el polímero está disuelto en un solvente adecuado. Después se extiende una película fina sobre un soporte, y esta se sumerge en un baño de no solvente, casi siempre agua.

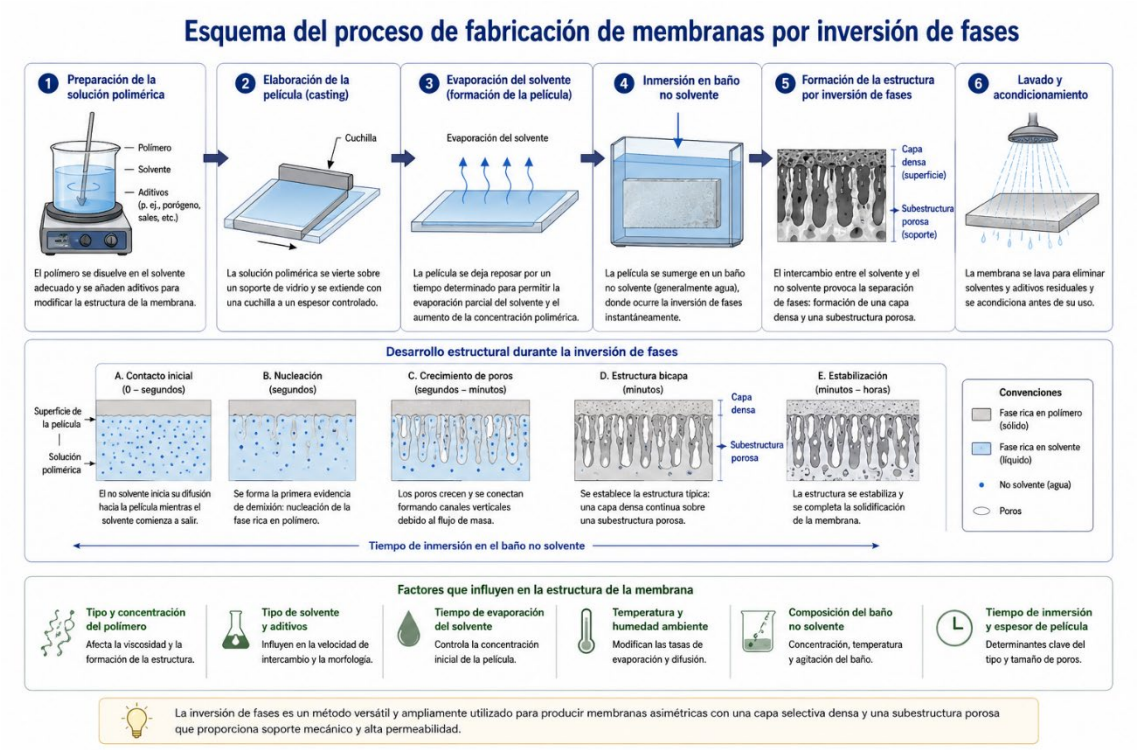
El intercambio de solvente y no solvente provoca la desestabilización termodinámica de la solución polimérica y produce la separación de fases. Como consecuencia, el polímero solidifica formando una estructura porosa cuya morfología depende de la velocidad del proceso y de las condiciones de operación.

Para modular la estructura se juega con la temperatura, la concentración del polímero, el tiempo de inmersión, la rapidez con que se evapora el solvente y el baño de coagulación (su composición).

En la práctica de ingeniería, basta una variación mínima en cualquiera de ellos para que cambien bastante cómo se distribuyen los poros, el espesor de su capa superficial y cuánto se resiste la membrana al paso del agua.

Figura 3.3.

Esquema del proceso de fabricación de membranas por inversión de fases.



Nota. Elaboración propia con base en Mulder (1996) y Baker (2012).

Interpretación ingenieril. El ingeniero de procesos debe comprender que el tamaño de poro no constituye una propiedad fija del polímero, sino el resultado del proceso de fabricación. En consecuencia, el control de las variables de producción resulta tan importante como la selección del material.

3.9.2 POLIMERIZACIÓN INTERFACIAL

En nanofiltración y ósmosis inversa, uno de los avances más significativos en fabricación ha sido la polimerización interfacial.

Dos monómeros, disueltos en fases que no se mezclan (por lo general una acuosa y otra orgánica), reaccionan solo en la interfase entre ambas. El resultado es una película polimérica finísima y muy selectiva.

Cuánto mide la capa activa y qué tan reticulada queda lo fijan tres factores: la velocidad de la reacción, la concentración de monómeros y el tiempo que están en contacto.

Con ello resulta una membrana compuesta cuya capa selectiva mide cientos de nanómetros, y que se apoya en una estructura microporosa obtenida previamente por inversión de fases.

Este método dio origen a las membranas de poliamida con que funciona hoy casi toda la desalinización a escala mundial.

Interpretación ingenieril. La extraordinaria productividad de las membranas modernas se debe, en gran medida, a la reducción del espesor de la capa activa. Una disminución del espesor reduce la resistencia al transporte de agua, incrementando el flujo de permeado sin comprometer significativamente el rechazo de sales.

3.9.3 ELECTROHILADO (*ELECTROSPINNING*)

El electrohilado constituye una tecnología relativamente reciente que permite fabricar fibras poliméricas con diámetros del orden de nanómetros.

Durante este proceso, una solución polimérica es sometida a un intenso campo eléctrico que genera un chorro extremadamente fino. A medida que el solvente se evapora, las fibras se depositan sobre un colector formando una estructura altamente porosa.

Las membranas obtenidas mediante electrohilado presentan elevada porosidad, baja resistencia hidráulica y una gran superficie específica, características particularmente atractivas para procesos de microfiltración, soporte de membranas compuestas y aplicaciones biomédicas.

La técnica sigue creciendo, sobre todo por la aparición de polímeros y materiales compuestos nuevos.

3.9.4 FABRICACIÓN DE MEMBRANAS CERÁMICAS

Las membranas cerámicas se fabrican de un modo bastante distinto al de las poliméricas.

El proceso comienza con la preparación de una suspensión de partículas cerámicas finamente divididas mezcladas con aglutinantes y aditivos que facilitan el conformado del material.

Posteriormente, la mezcla se moldea mediante extrusión, prensado o colado, dependiendo de la geometría requerida.

Una vez conformada, la pieza se somete a un tratamiento térmico de sinterización, durante el cual las partículas desarrollan uniones sólidas que confieren resistencia mecánica al conjunto.

El diámetro de poro final queda determinado por el tamaño inicial de las partículas, la temperatura de sinterización y cuánto tiempo permanece el material en el horno.

Con este procedimiento se logra una gran estabilidad térmica, que es de las mayores ventajas de las membranas cerámicas.

3.9.5 CONTROL DE CALIDAD DURANTE LA FABRICACIÓN

Para que el producto final sea uniforme, la fabricación industrial de membranas exige un control de calidad estricto.

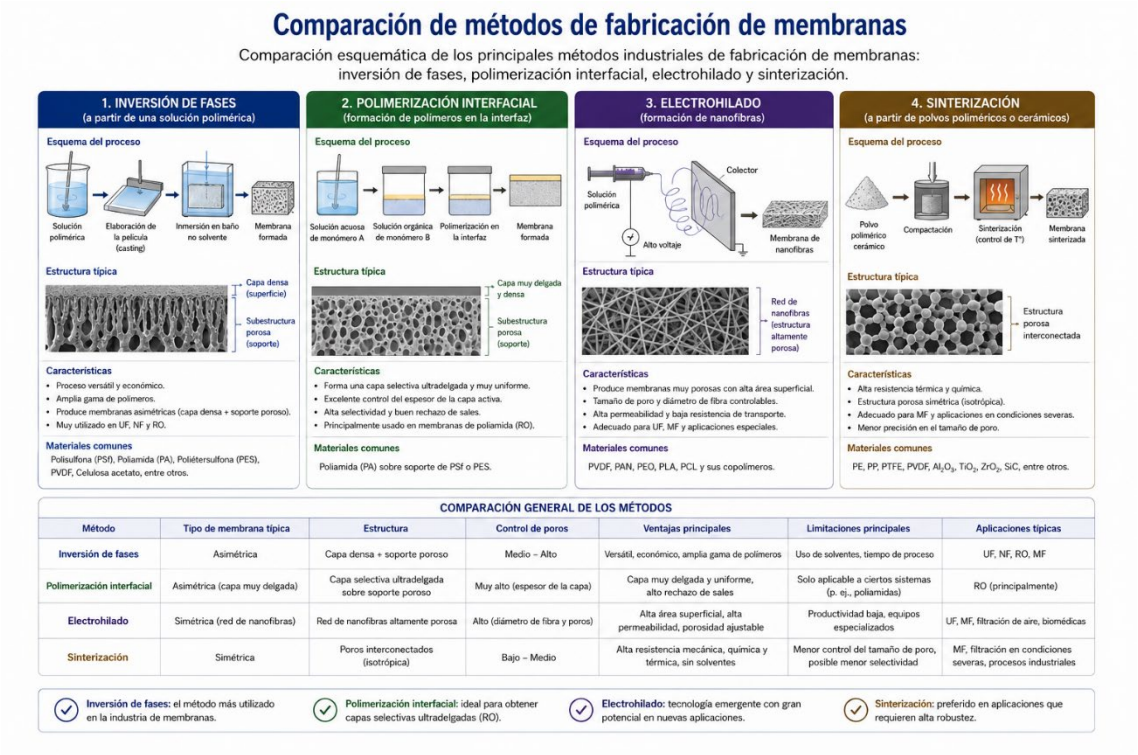
Como controles de rutina se miden el espesor, la resistencia mecánica, el rechazo con soluciones patrón y la permeabilidad hidráulica, y se revisa la distribución de tamaños de poro y que no existan defectos estructurales.

En la actualidad, muchas líneas de producción incorporan sistemas automáticos de inspección mediante visión artificial y técnicas de análisis no destructivo que permiten detectar defectos antes del ensamblaje de los módulos.

Desde la Ingeniería de Procesos, se vuelve imprescindible controlar estadísticamente la fabricación para que los resultados se repitan y varíen lo menos posible de un lote a otro.

Figura 3.4.

Comparación de métodos de fabricación de membranas



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Strathmann (2011).

Tabla 3.9

Comparación de los principales métodos de fabricación de membranas.

Método de fabricación	Materiales utilizados	Tipo de membrana obtenida	Aplicaciones principales
Inversión de fases	Polímeros	Microfiltración, ultrafiltración y soportes	Tratamiento de agua y aguas residuales
Polimerización interfacial	Poliamidas compuestas	Nanofiltración y ósmosis inversa	Desalinización y agua ultrapura
Electrohilado	Polímeros y nanocompuestos	Membranas nanofibrosas	Investigación y aplicaciones emergentes
Sinterización	Cerámicos	Membranas cerámicas	Industria química, minera y alimentaria
Deposición de capas delgadas	Materiales híbridos	Membranas funcionalizadas	Separaciones especializadas

Nota. Elaboración propia.

La evolución de las tecnologías de fabricación muestra que la química del material no explica por sí sola el rendimiento de una membrana. Al controlar la manufactura se modifican la arquitectura interna, la rugosidad superficial, el espesor de la capa activa y los poros que la atraviesan, y de estos parámetros dependen la permeabilidad, la selectividad y la resistencia al ensuciamiento. Por eso, en el diseño de membranas nuevas confluyen la Ingeniería de Procesos, la Ciencia de Materiales y la Ingeniería Química.

3.10 Selección de membranas para aplicaciones de Ingeniería del Agua

Al diseñar una planta de tratamiento de agua, pocas decisiones pesan tanto como la membrana. Una mala elección puede recortar la productividad, elevar el consumo de energía, causar ensuciamiento repetido y acortar la vida útil de la planta.

Se piensa a menudo, con error, que basta fijarse en el rechazo de sales (en porcentaje) o en el flujo de permeado que indica el fabricante. Eso es solo una parte. En Ingeniería de Procesos la membrana se elige ponderando juntos el agua de alimentación y su calidad, las metas del permeado, la hidráulica de operación, el mantenimiento que exige y el costo de todo el ciclo de vida del sistema.

Es mejor entender la selección como una metodología de ingeniería que combina datos técnicos, económicos y ambientales. Evaluar la membrana aislada no tiene sentido, porque es solo un componente del sistema.

3.10.1 Caracterización del agua de alimentación

Antes que nada, se hace un análisis completo del agua por tratar. Así se sabe qué contaminantes trae, qué tan propensa es a incrustar y qué mecanismos de ensuciamiento podrían dañar el desempeño de la membrana.

Son parámetros imprescindibles el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica, la turbidez, los sólidos disueltos totales, la alcalinidad y la dureza, además del índice de densidad de sedimentos; también la materia orgánica natural, el hierro, el manganeso, la sílice y el perfil iónico completo.

En aguas residuales industriales deben incorporarse además análisis específicos de aceites, grasas, solventes, compuestos fenólicos, metales pesados y contaminantes emergentes, ya que estos componentes pueden modificar significativamente la selección del material de la membrana.

Interpretación ingenieril. Ninguna membrana puede compensar la ausencia de información sobre la calidad del agua. La caracterización constituye el punto de partida de todo proyecto y condiciona el éxito de las etapas posteriores de diseño.

3.10.2 Definición de los objetivos del tratamiento

Ya conocida la calidad del agua que ingresa, corresponde precisar con claridad qué se espera del sistema.

En algunos proyectos el objetivo principal consiste en producir agua potable conforme a la normativa nacional. En otros casos puede requerirse agua desmineralizada para calderas, agua ultrapura para la industria electrónica, agua para hemodiálisis, agua para procesos farmacéuticos o agua destinada al reúso industrial o agrícola.

Cada aplicación establece requisitos diferentes de calidad, recuperación, confiabilidad y consumo energético.

Por esta razón, el ingeniero debe definir desde el inicio las especificaciones que deberá cumplir el permeado antes de seleccionar la tecnología de membranas.

3.10.3 Selección de la tecnología de membranas

El tipo de membrana se escoge, sobre todo, según la naturaleza del contaminante.

Cuando el objetivo consiste en remover sólidos suspendidos, algas o bacterias, las tecnologías de microfiltración suelen ofrecer resultados satisfactorios.

Si el proceso requiere eliminar macromoléculas, proteínas, virus o coloides, la ultrafiltración representa generalmente la alternativa más apropiada.

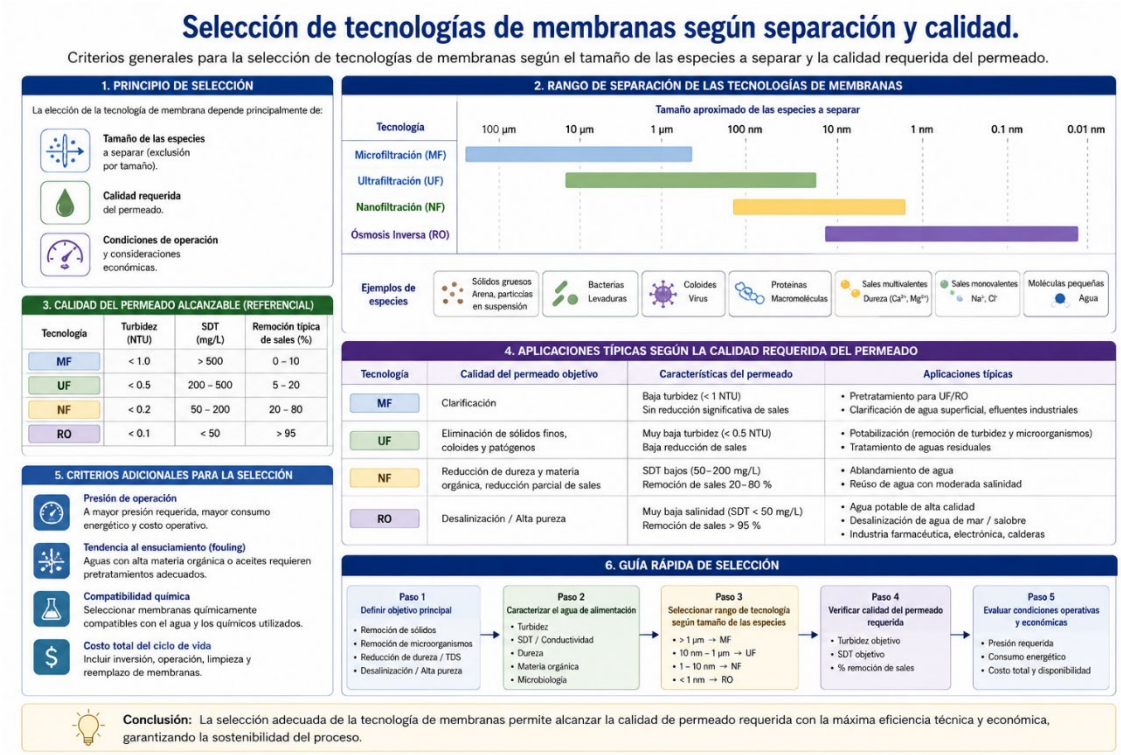
Cuando se quiere ablandar el agua, retirar parte de las sales divalentes o remover orgánicos de bajo peso molecular, la nanofiltración es una muy buena opción.

Por último, si lo que se quiere es eliminar casi todas las sales disueltas, desalinizar agua de mar o producir agua ultrapura, la tecnología de referencia es la ósmosis inversa.

Es importante destacar que estas tecnologías no compiten entre sí. Con frecuencia trabajan de manera complementaria dentro de una misma planta, donde cada una elimina un grupo específico de contaminantes.

Figura 3.5

Selección de tecnologías de membranas según separación y calidad.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Crittenden et al. (2012).

3.10.4 Selección del material de la membrana

Elegida la tecnología, se pasa a escoger el material que mejor responda a las condiciones concretas del proceso.

En aplicaciones convencionales de agua potable predominan las membranas poliméricas debido a su elevada productividad y menor costo.

Cuando el agua contiene agentes oxidantes o requiere limpiezas químicas frecuentes, puede ser necesario utilizar materiales con mayor estabilidad química.

En procesos industriales con temperaturas elevadas, corrientes abrasivas o medios altamente corrosivos, las membranas cerámicas constituyen frecuentemente la alternativa más confiable.

Antes de decidir la membrana definitiva hay que comprobar que sea químicamente compatible con los reactivos de limpieza.

3.10.5 Evaluación técnica y económica

La selección final requiere comparar diferentes alternativas considerando simultáneamente criterios técnicos y económicos.

Técnicamente se comparan la permeabilidad hidráulica, la estabilidad química, la capacidad de rechazar contaminantes, la resistencia mecánica, la resistencia al fouling y la vida útil prevista.

Económicamente se examinan la inversión inicial, la energía consumida, el gasto en limpieza química, el mantenimiento, la reposición de membranas y el destino de los módulos que ya no sirven.

La metodología del costo del ciclo de vida permite integrar todos estos factores y constituye actualmente la herramienta más utilizada para seleccionar tecnologías en proyectos de Ingeniería del Agua.

Tabla 3.10

Criterios de selección de membranas para diferentes aplicaciones.

Aplicación	Tecnología recomendada	Material predominante	Aspecto crítico de diseño
Agua potable	Ultrafiltración	PVDF, PES	Control del fouling
Ablandamiento	Nanofiltración	Poliamida	Recuperación e incrustaciones
Desalinización	Ósmosis inversa	Poliamida TFC	Presión osmótica y consumo energético
Reúso de aguas residuales	Ultrafiltración + Ósmosis inversa	PVDF y poliamida	Calidad del pretratamiento
Industria alimentaria	Ultrafiltración	PES, cerámicas	Limpieza química frecuente
Industria minera	Microfiltración y cerámicas	Alúmina, zirconia	Resistencia a sólidos abrasivos

Nota. Elaboración propia.

3.10.6 Procedimiento general para la selección de una membrana

En términos de metodología, la selección de una membrana se resume en esta secuencia de ingeniería:

1. Caracterizar completamente el agua de alimentación.
2. Definir la calidad requerida para el permeado.
3. Identificar los contaminantes que deben eliminarse.
4. Seleccionar la tecnología de membranas adecuada.
5. Evaluar la compatibilidad química del material.
6. Estimar la recuperación preliminar del sistema.
7. Calcular la presión de operación y el área requerida.

8. Comparar alternativas mediante análisis técnico-económico.
9. Validar la selección mediante pruebas piloto cuando sea necesario.
10. Desarrollar el diseño definitivo de la planta.

Figura 3.6.

Ruta metodológica para elegir membranas en los proyectos de agua.



Nota. Elaboración propia.

La selección de una membrana no debe considerarse una decisión aislada, sino una etapa integrada dentro del diseño global del sistema. Una membrana técnicamente adecuada puede ofrecer un desempeño insatisfactorio si el pretratamiento es insuficiente, si las condiciones hidráulicas no son apropiadas o si la estrategia de operación no controla adecuadamente el fouling y la polarización por concentración. Por ello, el ingeniero debe analizar el proceso como un sistema completo, donde la membrana constituye el componente central, pero no el único determinante del desempeño.

3.11 INNOVACIÓN Y TENDENCIAS FUTURAS EN MATERIALES PARA MEMBRANAS

Cada vez se demanda más agua potable en el mundo, se necesita mayor eficiencia energética en los procesos de separación y surgen contaminantes nuevos. Todo esto ha

estimulado una intensa investigación para obtener materiales con mejores prestaciones que las de las membranas convencionales.

Actualmente, la innovación en membranas no se centra únicamente en aumentar la permeabilidad o el rechazo de contaminantes. La tendencia consiste en desarrollar materiales multifuncionales capaces de responder dinámicamente a las condiciones de operación, reducir el consumo energético, minimizar el ensuciamiento y facilitar las operaciones de limpieza.

Este nuevo enfoque ha hecho coincidir a la Nanotecnología, la Biotecnología, la Ciencia de Materiales, la Inteligencia Artificial y la Ingeniería Química, y así surgió una generación de membranas inteligentes.

3.11.1 MEMBRANAS BIOMIMÉTICAS

Una de las vías más prometedoras es fabricar membranas que imitan los sistemas biológicos con que los organismos transportan agua.

En las células vegetales y animales, el paso del agua ocurre mediante proteínas especializadas conocidas como acuaporinas. Estas proteínas permiten el transporte extremadamente rápido de moléculas de agua mientras restringen el paso de la mayoría de los solutos e iones.

La incorporación de acuaporinas o de estructuras sintéticas que imitan su funcionamiento ha permitido desarrollar membranas con elevados niveles de permeabilidad y selectividad.

La producción a gran escala todavía enfrenta retos tecnológicos de estabilidad y de costo, aunque estas membranas ocupan un lugar destacado entre las líneas de investigación que podrían recortar el gasto energético de la desalinización.

Interpretación ingenieril. La naturaleza demuestra que es posible combinar alta permeabilidad y elevada selectividad. El reto de la ingeniería consiste en reproducir estos mecanismos mediante materiales estables, económicos y aptos para aplicaciones industriales.

3.11.2 MEMBRANAS AUTORREPARABLES

Otro campo emergente corresponde al desarrollo de membranas capaces de reparar automáticamente pequeños defectos generados durante la operación.

Incorporan componentes que reaccionan ante las microfisuras o los daños estructurales y, con ello, devuelven en parte a la membrana sus propiedades de origen.

La mayoría de estos trabajos todavía está en etapa experimental. Aun así, podrían alargar notablemente la duración útil de cada membrana y reducir los costos que implica reemplazarlas.

3.11.3 FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva, conocida comúnmente como impresión tridimensional, comienza a incorporarse al desarrollo de componentes para sistemas de membranas.

Esta tecnología permite fabricar soportes con geometrías altamente complejas, imposibles de obtener mediante procesos convencionales de manufactura.

En el futuro, la impresión tridimensional podría facilitar el diseño de canales de flujo optimizados, espaciadores con menor pérdida de carga y módulos adaptados a aplicaciones específicas.

Aunque todavía no constituye un método ampliamente utilizado para fabricar membranas comerciales, representa una herramienta de gran interés para investigación, prototipado rápido y desarrollo de nuevos diseños hidráulicos.

3.11.4 INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA AL DISEÑO DE MEMBRANAS

Con más capacidad de cómputo y algoritmos de aprendizaje automático, el diseño de materiales tiene hoy opciones que antes no existían.

Hoy existen modelos de inteligencia artificial que revisan volúmenes enormes de datos experimentales y relacionan la composición química de la membrana con las propiedades funcionales que presenta.

Estas herramientas facilitan la identificación de combinaciones de materiales con elevado potencial, reduciendo el tiempo necesario para desarrollar nuevas membranas mediante experimentación convencional.

También se empiezan a emplear modelos predictivos para estimar cómo responderá la membrana al fouling, optimizar las condiciones de operación y ayudar a elegir materiales según las características del agua.

Hay que subrayar que estas herramientas acompañan el conocimiento del ingeniero sin reemplazarlo, y sus resultados siguen necesitando validación experimental.

3.11.5 SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR

Hoy uno de los grandes retos es disminuir el impacto ambiental de fabricar las membranas y de disponer de ellas al final de su vida.

Figura 3.7

Tendencias actuales en el desarrollo de membranas



Nota. Elaboración propia con base en la literatura científica reciente sobre materiales avanzados para membranas.

Las líneas de trabajo apuntan a polímeros de fuentes renovables, solventes menos tóxicos en la fabricación y procedimientos para recuperar los materiales de las membranas que salen de servicio.

Paralelamente, se investigan estrategias para reutilizar módulos agotados en aplicaciones menos exigentes, prolongando su vida útil antes de la disposición final.

Estas iniciativas van de la mano de la economía circular y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible que tratan la gestión sostenible del agua y la producción responsable.

Tabla 3.11

Principales tendencias tecnológicas en materiales para membranas

Tendencia	Objetivo principal	Estado de desarrollo	Potencial de aplicación
Membranas biomiméticas	Incrementar permeabilidad y selectividad	Desarrollo avanzado	Muy alto
Membranas autorreparables	Aumentar la vida útil	Investigación	Alto
Materiales híbridos y nanocompuestos	Reducir el fouling y mejorar el transporte	Comercial emergente	Muy alto
Fabricación aditiva	Optimizar geometrías y módulos	Desarrollo inicial	Alto
Inteligencia artificial	Diseño y optimización de materiales	Crecimiento acelerado	Muy alto
Materiales sostenibles	Reducir el impacto ambiental	Desarrollo continuo	Muy alto

Nota. Elaboración propia.

Lo ocurrido con las membranas apunta a que el tratamiento de agua dependerá cada vez más de saber combinar automatización, diseño computacional, materiales avanzados e inteligencia artificial. El éxito de estas innovaciones, sin embargo, seguirá apoyado en lo que se vio antes: la transferencia de masa, la termodinámica, la hidráulica y la ciencia de materiales. Lejos de reemplazar esos fundamentos, las tecnologías nuevas les abren más aplicaciones.

3.12 CRITERIOS DE INGENIERÍA

El ingeniero que concluya este capítulo debe quedarse con una idea: seleccionar una membrana es una decisión estratégica, porque marca el desempeño de la planta completa. Los criterios a continuación resumen lo más importante del capítulo.

Criterio 1. La selección del material debe comenzar con la caracterización del agua y no con la consulta de un catálogo comercial.

Criterio 2. La permeabilidad y la selectividad deben evaluarse conjuntamente; una membrana altamente permeable no necesariamente producirá la mejor solución de ingeniería.

Criterio 3. El costo inicial representa solo una parte del costo total del sistema. Deben considerarse también la vida útil, el consumo energético, la frecuencia de limpieza y el costo de reemplazo.

Criterio 4. La compatibilidad química entre la membrana y los reactivos de limpieza debe verificarse durante la etapa de diseño.

Criterio 5. La modificación superficial puede resultar más eficiente que el desarrollo de nuevos polímeros para reducir el fouling en determinadas aplicaciones.

Criterio 6. Las membranas cerámicas constituyen una alternativa técnica cuando las condiciones de operación exceden las capacidades de los materiales poliméricos.

Criterio 7. La fabricación determina en gran medida las propiedades finales de la membrana; materiales idénticos pueden presentar desempeños diferentes según el proceso de manufactura.

Criterio 8. La validación mediante ensayos piloto continúa siendo una etapa indispensable antes de la implementación de proyectos de gran escala.

Criterio 9. Las innovaciones en materiales deben evaluarse mediante criterios de desempeño técnico, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental.

Criterio 10. La mejor membrana no es aquella que presenta las mayores prestaciones en laboratorio, sino la que mantiene un desempeño estable y confiable durante toda la vida útil de la planta.

CAPÍTULO 4

MICROFILTRACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

La microfiltración ofrece la menor selectividad entre las tecnologías de membranas y, aun así, es de las más usadas en los sistemas modernos para tratar agua. Parece sencilla, pero aplicarla bien obliga a entender cómo interactúan la hidráulica del sistema, la membrana, la naturaleza de las partículas en suspensión y el ensuciamiento, cuyos mecanismos limitan su desempeño.

En Ingeniería del Agua, la microfiltración representa el punto de partida de numerosos esquemas de tratamiento mediante membranas. Su función principal consiste en eliminar sólidos suspendidos, algas, bacterias, protozoarios y otras partículas de tamaño micrométrico, proporcionando un agua clarificada que puede destinarse directamente al consumo humano o emplearse como alimentación para procesos posteriores como ultrafiltración, nanofiltración u ósmosis inversa.

Su desarrollo industrial se dio a partir de mediados del siglo XX, primero para la industria farmacéutica y la alimentaria. Más adelante, la exigencia de producir agua potable con más seguridad microbiológica la llevó a las plantas municipales y a los sistemas que reutilizan aguas residuales.

Es hoy una tecnología madura: trabaja sin interrupciones, de forma totalmente automática y con gran confiabilidad. Su rendimiento, no obstante, está muy ligado a que el diseño hidráulico sea correcto, a que haya pretratamiento y a las estrategias de limpieza que se implementen al operar.

Visto desde la Ingeniería Química, es un proceso de separación dominado por el transporte convectivo y por la exclusión según el tamaño. En contraste con lo que ocurre en ósmosis inversa y nanofiltración, aquí la presión osmótica no restringe de forma relevante, y el agua circula por una red de poros abiertos sobre la superficie de la membrana.

Comprender estos fundamentos permitirá seleccionar correctamente las condiciones de operación, estimar la productividad del sistema y minimizar los problemas asociados al ensuciamiento.

4.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA MICROFILTRACIÓN

Se trata de una separación física: un líquido atraviesa una membrana porosa por efecto de una diferencia de presión relativamente baja. Si las partículas son mayores que el diámetro efectivo de poro, se quedan en la superficie o dentro de la estructura porosa; hacia el permeado van el agua y también las especies disueltas.

En términos hidrodinámicos, se puede describir el paso del agua como un flujo por una red de capilares microscópicos. El tamaño de los poros, la porosidad total, el espesor de la membrana y la viscosidad del agua determinan cuánta resistencia encuentra el fluido.

El mecanismo predominante de separación es la exclusión por tamaño (*size exclusion*). Esto significa que la membrana no distingue entre las partículas por su naturaleza química, sino por sus dimensiones físicas respecto al diámetro de los poros.

Pero en la práctica también actúan la adsorción, las interacciones electrostáticas y las capas de filtración que se forman sobre la membrana; todos estos fenómenos van modificando el comportamiento hidráulico del sistema a medida que pasa el tiempo.

Interpretación ingenieril. Aunque el tamaño de poro constituye el principal criterio de selección, no debe asumirse que todas las partículas menores que el diámetro nominal atravesarán la membrana. La forma de las partículas, su deformabilidad, las interacciones superficiales y la formación de tortas de filtración pueden alterar significativamente la eficiencia real de separación.

4.2.1 MECANISMO DE EXCLUSIÓN POR TAMAÑO

Se puede imaginar el principio de funcionamiento como el paso de partículas por una malla microscópica: lo que es mayor que las aberturas queda retenido, y el agua, junto con las partículas suficientemente pequeñas, cruza la membrana empujada por la presión aplicada.

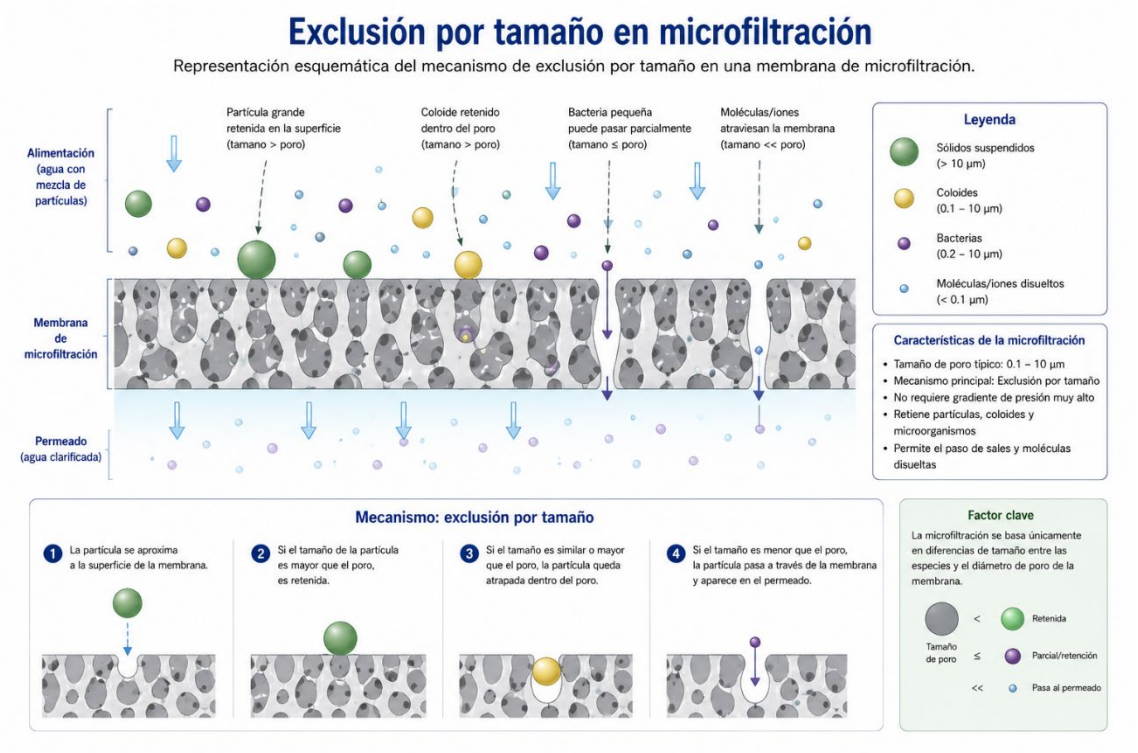
Sin embargo, una membrana moderna es bastante más compleja que una malla, tanto por su distribución de tamaños de poro como por su estructura en tres dimensiones.

Los poros siguen recorridos tortuosos y tienen distinta longitud; por eso retener o no una partícula depende del diámetro efectivo y además de cómo es el interior del material.

El rendimiento de la separación mejora si los poros tienen un tamaño parejo y la capa selectiva conserva el mismo grosor durante la fabricación.

Figura 4.1.

Exclusión por tamaño en microfiltración



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012) y Mulder (1996).

4.2.2 TAMAÑO DE PORO Y CAPACIDAD DE SEPARACIÓN

Las membranas de microfiltración presentan generalmente diámetros de poro comprendidos entre **0,1 y 10 µm**, aunque los valores más utilizados en tratamiento de agua oscilan entre **0,1 y 1,0 µm**.

El tamaño de poro se escoge según las especies que se quieren remover y la pérdida de carga que se acepta en operación.

Poros de menor diámetro incrementan la eficiencia de retención de microorganismos y partículas finas, pero también aumentan la resistencia hidráulica y la tendencia al ensuciamiento.

En cambio, con poros mayores se consiguen flujos más altos, pero se separa peor lo que es pequeño.

En el diseño, el tamaño de poro tiene que equilibrar la productividad con la calidad del agua tratada.

Tabla 4.1

Cómo se vincula el tamaño de los contaminantes con lo que la microfiltración puede separar

Tamaño aproximado	Contaminante	Comportamiento en microfiltración
>10 µm	Arena fina	Retención completa
1–10 µm	Algas y sólidos suspendidos	Retención muy elevada
0,5–5 µm	Protozoarios	Retención elevada
0,2–2 µm	Bacterias	Generalmente retenidas
0,02–0,30 µm	Virus	Retención parcial; depende del tamaño y de la membrana
<0,01 µm	Sales disueltas	Atraviesan la membrana

Nota. Elaboración propia.

4.2.3 PRESIÓN TRANSMEMBRANA

La fuerza impulsora de la microfiltración es la diferencia de presión existente entre la alimentación y el permeado, conocida como **presión transmembrana (PTM o TMP, *Transmembrane Pressure*)**.

La presión transmembrana es la presión efectiva que hace pasar el agua por la membrana, y es una de las variables de operación más relevantes en el diseño.

En términos generales puede estimarse mediante la siguiente relación.

Ecuación 4.1. Presión transmembrana

$$PTM = (\text{Presión de alimentación} + \text{Presión del concentrado}) /2 - \text{Presión del permeado}$$

Forma abreviada:

$$TMP = (Pf + Pc) /2 - Pp$$

donde:

TMP = presión transmembrana

Pf = presión de alimentación

Pc = presión en la corriente de concentrado

Pp = presión del permeado

En plantas de microfiltración, la presión transmembrana suele encontrarse entre **0,1 y 2 bar**, valores considerablemente menores que los utilizados en nanofiltración y ósmosis inversa.

Interpretación ingenieril. Incrementar la presión transmembrana no implica necesariamente un aumento proporcional del flujo de permeado. Una vez que comienza la formación de la capa de sólidos sobre la membrana, el sistema puede alcanzar un régimen donde aumentos adicionales de presión producen incrementos muy pequeños del flujo y aceleran el ensuciamiento. Por ello, el diseño debe identificar la presión óptima de operación y no simplemente la máxima presión admisible por el equipo.

4.3 CONFIGURACIONES DE FLUJO Y MODOS DE OPERACIÓN

Lo que ocurre hidráulicamente en una membrana también depende del modo en que el agua recorre el sistema, no solo de la estructura de la membrana. La orientación del flujo con respecto a la superficie fija cuán rápido se acumulan las partículas, cómo se forma la torta de filtración, cuánta carga se pierde y cada cuánto se limpia.

Desde el punto de vista de la Ingeniería del Agua, existen dos configuraciones fundamentales de operación: la **filtración frontal** (*dead-end filtration*) y la **filtración de flujo tangencial** (*crossflow filtration*). Ambas utilizan el mismo principio de separación por tamaño, pero presentan diferencias importantes en cuanto a productividad, consumo energético y control del ensuciamiento.

El diseñador debe resolver entre ambos esquemas teniendo en cuenta, a la vez, los costos de operación, la continuidad del proceso, los sólidos suspendidos y la calidad del agua que se alimenta.

4.3.1 FILTRACIÓN FRONTAL (DEAD-END FILTRATION)

En la filtración frontal, la totalidad del caudal de alimentación se dirige perpendicularmente hacia la superficie de la membrana. El agua atraviesa los poros mientras que las partículas retenidas permanecen sobre la superficie, formando progresivamente una capa de sólidos conocida como **torta de filtración**.

Este modo de operación presenta una elevada eficiencia hidráulica, ya que prácticamente toda el agua alimentada se transforma en permeado durante cada ciclo de filtración. Sin embargo, la acumulación continua de sólidos provoca un incremento

progresivo de la resistencia hidráulica, reduciendo el flujo de permeado conforme avanza la operación.

Por esta razón, la filtración frontal requiere interrupciones periódicas para realizar operaciones de retrolavado (*backwash*) o limpieza química que permitan eliminar la capa de sólidos acumulada.

Se usa mucho en plantas de agua potable con pocos sólidos suspendidos y en instalaciones que pueden trabajar alternando ciclos de filtración y de limpieza.

Figura 4.2

*Sistema de microfiltración de filtración frontal (*dead-end*).*



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012) y Crittenden et al. (2012).

Interpretación ingenieril. La filtración frontal resulta especialmente eficiente cuando el agua presenta baja turbidez y reducido contenido de sólidos. En estas condiciones, la formación de la torta ocurre lentamente y los intervalos entre retrolavados pueden prolongarse, mejorando la productividad global del sistema.

4.3.2 FILTRACIÓN DE FLUJO TANGENCIAL (CROSSFLOW FILTRATION)

En el modo tangencial, el agua se desplaza en paralelo a la membrana y solo una fracción del caudal pasa por los poros y se convierte en permeado.

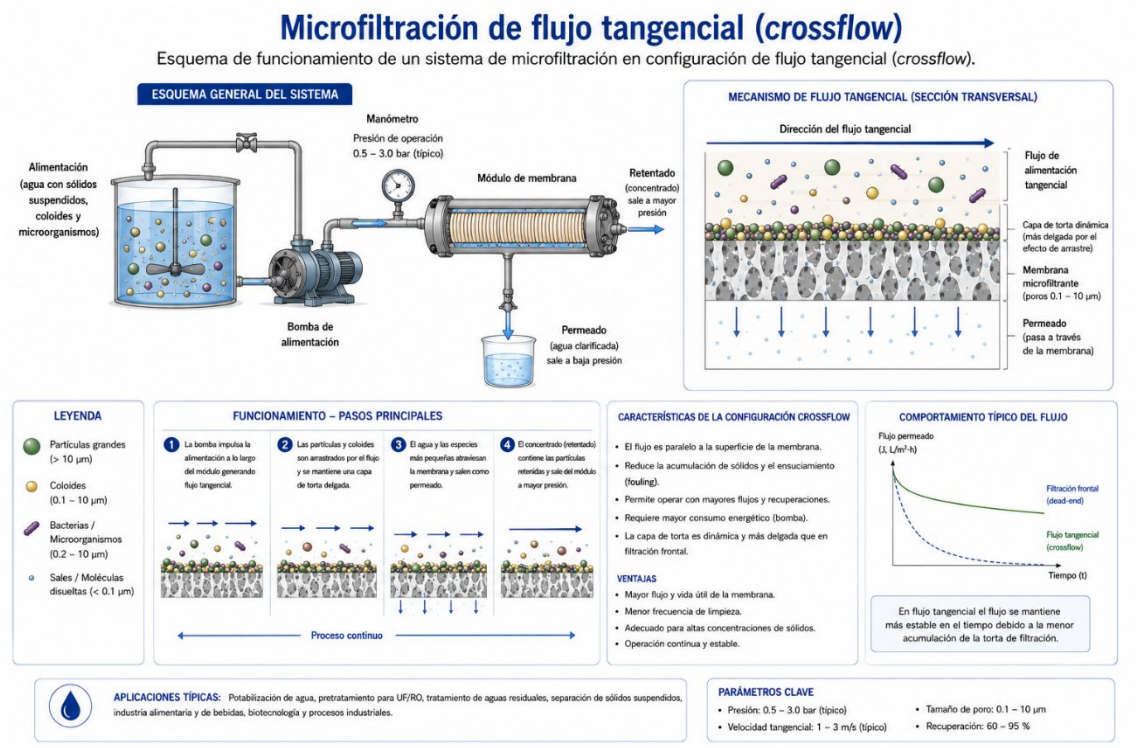
El agua que sigue deslizándose por la superficie arrastra buena parte de las partículas retenidas; así la torta de filtración se forma más lento y el fouling pierde intensidad.

Como consecuencia, este modo de operación permite mantener un flujo de permeado más estable durante periodos prolongados, aunque requiere mayores velocidades de circulación y, por tanto, un mayor consumo energético asociado al bombeo.

El flujo tangencial constituye la configuración predominante en nanofiltración, ósmosis inversa y numerosas aplicaciones industriales donde la concentración de sólidos es elevada.

Figura 4.3

*Microfiltración de flujo tangencial (*crossflow*)*



Nota. Elaboración propia con base en Mulder (1996) y Baker (2012).

Interpretación ingenieril. La velocidad tangencial no debe incrementarse indefinidamente. Aunque favorece la transferencia de masa y reduce la formación de depósitos, también aumenta las pérdidas de carga y el consumo energético. El diseño óptimo consiste en encontrar una velocidad que minimice el fouling sin penalizar excesivamente la eficiencia energética del sistema.

4.3.3 COMPARACIÓN ENTRE AMBAS CONFIGURACIONES

Mirándolo como diseño, ninguna configuración es mejor en términos absolutos, pues cada una resuelve condiciones de operación distintas.

La filtración frontal ofrece simplicidad operacional, menores requerimientos de bombeo y alta recuperación instantánea del agua. No obstante, su productividad disminuye progresivamente debido a la acumulación de sólidos sobre la membrana.

La filtración tangencial mantiene una operación más estable y permite tratar corrientes con mayores concentraciones de sólidos, aunque requiere equipos hidráulicos más complejos y un mayor consumo energético.

Se decide balanceando la inversión inicial, los costos de operación, la calidad del agua y la continuidad del proceso.

Tabla 4.2

Comparación entre filtración frontal y filtración de flujo tangencial.

Característica	Filtración frontal	Flujo tangencial
Dirección del flujo	Perpendicular a la membrana	Paralela a la membrana
Formación de torta	Rápida	Más lenta
Consumo energético	Bajo	Moderado a alto
Frecuencia de limpieza	Mayor	Menor
Complejidad hidráulica	Baja	Alta
Aplicaciones típicas	Agua potable de baja turbidez	Efluentes industriales, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa

Nota. Elaboración propia.

4.3.4 FORMACIÓN DE LA TORTA DE FILTRACIÓN

Al operar sin pausa, lo que la membrana retiene empieza a asentarse en su superficie y forma otra capa porosa encima.

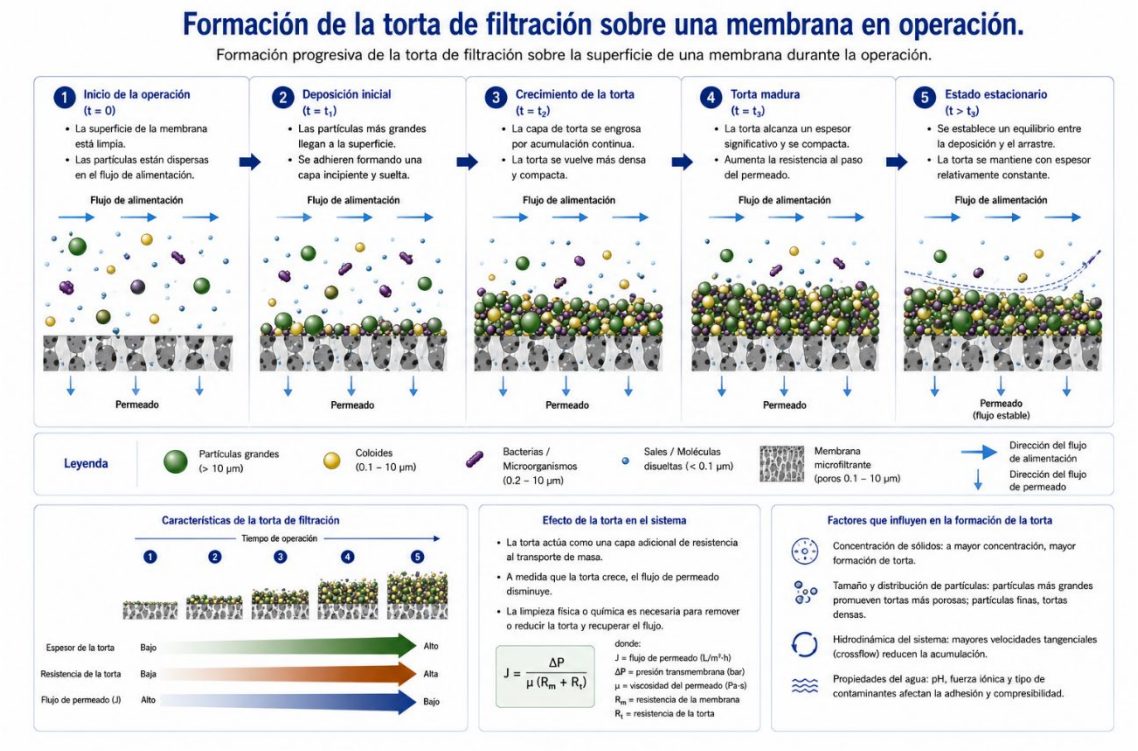
Inicialmente esta capa puede mejorar ligeramente la eficiencia de separación al actuar como un medio filtrante secundario. Sin embargo, conforme aumenta su espesor, también incrementa la resistencia hidráulica, reduciendo el flujo de permeado y aumentando la presión necesaria para mantener la producción.

Para el diseño, esa torta de filtración es una resistencia extra que hay que incluir al calcular el flujo de operación y al programar los ciclos de limpieza.

En algunas aplicaciones, sobre todo en aguas residuales, la resistencia de la torta puede ser mucho mayor que la resistencia intrínseca de la membrana misma.

Figura 4.4

Formación de la torta de filtración sobre una membrana en operación.



Nota. Elaboración propia.

4.3.5 SELECCIÓN DEL MODO DE OPERACIÓN

Para elegir entre filtración frontal y flujo tangencial hay que considerar en conjunto la calidad del agua, el caudal necesario, los sólidos suspendidos y la energía con que se cuenta.

En plantas municipales de agua potable con baja turbidez suele preferirse la filtración frontal debido a su simplicidad y menor consumo energético.

En procesos industriales donde predominan elevadas concentraciones de sólidos, coloides o materia orgánica, el flujo tangencial proporciona una mayor estabilidad operacional y reduce la frecuencia de limpiezas químicas.

Asimismo, en sistemas integrados de membranas es frecuente combinar ambas configuraciones. Por ejemplo, una etapa inicial de microfiltración en modo frontal puede preceder a una etapa de ultrafiltración u ósmosis inversa operando en flujo tangencial, optimizando el desempeño global de la planta.

Caso de ingeniería

Tomemos una planta que provee agua a una industria farmacéutica. En época seca, su fuente superficial tiene turbidez por debajo de 5 NTU y pocos sólidos suspendidos. En lluvias, a veces la turbidez sobrepasa los 200 NTU.

Una opción conveniente de diseño es poner coagulación-floculación y sedimentación delante de la microfiltración. Así la membrana recibe sólidos en una cantidad bastante estable todo el año, se requieren menos retrolavados, las membranas duran más y el sistema opera de manera más estable.

El ejemplo deja claro que el desempeño de la membrana depende del diseño del pretratamiento tanto como de ella misma. Hay que optimizar tomando la planta como un solo sistema, no como equipos aislados.

4.4 MATERIALES, CONFIGURACIONES DE MÓDULOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO

Una membrana individual posee una superficie relativamente pequeña y, por sí sola, no permite tratar los grandes caudales requeridos en aplicaciones industriales. Para incrementar el área efectiva de separación, las membranas se ensamblan dentro de estructuras denominadas módulos, cuyo objetivo consiste en proporcionar una elevada superficie filtrante ocupando el menor volumen posible.

Para la Ingeniería de Procesos, la unidad básica al diseñar una planta de membranas es el módulo. La forma que se le dé influye directamente en el reparto del flujo, en las pérdidas de carga, en la limpieza, en el consumo energético y en la opción de ampliar la planta después.

En microfiltración predominan cuatro configuraciones industriales: módulos de fibra hueca, tubulares, espiralados y de placas y marcos. Cada una presenta ventajas específicas y responde a condiciones particulares de operación.

4.4.1 MÓDULOS DE FIBRA HUECA

Hoy la fibra hueca es la configuración de módulo más extendida en las plantas municipales de agua potable y de reutilización de aguas residuales.

Están formados por miles de fibras cilíndricas de pequeño diámetro agrupadas dentro de una carcasa. Cada fibra funciona como una membrana individual, proporcionando una elevada superficie de filtración en un volumen reducido.

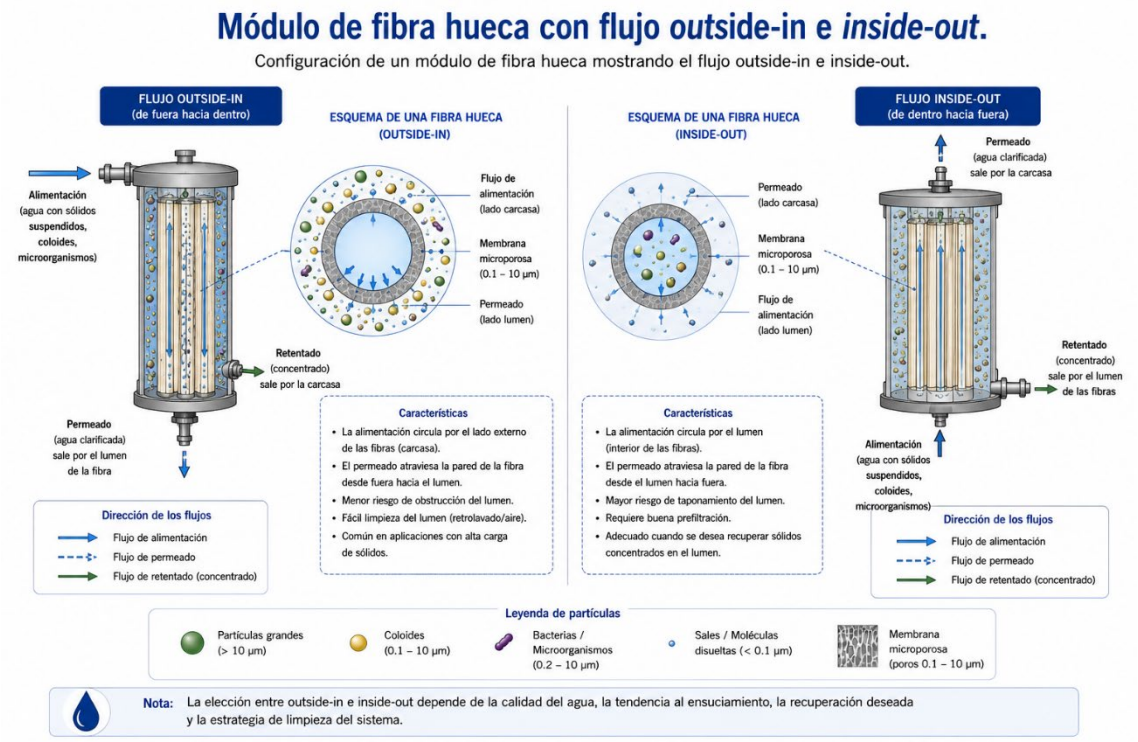
Dependiendo del diseño, el agua puede circular desde el exterior hacia el interior de la fibra (**outside-in**) o en sentido contrario (**inside-out**). La primera configuración es la más utilizada en tratamiento de agua debido a su mayor facilidad para realizar operaciones de retrolavado.

Entre sus principales ventajas destacan la elevada densidad de empaquetamiento, el reducido espacio requerido y la facilidad para automatizar los ciclos de filtración y limpieza.

Sin embargo, estas membranas son más sensibles a la obstrucción cuando el agua contiene grandes cantidades de sólidos o fibras largas que pueden acumularse entre los filamentos.

Figura 4.5

Módulo de fibra hueca con flujo *outside-in* e *inside-out*.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012) y Crittenden et al. (2012).

Interpretación ingenieril. Los módulos de fibra hueca ofrecen una excelente relación área/volumen, característica que reduce el espacio ocupado por la planta. No obstante, el diseño hidráulico debe asegurar una distribución uniforme del flujo entre todas las fibras para evitar zonas de sobrecarga que aceleren el ensuciamiento.

4.4.2 MÓDULOS TUBULARES

Los módulos tubulares utilizan membranas instaladas sobre tubos de diámetro relativamente grande, generalmente entre 5 y 25 mm.

Esta configuración admite corrientes con lodos, partículas abrasivas o una alta concentración de sólidos suspendidos, ya que el diámetro mayor deja circular mejor el fluido y evita obstrucciones.

También admite velocidades tangenciales altas, que ayudan a desprender los depósitos acumulados sobre la membrana.

Su mayor limitación es que ofrece menos área filtrante por volumen que otras configuraciones, así que la instalación ocupa más espacio y la inversión inicial sube.

Por ello los módulos tubulares se reservan sobre todo para usos industriales, donde importa más resistir el ensuciamiento que ser compactos.

4.4.3 MÓDULOS ESPIRALADOS

Los módulos espiralados constituyen la configuración predominante en nanofiltración y ósmosis inversa, aunque también pueden emplearse en determinadas aplicaciones de microfiltración con aguas de baja carga de sólidos.

Su diseño consiste en enrollar varias hojas de membrana separadas por espaciadores alrededor de un tubo colector central. Esta disposición proporciona una elevada superficie efectiva en un volumen reducido.

Su mayor virtud es la compacidad, junto con un costo bajo por cada unidad de área de membrana.

Sin embargo, presentan canales relativamente estrechos que pueden obstruirse cuando el agua contiene elevadas concentraciones de sólidos suspendidos, razón por la cual requieren un pretratamiento más exigente.

Al diseñar, los módulos espiralados solo deben elegirse si la calidad del agua asegura un riesgo bajo de obstrucción.

4.4.4 MÓDULOS DE PLACAS Y MARCOS

Los módulos de placas y marcos están constituidos por membranas planas montadas entre placas rígidas que forman canales independientes para la alimentación y el permeado.

Con esta configuración es sencillo llegar a las membranas para inspeccionarlas, limpiarlas o cambiarlas; resulta por ello muy útil en laboratorios, plantas piloto y procesos que exigen gran flexibilidad de operación.

Su principal limitación corresponde a la menor densidad de empaquetamiento respecto a las configuraciones de fibra hueca o espiraladas.

No obstante, la facilidad de mantenimiento continúa haciendo de estos módulos una alternativa atractiva para aplicaciones especiales y procesos de investigación.

Tabla 4.3.

Comparación de las principales configuraciones de módulos de microfiltración

Configuración	Densidad de área	Tolerancia a sólidos	Facilidad de limpieza	Aplicaciones principales
Fibra hueca	Muy alta	Moderada	Alta	Agua potable y reúso
Tubular	Baja	Muy alta	Muy alta	Efluentes industriales y lodos
Espiralada	Alta	Baja	Moderada	Corrientes de baja turbidez
Placas y marcos	Moderada	Alta	Muy alta	Plantas piloto e investigación

Nota. Elaboración propia.

4.4.5 PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE MÓDULOS

Para elegir un módulo no basta su geometría. Hay otros parámetros que deben evaluarse a la vez durante el diseño.

El primero corresponde al **área efectiva de membrana**, que determina la capacidad de producción del módulo y constituye el parámetro básico para calcular el número de unidades requeridas.

Otro parámetro importante es la **densidad de empaquetamiento**, definida como el área de membrana instalada por unidad de volumen del módulo. Valores elevados permiten reducir el espacio ocupado por la planta, aunque pueden dificultar la limpieza y favorecer distribuciones no uniformes del flujo.

La **velocidad tangencial** representa otra variable crítica, especialmente en configuraciones de flujo cruzado. Una velocidad insuficiente favorece la acumulación de sólidos, mientras que velocidades excesivas incrementan el consumo energético y el desgaste hidráulico.

Asimismo, el diseño debe considerar la **pérdida de carga**, ya que esta influye directamente sobre la potencia de bombeo y el costo operativo del sistema.

Ecuación 4.2. Producción de un módulo de membranas

```
Producción del módulo = Flujo de diseño × Área efectiva
```

Forma abreviada:

$$Q = J \times A$$

donde:

Q = caudal de permeado

J = flujo de diseño

A = área efectiva de membrana

Esta ecuación es uno de los cálculos preliminares que más se usan para dimensionar plantas de microfiltración.

Interpretación ingenieril. El incremento del área de membrana permite aumentar la producción sin necesidad de incrementar el flujo específico. Desde el punto de vista operativo, esta estrategia suele resultar más eficiente que trabajar con flujos excesivamente elevados, ya que reduce el riesgo de fouling y prolonga la vida útil de las membranas.

4.4.6 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL MÓDULO

La decisión final debe ponderar a la vez el caudal requerido, la calidad del agua, el espacio disponible, el mantenimiento y los costos tanto de inversión como de operación.

Para plantas municipales de agua potable, donde predominan grandes caudales y bajas concentraciones de sólidos, los módulos de fibra hueca constituyen generalmente la alternativa más conveniente.

En procesos industriales con efluentes complejos o elevadas cargas de sólidos, los módulos tubulares ofrecen una mayor confiabilidad operacional, aun cuando impliquen una inversión inicial superior.

Los módulos espiralados son apropiados cuando el pretratamiento garantiza una baja carga de sólidos y se busca maximizar el área instalada en un espacio reducido.

Finalmente, los módulos de placas y marcos continúan siendo una excelente opción para investigación, validación de procesos y aplicaciones que requieren frecuentes modificaciones operacionales.

Caso de ingeniería

Una industria láctea requiere tratar un efluente con elevada concentración de proteínas, grasas y sólidos suspendidos para reutilizar parte del agua en servicios auxiliares. Aunque un módulo espiralado ofrecería una elevada superficie filtrante, el riesgo de obstrucción de sus canales internos sería considerable. Desde el punto de vista del diseño, una solución más robusta consiste en emplear módulos tubulares operando en flujo tangencial, complementados con un pretratamiento físico-químico para reducir la carga de sólidos antes de la etapa de membranas.

Este ejemplo demuestra que la selección del módulo debe realizarse considerando las características reales del proceso y no únicamente la productividad nominal indicada por el fabricante.

4.5 MODELADO HIDRÁULICO Y ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LA MICROFILTRACIÓN

Dimensionar una unidad de microfiltración supone expresar con números cómo se relacionan la operación y el permeado producido. Los modelos hidráulicos describen el paso del agua por la membrana y permiten estimar el peso de la presión, la viscosidad, el ensuciamiento y la resistencia del medio filtrante.

Si se piensa en condiciones ideales, la membrana se puede tratar como un medio poroso homogéneo para analizar el flujo de agua. Pero en la planta real, los depósitos sobre la superficie cambian permanentemente la hidráulica del sistema. El ingeniero necesita entonces modelos que reproduzcan el comportamiento inicial y también cómo evoluciona el proceso con el tiempo.

La herramienta fundamental para este análisis es la **Ley de Darcy**, ampliamente utilizada en ingeniería para describir el flujo de fluidos a través de medios porosos.

4.5.1 APLICACIÓN DE LA LEY DE DARCY

Henry Darcy formuló esta relación para estudiar cómo se mueve el agua en medios granulares. Más tarde se aplicó a las membranas, porque su estructura porosa tiene un comportamiento hidráulico parecido.

La Ley de Darcy plantea, para microfiltración, que el flujo de permeado crece en proporción directa a la presión transmembrana y baja en proporción inversa a la resistencia hidráulica total que presenta el sistema.

Ecuación 4.3. Ley de Darcy aplicada a membranas

$$J = TMP / (\mu \times Rt)$$

donde

J = flujo de permeado ($m^3/m^2 \cdot s$)

TMP = presión transmembrana (Pa)

μ = viscosidad dinámica del agua (Pa·s)

Rt = resistencia hidráulica total (m^{-1})

Con esta ecuación, uno de los modelos básicos, se diseñan las plantas de microfiltración y ultrafiltración y los biorreactores con membranas.

Como se aprecia, mayor presión transmembrana da más flujo, mientras que una viscosidad más alta del agua o una resistencia mayor al paso del fluido lo reducen.

Interpretación ingenieril. La Ley de Darcy demuestra que aumentar la presión no siempre constituye la solución más eficiente para incrementar la producción. Cuando la resistencia hidráulica está dominada por el fouling, pequeños incrementos de presión producen aumentos mínimos del flujo, mientras que el consumo energético continúa creciendo.

4.5.2 RESISTENCIA HIDRÁULICA TOTAL

Durante la operación, el agua debe atravesar diversas resistencias antes de convertirse en permeado.

Al principio la única resistencia es la de la membrana misma. Conforme transcurre la filtración se agregan otras, debidas al depósito de partículas, a poros obstruidos y a la torta que se forma en la superficie.

Por eso la resistencia hidráulica total se puede escribir como una suma de varias contribuciones independientes.

Ecuación 4.4. Resistencia total

$$Rt = Rm + Rp + Rc$$

donde

Rt = resistencia total

Rm = resistencia intrínseca de la membrana

Rp = resistencia por bloqueo de poros

Rc = resistencia de la torta de filtración

En algunos procesos de larga duración también puede incorporarse una resistencia adicional asociada al biofouling.

Cuánto pesa cada término varía con el tipo de agua, la configuración hidráulica y las condiciones de operación.

4.5.3 EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA DURANTE LA OPERACIÓN

Al inicio del proceso, prácticamente toda la resistencia corresponde a la propia membrana.

Conforme las partículas comienzan a depositarse sobre la superficie, la resistencia asociada al bloqueo de poros aumenta rápidamente.

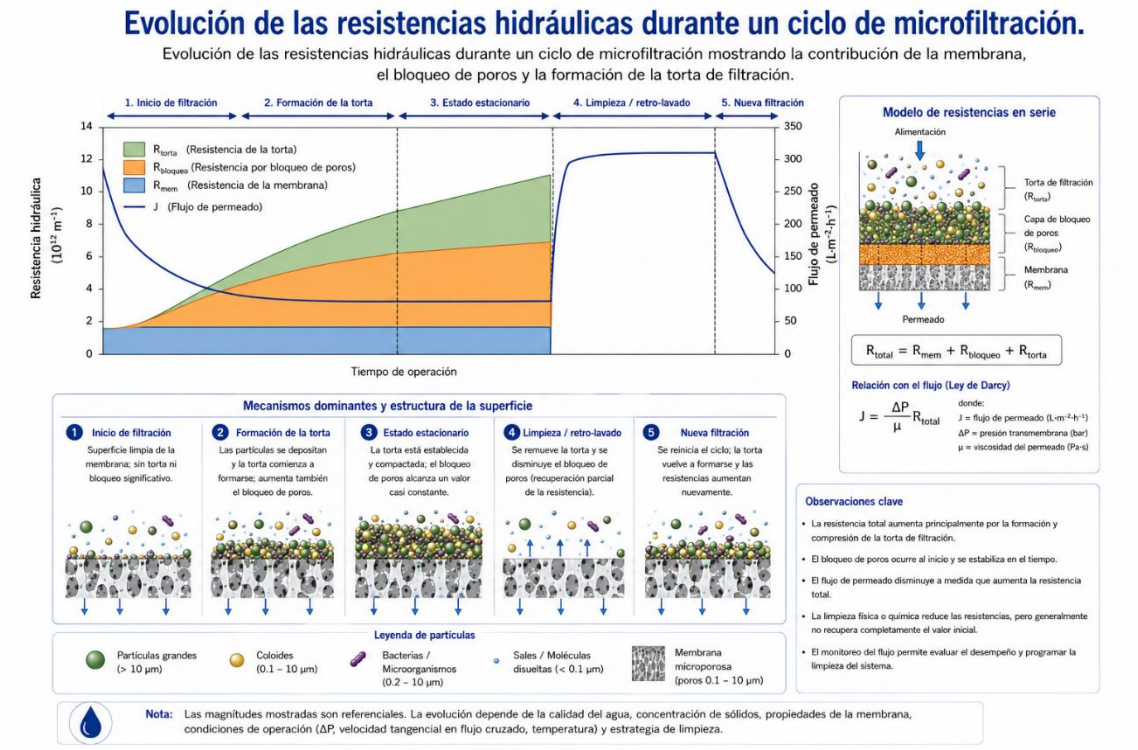
Después, cuando ya se saturaron los poros de la superficie, lo que predomina es la torta de filtración.

Como consecuencia, el flujo disminuye progresivamente incluso cuando la presión permanece constante.

Esta evolución sirve en el diseño para determinar el mejor instante de hacer retrolavado o limpieza química.

Figura 4.6

Evolución de las resistencias hidráulicas durante un ciclo de microfiltración.



Nota. Elaboración propia.

4.5.4 INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD

En el diseño hidráulico, la viscosidad es una de las propiedades físicas de mayor peso.

Si sube la temperatura, la viscosidad del agua baja, el flujo encuentra menos resistencia y se puede obtener más permeado.

Este comportamiento explica por qué una misma planta puede producir diferentes caudales durante el verano y el invierno aun cuando las presiones de operación permanezcan constantes.

Por esta razón, los fabricantes suelen expresar el flujo de diseño normalizado a una temperatura de referencia, generalmente 20 °C o 25 °C.

Interpretación ingenieril. El ingeniero nunca debe comparar directamente datos de flujo obtenidos a temperaturas diferentes sin realizar previamente la corrección correspondiente. De lo contrario, puede interpretar erróneamente una variación estacional como un problema de fouling.

4.5.5 FLUJO CRÍTICO

Uno de los conceptos más importantes en el diseño moderno de membranas es el **flujo crítico**.

Es el flujo de permeado más alto que se puede mantener sin provocar que las partículas se acumulen rápidamente sobre la membrana.

Mientras el sistema trabaje por debajo de ese valor, la rapidez con que las partículas se depositan y la rapidez con que se remueven se mantienen más o menos parejas.

Por encima del flujo crítico comienza una acumulación progresiva de sólidos que incrementa rápidamente la resistencia hidráulica.

De ahí que mantener la operación por encima del flujo crítico haga que el rendimiento caiga deprisa y que las limpiezas sean más seguidas.

4.5.6 DISEÑO BASADO EN FLUJO SOSTENIBLE

Al principio, las plantas de membranas se proyectaban para obtener el mayor flujo de permeado posible.

La experiencia industrial ha demostrado que este criterio conduce frecuentemente a elevados costos de operación debido al incremento del fouling y del consumo energético.

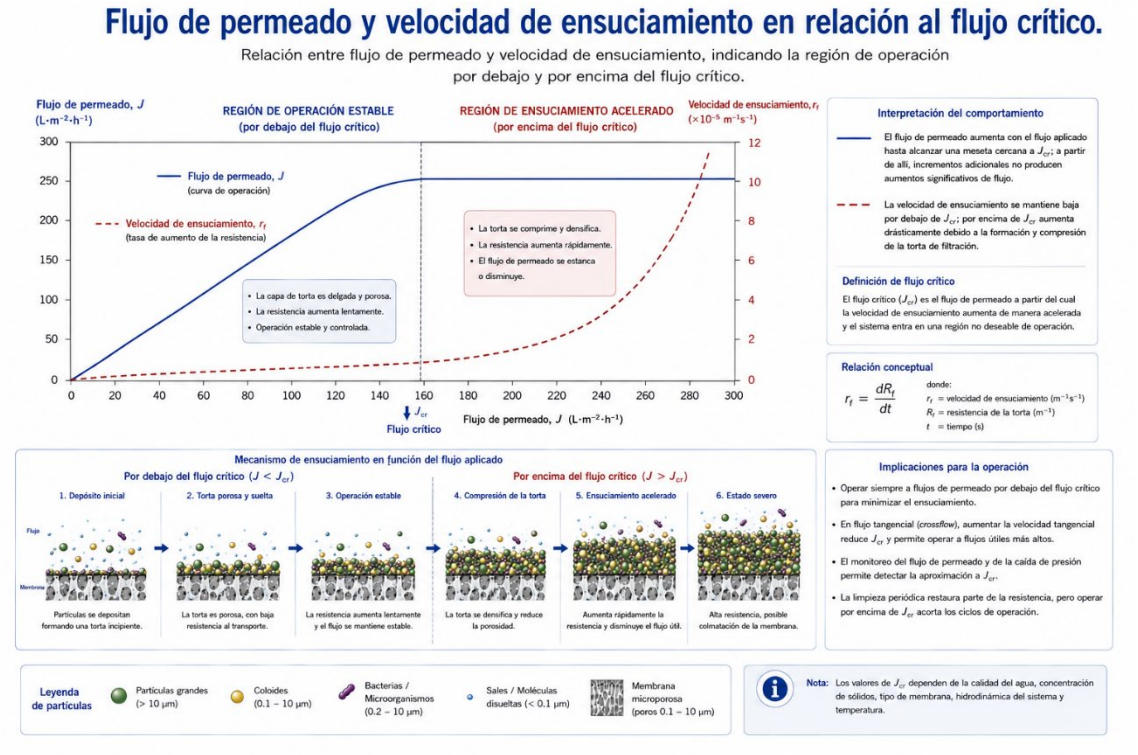
Actualmente se prefiere diseñar utilizando el concepto de **flujo sostenible**, definido como el flujo que puede mantenerse durante largos periodos con una frecuencia aceptable de limpieza y una productividad estable.

Aquí se evalúan juntos la hidráulica, la duración de la membrana, la disponibilidad operacional y el costo de energía.

En lo económico, un flujo algo menor suele dar más ganancia que forzar la producción instantánea al máximo.

Figura 4.7

Flujo de permeado y velocidad de ensuciamiento en relación al flujo crítico.



Nota. Elaboración propia.

Tabla 4.4

Variables hidráulicas fundamentales para el diseño de sistemas de microfiltración

Variable	Influencia sobre el proceso	Consecuencia de valores elevados
Presión transmembrana	Incrementa la fuerza impulsora	Mayor riesgo de compactación y fouling
Flujo de permeado	Determina la productividad	Aumento del ensuciamiento
Velocidad tangencial	Reduce la acumulación de partículas	Mayor consumo energético
Viscosidad	Controla la resistencia hidráulica	Disminución del flujo
Resistencia total	Limita la producción	Incremento de la presión requerida
Temperatura	Modifica la viscosidad	Cambios en el rendimiento hidráulico

Nota. Elaboración propia.

Ejemplo de aplicación ingenieril

Se desea estimar el flujo inicial de una membrana de microfiltración que opera con una presión transmembrana de **1,2 bar**. La viscosidad del agua es de **$1{,}0 \times 10^{-3}$ Pa·s** y la resistencia total inicial de la membrana es de **$2{,}0 \times 10^{12}$ m⁻¹**.

Aplicando la Ley de Darcy:

Datos

$$TMP = 1{,}2 \text{ bar} = 120\,000 \text{ Pa}$$

$$\mu = 1{,}0 \times 10^{-3} \text{ Pa·s}$$

$$Rt = 2{,}0 \times 10^{12}\ m^{-1}$$

Cálculo

$$J = 120000 / (1{,}0 \times 10^{-3} \times 2{,}0 \times 10^{12})$$

$$J = 6{,}0 \times 10^{-5}\ m/s$$

Este resultado corresponde al flujo inicial de la membrana antes de que aparezcan fenómenos significativos de ensuciamiento. Durante la operación, el incremento progresivo de la resistencia hidráulica reducirá este valor, haciendo necesaria la aplicación de estrategias de retrolavado o limpieza química para recuperar la productividad.

Interpretación ingenieril. Este ejemplo pone de manifiesto que el parámetro más importante durante la operación no es únicamente la presión, sino la evolución de la resistencia total. Una planta correctamente diseñada busca controlar dicha resistencia mediante un adecuado pretratamiento, una configuración hidráulica apropiada y programas de limpieza optimizados. Esta filosofía constituye la base del diseño moderno de sistemas de microfiltración y será desarrollada con mayor profundidad en el siguiente apartado, dedicado a los mecanismos de ensuciamiento, control operacional y estrategias de limpieza.

4.6 ENSUCIAMIENTO DE MEMBRANAS Y ESTRATEGIAS DE CONTROL

El ensuciamiento o *fouling* constituye el fenómeno mediante el cual materiales presentes en el agua se depositan sobre la superficie o en el interior de la membrana, incrementando progresivamente la resistencia hidráulica al paso del agua. Como consecuencia, disminuye el flujo de permeado, aumenta el consumo energético y se reduce la eficiencia global del proceso.

Se tiende a ver el fouling como un asunto de operación, pero es consecuencia directa de tres factores: el diseño hidráulico, las condiciones de operación y la calidad del agua que llega. En un sistema bien diseñado el ensuciamiento avanza más lento y no se necesitan limpiezas químicas frecuentes.

En Ingeniería del Agua, el fouling pesa bastante en lo que cuesta, a lo largo de su vida, una planta de membranas. Por eso ahora se busca que los sistemas resistan el ensuciamiento, y no solo que las membranas sean productivas.

4.6.1 MECANISMOS DE ENSUCIAMIENTO

El fouling puede originarse mediante diferentes mecanismos que, en la práctica, suelen actuar simultáneamente.

El primer mecanismo corresponde al **bloqueo de poros**, que ocurre cuando partículas cuyo tamaño es similar al diámetro de los poros penetran parcialmente en la membrana e impiden el paso del agua.

Posteriormente aparece la **formación de la torta de filtración**, donde las partículas retenidas comienzan a acumularse sobre la superficie formando una capa porosa adicional.

En aguas con elevado contenido de sales poco solubles puede desarrollarse la **incrustación mineral (scaling)**, producida por la precipitación de carbonatos, sulfatos, sílice u otros compuestos minerales.

Finalmente, en aguas naturales y residuales suele aparecer el **biofouling**, consecuencia del crecimiento de microorganismos y de la formación de biopelículas sobre la superficie de la membrana.

Cada mecanismo tiene sus rasgos propios y pide estrategias específicas de prevención y de limpieza.

4.6.2 BLOQUEO DE POROS

Al comienzo de la operación, las partículas con un tamaño cercano al del poro pueden penetrar en parte dentro de la estructura de la membrana.

El bloqueo puede darse de varias maneras, según cuál sea el tamaño de las partículas frente al diámetro de los poros.

Cuando una partícula obstruye completamente un poro se produce un bloqueo total.

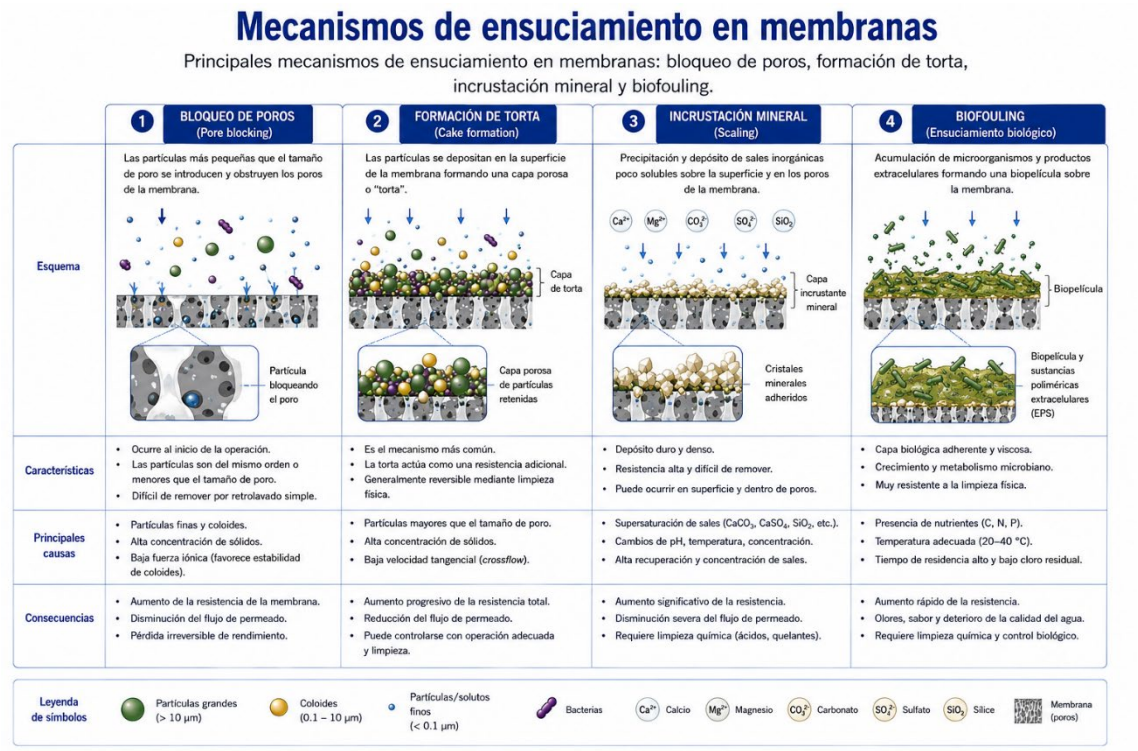
Si varias partículas se depositan progresivamente reduciendo el diámetro efectivo del poro, el fenómeno se conoce como bloqueo parcial.

Otras veces las partículas se meten en la estructura porosa y forman depósitos internos que elevan mucho la resistencia hidráulica.

En la operación, este mecanismo preocupa especialmente porque el retrolavado suele eliminarlo con más dificultad que la torta superficial.

Figura 4.8

Mecanismos de ensuciamiento en membranas



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Crittenden et al. (2012).

4.6.3 FORMACIÓN DE LA TORTA DE FILTRACIÓN

Una vez que la superficie de la membrana se satura, lo retenido forma una capa continua: la torta de filtración.

Inicialmente esta capa puede mejorar ligeramente la eficiencia de separación al actuar como un medio filtrante adicional. Sin embargo, conforme aumenta su espesor, la resistencia hidráulica también aumenta y el flujo de permeado disminuye.

La estructura de la torta responde a muchos factores: tamaño y forma de las partículas, concentración de sólidos suspendidos, velocidad tangencial y propiedades fisicoquímicas del agua.

En algunos procesos industriales, la torta llega a explicar sobre el 80 % de la resistencia que opone el sistema en total.

Interpretación ingenieril. El diseño del pretratamiento tiene como objetivo reducir la velocidad de formación de la torta y no únicamente proteger la membrana. Una

adecuada coagulación y floculación pueden disminuir significativamente la frecuencia de limpieza de toda la instalación.

4.6.4 INCRUSTACIÓN MINERAL (*SCALING*)

Cuando sales poco solubles precipitan sobre la membrana ocurre un tipo particular de ensuciamiento: la incrustación mineral.

Las especies más implicadas son la sílice y los sulfatos de calcio, bario y estroncio, además del carbonato de calcio.

Si la concentración de estas sales excede su límite de solubilidad, aumenta la probabilidad de incrustación; esto sucede cuando crece la recuperación del sistema o varían el pH y la temperatura.

Aunque el scaling adquiere mayor importancia en nanofiltración y ósmosis inversa, también puede presentarse en determinadas aplicaciones de microfiltración cuando existen condiciones favorables para la precipitación.

Su prevención requiere controlar la química del agua mediante acidificación, dosificación de antiincrustantes o reducción de la recuperación.

4.6.5 BIOFOULING

El biofouling es el crecimiento de microorganismos sobre la membrana junto con una matriz extracelular, la biopelícula.

La biopelícula cambia el régimen hidráulico, eleva la pérdida de carga y obstaculiza la transferencia de masa.

Además, los microorganismos producen sustancias poliméricas extracelulares que favorecen la adhesión de nuevas células y aumentan progresivamente el espesor del depósito biológico.

Es de los problemas más complejos, pues las biopelículas resisten bien muchos de los procedimientos de limpieza.

La prevención constituye la estrategia más eficaz e incluye una adecuada desinfección, control microbiológico del agua y eliminación de nutrientes antes de la etapa de membranas.

Tabla 4.5.

Comparación de los principales mecanismos de ensuciamiento

Tipo de ensuciamiento	Origen	Consecuencia principal	Estrategia de control
Bloqueo de poros	Partículas finas	Reducción del flujo	Pretratamiento y retrolavado
Torta de filtración	Acumulación superficial	Incremento de resistencia hidráulica	Lavado hidráulico y optimización del flujo
Incrustación mineral	Precipitación de sales	Disminución de permeabilidad	Control químico y antiincrustantes
Biofouling	Crecimiento microbiano	Formación de biopelículas	Desinfección y limpieza química

Nota. Elaboración propia.

4.6.6 Estrategias de prevención

La mejor estrategia para controlar el fouling consiste en evitar su formación durante la etapa de diseño.

Primero conviene instalar un pretratamiento apropiado que, antes de la membrana, baje la carga de sólidos suspendidos, de materia orgánica y de microorganismos.

Igualmente, hay que fijar una velocidad tangencial suficiente para que las partículas no se acumulen en la superficie.

Otra estrategia muy aceptada es trabajar por debajo del flujo crítico, con lo que el ensuciamiento avanza bastante más lento.

Finalmente, el diseño debe contemplar sistemas automáticos de retrolavado, limpieza química y monitoreo continuo de la presión transmembrana, permitiendo intervenir antes de que el fouling alcance niveles críticos.

4.6.7 Monitoreo del ensuciamiento

En plantas industriales, el fouling se controla mediante el seguimiento continuo de variables operacionales.

Entre los indicadores más utilizados destacan:

- Disminución del flujo de permeado.
- Incremento de la presión transmembrana.
- Crece la diferencia de presión entre la entrada y la salida del módulo.
- Incremento del consumo específico de energía.
- Disminución de la recuperación del sistema.

Analizar estas variables en conjunto permite detectar pronto que empieza el ensuciamiento y programar las limpiezas antes de perder mucha productividad.

Caso de ingeniería

Una planta de microfiltración destinada al tratamiento de agua superficial comenzó a presentar una disminución del 25 % en el flujo de permeado después de tres semanas de operación continua. El análisis del agua mostró un incremento estacional de materia orgánica natural asociado al periodo de lluvias.

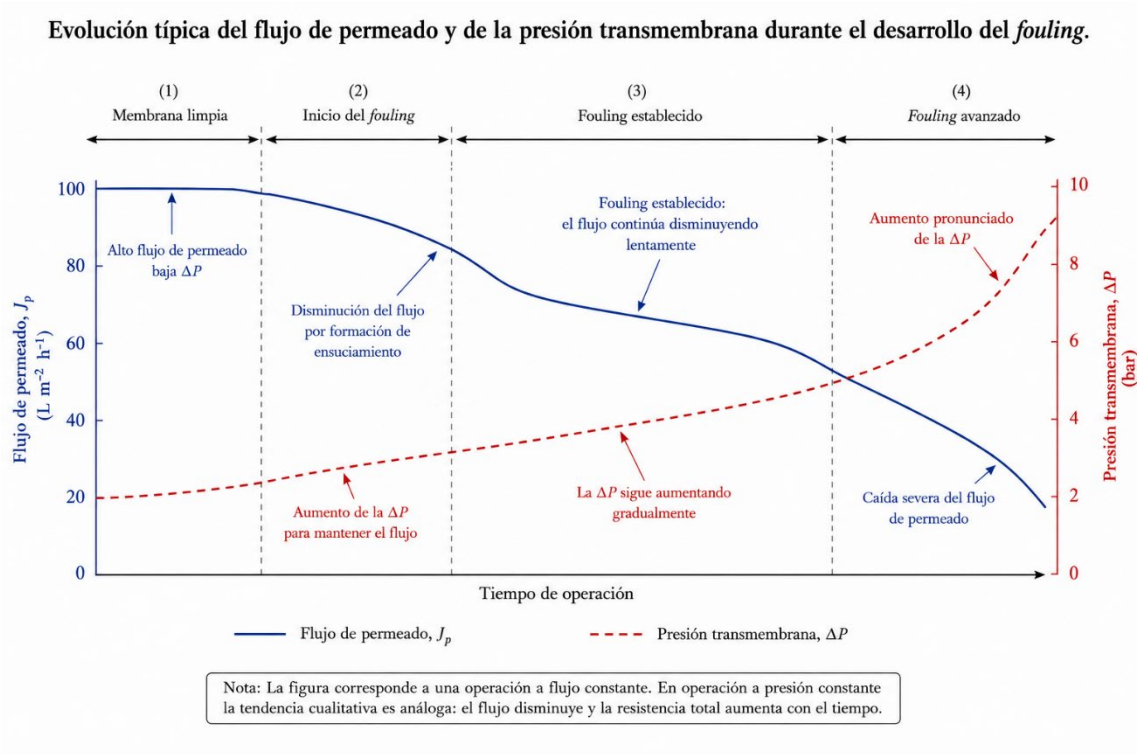
En la evaluación operacional se vio que la presión transmembrana subía de forma gradual y que la calidad del permeado casi no variaba. De ahí se concluyó que el problema respondía a una mayor resistencia hidráulica, no a que la membrana se hubiera deteriorado.

Como medida correctiva se optimizó la etapa de coagulación mediante ensayos de jarras, se redujo ligeramente el flujo de operación y se ajustó la frecuencia de retrolavado. Después de estas modificaciones, la planta recuperó su productividad sin necesidad de sustituir las membranas.

Este ejemplo ilustra un principio fundamental de la Ingeniería del Agua: **el fouling debe abordarse prioritariamente mediante mejoras en el diseño y en la operación del sistema, reservando el reemplazo de membranas para situaciones en las que exista un deterioro irreversible del material**.

Figura 4.9

Cambios del caudal de permeado y de la presión mientras el fouling avanza.



Nota. Elaboración propia.

4.7 LIMPIEZA Y RECUPERACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS MEMBRANAS

Si una unidad de microfiltración funciona sin detenerse, tarde o temprano se acumulan materiales sobre y dentro de la membrana. Con buen diseño hidráulico y pretratamiento eficiente el ensuciamiento se atenúa, pero no desaparece por completo. Todo sistema industrial, por tanto, programa procedimientos periódicos que restituyan, en parte o del todo, la producción de las membranas.

Limpiar la membrana sirve para más que devolver el flujo de permeado a su nivel. Con ella también se cuida la calidad del agua producida, se consume menos energía, la membrana dura más y los módulos se reemplazan con menos frecuencia.

En la práctica, las estrategias de limpieza se agrupan en físicas, hidráulicas y químicas. Cuál conviene aplicar lo determinan el tipo de ensuciamiento, el material de la membrana y las condiciones en que opera la planta.

4.7.1 Retrolavado hidráulico

En los sistemas de microfiltración, el retrolavado es el método de limpieza que más se aplica.

Consiste en invertir temporalmente el sentido del flujo, haciendo circular agua limpia o permeado desde la cara del permeado hacia la cara de alimentación. Este flujo inverso desprende parte de los sólidos acumulados sobre la superficie de la membrana y elimina materiales retenidos en los poros superficiales.

Cada ciclo se extiende de treinta segundos a tres minutos, según la membrana empleada, el agua tratada y el nivel de suciedad acumulada.

Al diseñar la planta hay que reservar suficiente permeado para estos ciclos, de manera que la producción total casi no se resienta.

Interpretación ingenieril. El retrolavado debe realizarse antes de que el fouling alcance niveles severos. Esperar hasta observar una disminución importante del flujo reduce considerablemente la eficacia del procedimiento y aumenta la necesidad de limpiezas químicas.

4.7.2 Limpieza asistida con aire

En numerosos sistemas de fibra hueca, el retrolavado se complementa mediante inyección de aire comprimido.

Las burbujas generan turbulencia alrededor de las fibras, incrementando el esfuerzo cortante sobre la superficie y favoreciendo el desprendimiento de depósitos.

Este procedimiento resulta particularmente eficaz para eliminar tortas de filtración poco compactas y biopelículas incipientes.

La combinación de aire y agua permite mejorar la recuperación del flujo utilizando menores volúmenes de agua de lavado.

En términos de energía, el aire extra que se consume queda más que compensado porque las limpiezas químicas se espacian.

4.7.3 Limpieza química

Cuando el ensuciamiento no puede eliminarse mediante procedimientos físicos, resulta necesario emplear agentes químicos capaces de disolver, oxidar o desprender los depósitos adheridos a la membrana.

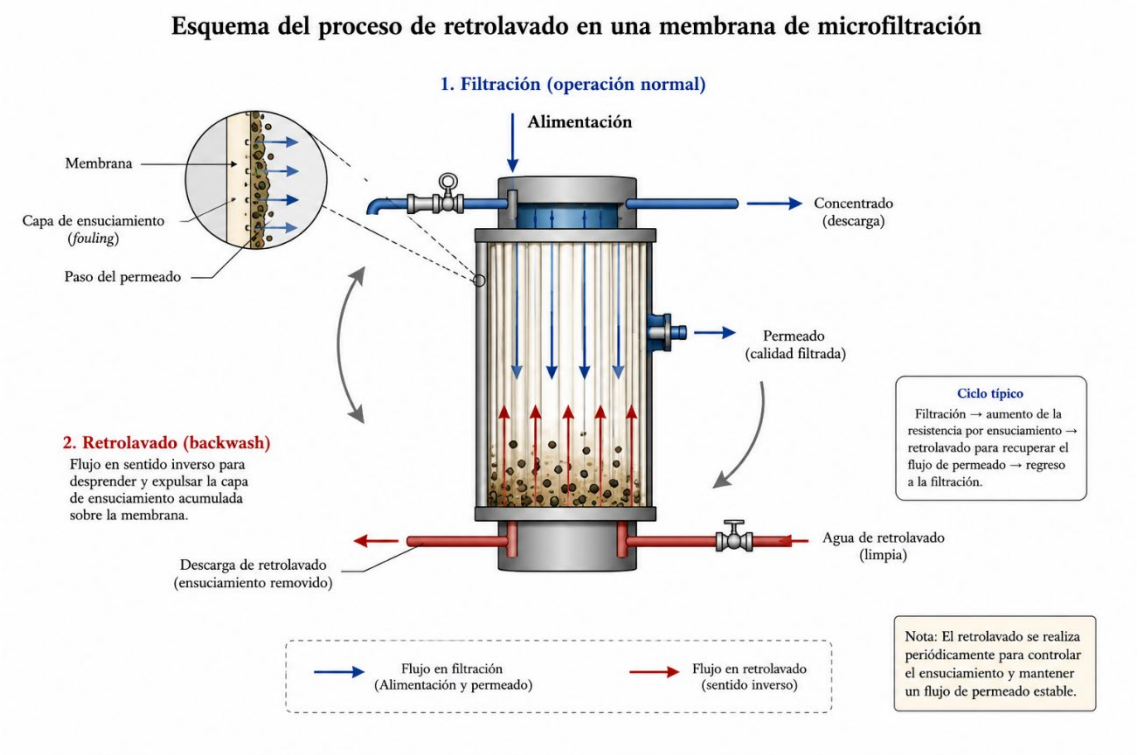
La selección del reactivo depende del tipo de ensuciamiento predominante.

Las soluciones alcalinas se utilizan principalmente para eliminar materia orgánica, proteínas y grasas.

Las soluciones ácidas permiten disolver depósitos minerales como carbonatos y óxidos metálicos.

Figura 4.10.

Esquema del proceso de retrolavado en una membrana de microfiltración.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012) y Crittenden et al. (2012).

Los oxidantes sirven para controlar ciertos depósitos biológicos, con la condición de que la membrana resista estos productos.

En algunos casos se incorporan detergentes o agentes quelantes para facilitar la eliminación de contaminantes complejos.

Antes de seleccionar cualquier reactivo debe verificarse cuidadosamente la compatibilidad química con el material de la membrana, ya que determinados polímeros pueden sufrir degradación irreversible cuando se exponen a concentraciones elevadas de oxidantes o solventes.

Tabla 4.6

Agentes químicos utilizados en la limpieza de membranas

Tipo de reactivo	Contaminantes eliminados	Observaciones
Soluciones alcalinas	Materia orgánica, proteínas y grasas	Muy utilizadas en la industria alimentaria

Tipo de reactivo	Contaminantes eliminados	Observaciones
Soluciones ácidas	Carbonatos, óxidos e incrustaciones minerales	Control del scaling
Agentes oxidantes	Biopelículas y microorganismos	Verificar compatibilidad con la membrana
Agentes quelantes	Metales e incrustaciones complejas	Complementan limpiezas ácidas
Detergentes especializados	Mezclas de contaminantes	Favorecen la remoción de depósitos adheridos

Nota. Elaboración propia.

4.7.4 Limpieza CIP (*Cleaning In Place*)

En instalaciones industriales de gran capacidad se emplean sistemas de limpieza en sitio, conocidos internacionalmente como **Cleaning In Place (CIP)**.

Con estos sistemas se limpian las membranas sin sacar los módulos: las soluciones químicas se hacen recircular por la instalación durante el tiempo que se defina.

El procedimiento comprende generalmente las siguientes etapas:

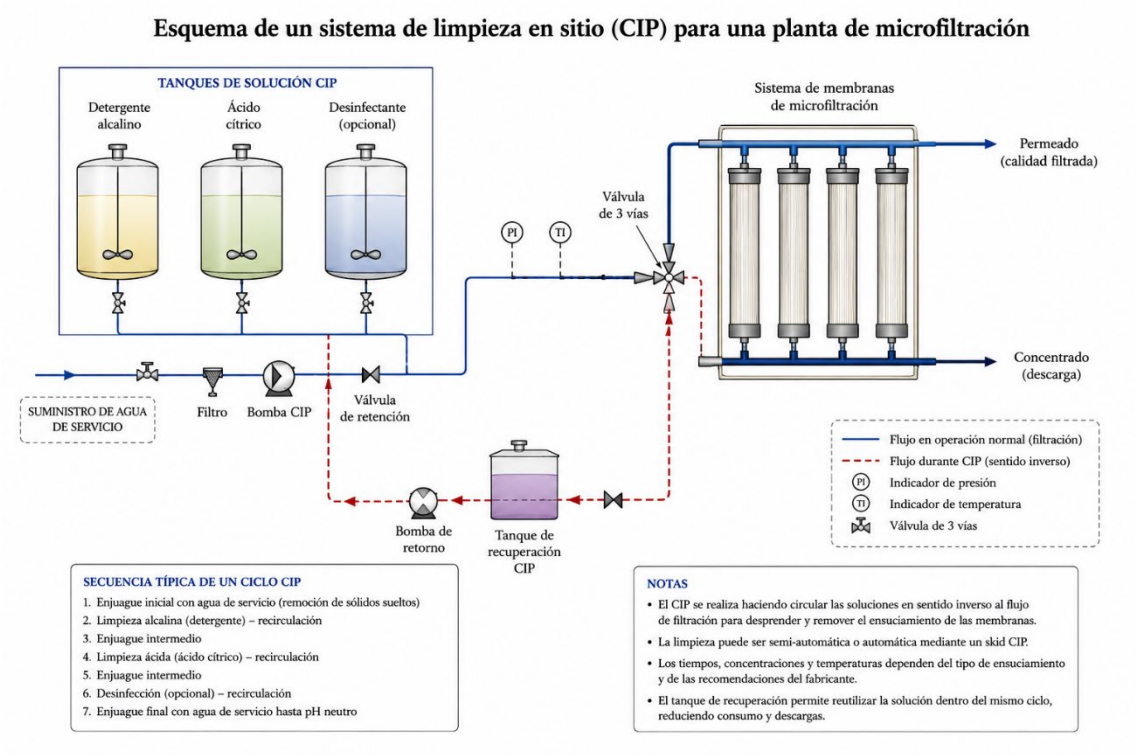
- Enjuague inicial con agua.
- Circulación de la solución química.
- Tiempo de contacto.
- Enjuague intermedio.
- Segunda etapa de limpieza (cuando es necesaria).
- Enjuague final y retorno a operación.

Para que la solución de limpieza entre en contacto con la membrana completa, el CIP debe diseñarse con velocidades de recirculación adecuadas.

Asimismo, los materiales de bombas, tuberías, válvulas y recipientes deben ser compatibles con los reactivos utilizados.

Figura 4.11.

Esquema de un sistema de limpieza en sitio (CIP) para una planta de microfiltración.



Nota. Elaboración propia.

4.7.5 Recuperación del flujo

Se mide el éxito de una limpieza con el porcentaje de flujo inicial de agua limpia que vuelve a obtenerse.

Ecuación 4.5. Recuperación del flujo

Recuperación (%) = (Flujo después de la limpieza / Flujo inicial de agua limpia) × 100

Forma abreviada

$$RF\ (\%) = (JL / J0) \times 100$$

donde

RF = recuperación del flujo

JL = flujo medido después de la limpieza

J0 = flujo inicial de agua limpia

Si el flujo recuperado pasa del 90 % en condiciones normales, quiere decir que casi todo el ensuciamiento era reversible.

Un porcentaje menor puede apuntar a fouling irreversible, a una membrana degradada o a que el procedimiento de limpieza no fue el adecuado.

4.7.6 Diseño de programas de limpieza

Armar un programa de limpieza es un trabajo de ingeniería que parte del comportamiento hidráulico del sistema; no basta con fijar intervalos de tiempo de antemano.

Los principales criterios utilizados para iniciar una limpieza son:

- Incremento de la presión transmembrana por encima del valor de diseño.
- Disminución del flujo normalizado de permeado.
- Incremento de la pérdida de carga en el módulo.
- Aumento del consumo específico de energía.
- Tiempo máximo de operación establecido por el fabricante.

En plantas modernas estos parámetros son monitorizados continuamente mediante sistemas SCADA, permitiendo iniciar automáticamente las secuencias de limpieza cuando se alcanzan los límites previamente definidos.

Tabla 4.7

Comparación de los principales procedimientos de limpieza

Procedimiento	Tipo de ensuciamiento	Frecuencia	Recuperación esperada
Retrolavado	Torta superficial	Muy frecuente	Alta
Aireación	Depósitos poco compactos	Frecuente	Alta
Limpieza química	Fouling orgánico e incrustaciones	Periódica	Muy alta
Sistema CIP	Ensuciamiento severo	Programada	Muy alta
Sustitución de membranas	Degradación irreversible	Eventual	Recuperación total del desempeño

Nota. Elaboración propia.

Caso de ingeniería industrial

Una planta de producción de agua potable con capacidad de **18 000 m³/día** operaba inicialmente con un programa fijo de limpieza química cada quince días. Después de un año de operación se observó que las necesidades reales de limpieza variaban considerablemente según la calidad estacional del agua.

Se optó entonces por mantener las membranas según su condición real. Para ello se vigilaban tres variables: presión transmembrana, flujo normalizado y pérdida de carga del sistema.

Las limpiezas químicas se redujeron en torno a 30 %, los reactivos se usaron menos y se estimó que las membranas durarían notablemente más.

Este caso ilustra un principio ampliamente aceptado en Ingeniería de Procesos: **las estrategias de mantenimiento deben basarse en indicadores de desempeño y no exclusivamente en calendarios de operación**.

Con monitoreo en tiempo real se logra mejorar a la vez la productividad, el uso de químicos y la disponibilidad operativa de la planta.

4.8 Diseño y dimensionamiento de plantas de microfiltración

Proyectar una planta de microfiltración significa seguir un procedimiento sistemático: se toman las exigencias de calidad del agua y se convierten en especificaciones técnicas para levantar y operar la instalación industrial.

A diferencia del diseño de equipos individuales, el dimensionamiento de una planta debe integrar aspectos hidráulicos, mecánicos, eléctricos, de automatización, operación y mantenimiento. El ingeniero no diseña únicamente una membrana; diseña un sistema completo capaz de operar de forma continua durante años con elevados niveles de confiabilidad.

Para la Ingeniería Química, el diseño arranca al precisar cómo será el proceso. Culmina cuando se escoge cuántos módulos, bombas, tuberías, equipos auxiliares y sistemas de limpieza llevará la planta.

4.8.1 Información necesaria para el diseño

Ningún cálculo debería empezar sin contar con datos suficientes del proceso.

Los datos mínimos requeridos incluyen:

- Caudal promedio y caudal máximo de diseño.
- Variación horaria y estacional del caudal.
- Calidad físico-química del agua.
- Turbidez máxima esperada.
- Concentración de sólidos suspendidos.
- Índice de densidad de sedimentos (SDI), cuando corresponda.
- Temperatura mínima y máxima de operación.

- Calidad requerida para el permeado.
- Continuidad del servicio.
- Disponibilidad de energía eléctrica.
- Espacio disponible para la instalación.

La ausencia de cualquiera de estos datos incrementa la incertidumbre del diseño y obliga a utilizar factores de seguridad más elevados.

Interpretación ingenieril. El diseño de una planta comienza mucho antes de realizar el primer cálculo. Una adecuada campaña de caracterización del agua suele reducir considerablemente los costos de inversión y operación posteriores.

4.8.2 Definición del caudal de diseño

El primer cálculo consiste en establecer el caudal que deberá producir la planta.

Debe distinguirse entre:

- Caudal promedio.
- Caudal máximo horario.
- Caudal máximo diario.
- Caudal futuro de diseño.

La planta nunca debe dimensionarse utilizando únicamente el caudal promedio, ya que durante determinadas horas del día podrían producirse déficits importantes de producción.

Generalmente se considera el caudal máximo esperado durante el horizonte de diseño del proyecto, incorporando además un margen para futuras ampliaciones.

4.8.3 Selección del flujo de diseño

Con el caudal requerido ya definido, el paso siguiente es escoger el flujo específico al que trabajará la membrana.

Este valor depende de diversos factores:

- Calidad del agua.
- Tipo de membrana.
- Temperatura.
- Configuración hidráulica.

- Frecuencia de limpieza aceptable.
- Recomendaciones del fabricante.

En ingeniería, el flujo elegido tiene que quedar por debajo del flujo crítico que se haya determinado de forma experimental.

Dejar márgenes razonables reduce el fouling y mantiene disponible la planta por más tiempo.

4.8.4 Cálculo del área total de membranas

El área requerida se obtiene con una relación simple, a partir del caudal necesario y del flujo de diseño ya conocidos.

Ecuación 4.6. Área total de membranas

Área total = Caudal de permeado / Flujo de diseño

Forma abreviada

$$At = Q / J$$

donde

At = área total de membranas (m^2)

Q = caudal de permeado

J = flujo de diseño

Esta ecuación constituye el punto de partida del dimensionamiento.

Ejemplo de cálculo

Se desea producir

$$Q = 450\ m^3/h$$

La membrana seleccionada operará con

$$J = 90\ L/m^2 \cdot h$$

Conversión

$90\ L/m^2 \cdot h = 0{,}09\ m^3/m^2 \cdot h$

Entonces

$$At = 450 / 0{,}09$$

$$At = 5\ 000\ m^2$$

Por lo tanto, la planta requiere aproximadamente **5 000 m²** de superficie efectiva de membranas.

4.8.5 Número de módulos

Con el área total calculada, ya se puede obtener la cantidad de módulos comerciales.

Ecuación 4.7. Número de módulos

Número de módulos = Área total / Área por módulo

Forma abreviada

$$Nm = At / Am$$

donde

Nm = número de módulos

Am = área efectiva de un módulo

Si el fabricante dispone de módulos de

$$Am = 80\ m^2$$

Entonces

$$Nm = 5000 / 80$$

$$Nm = 62,5$$

Se seleccionan

63 módulos

Posteriormente este valor se ajusta considerando módulos de reserva, mantenimiento y redundancia operacional.

4.8.6 Factor de seguridad

En la práctica nunca se instala exactamente el área calculada.

Diversos factores producen pérdidas progresivas de productividad:

- Ensuciamiento.
- Envejecimiento.
- Variaciones estacionales.
- Incertidumbre experimental.
- Ampliaciones futuras.

Por ello se incorpora un margen de diseño.

Generalmente el área instalada supera entre **10 % y 30 %** el área mínima calculada, dependiendo del tipo de aplicación.

Interpretación ingenieril. Sobredimensionar moderadamente la planta suele ser más económico que operar permanentemente cerca del límite hidráulico de las membranas.

4.8.7 Consumo específico de energía

El consumo específico de energía es de los indicadores que más se usan para juzgar qué tan rentable es operar una planta.

Expresa cuánta energía hace falta para producir cada unidad de volumen de agua.

Ecuación 4.8. Consumo específico de energía

$$CEE = \text{Potencia total} / \text{Producción de agua}$$

Forma abreviada

$$CEE = P / Q$$

donde

$$CEE = kWh/m^3$$

$$P = \text{potencia eléctrica (kW)}$$

$$Q = \text{producción de agua } (m^3/h)$$

Bajar el consumo específico es una de las metas centrales cuando se optimizan plantas de membranas.

4.8.8 Disponibilidad operacional

Al dimensionar hay que prever que parte de los módulos estará parada por un tiempo mientras se limpian o se les da mantenimiento.

Por ello, las plantas industriales suelen diseñarse utilizando el criterio **N + 1**, donde existe al menos un tren adicional capaz de mantener la producción cuando otro tren se encuentra detenido.

Esta filosofía incrementa ligeramente la inversión inicial, pero mejora considerablemente la confiabilidad del sistema.

Tabla 4.8

Variables principales para el dimensionamiento de una planta de microfiltración

Variable	Influencia sobre el diseño	Consecuencia de una selección inadecuada
Caudal de diseño	Determina el tamaño de la planta	Déficit de producción
Flujo de operación	Define el área requerida	Incremento del fouling
Área de membranas	Determina el número de módulos	Sobrecostos o baja productividad
Factor de seguridad	Asegura continuidad operacional	Operación al límite de capacidad
Presión transmembrana	Define el sistema de bombeo	Mayor consumo energético
Disponibilidad operacional	Determina redundancia	Paradas frecuentes

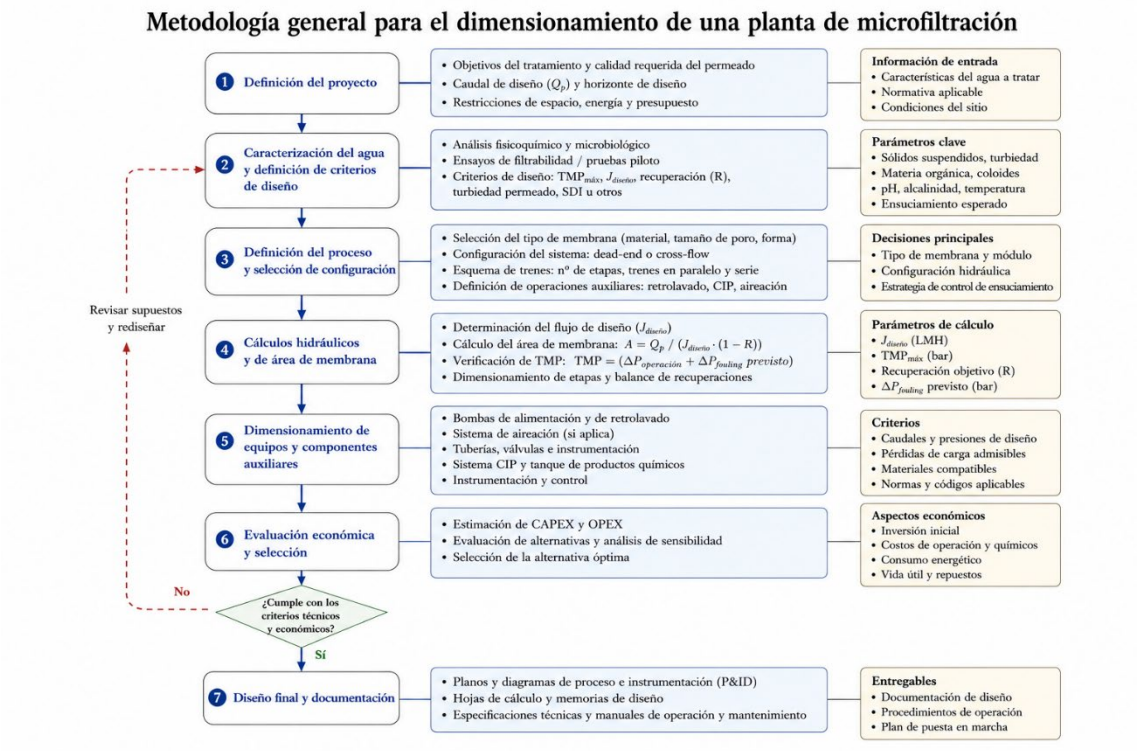
Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Calcular cuánta membrana se necesita es solo una porción chica del trabajo de diseñar una planta industrial. En un proyecto real, al ingeniero le toca sumar la hidráulica de válvulas, colectores y bombas, junto con el retrolavado, el almacenamiento del permeado, la automatización, el control de procesos y el análisis económico. Se trata, por tanto, de un problema multidisciplinario, en el que se combinan la Ingeniería Química, la Mecánica, la Eléctrica y la de Control.

Figura 4.12.

Metodología general para el dimensionamiento de una planta de microfiltración.



Nota. Elaboración propia.

4.9 Aplicaciones industriales de la microfiltración

Antes se aplicaba sobre todo en laboratorios y en la industria farmacéutica; hoy la microfiltración figura entre las operaciones unitarias de mayor peso dentro de la Ingeniería del Agua. Se la ve en el agua potable, en la reutilización de efluentes, en procesos industriales y como pretratamiento de otras tecnologías avanzadas con membranas.

Su éxito radica en la posibilidad de producir agua con baja turbidez y elevada calidad microbiológica mediante un proceso físico continuo, automatizable y de reducido consumo energético.

En cuanto al diseño, cómo se aplique la microfiltración depende del agua de alimentación, de lo que se quiera lograr con el tratamiento y de cómo se articule con las demás operaciones unitarias.

4.9.1 Producción de agua potable

Entre las aplicaciones más relevantes de la microfiltración está la producción de agua potable.

En estas plantas, la membrana puede sustituir a la filtración rápida en arena o apoyarla. Su papel es el de una barrera física muy eficiente para quitar algas, bacterias, protozoarios y sólidos suspendidos.

Una planta típica incluye las siguientes etapas:

- Captación.
- Coagulación (cuando es necesaria).
- Floculación.
- Sedimentación o flotación.
- Microfiltración.
- Desinfección final.
- Almacenamiento.

Al incorporar microfiltración, la calidad del agua producida se mantiene estable aunque la turbidez cambie con las estaciones.

Desde el punto de vista sanitario, constituye además una barrera eficaz frente a microorganismos resistentes a la desinfección convencional, como **Cryptosporidium** y **Giardia**.

Interpretación ingenieril. La microfiltración no elimina las sales disueltas ni la mayoría de los compuestos orgánicos de bajo peso molecular. Por ello, cuando la fuente presenta problemas de salinidad o contaminantes disueltos, resulta necesario incorporar tecnologías complementarias como nanofiltración u ósmosis inversa.

4.9.2 Reutilización de aguas residuales

Como los recursos hídricos escasean cada vez más, se han desarrollado sistemas para reutilizar aguas residuales municipales e industriales.

En estos procesos, la microfiltración constituye generalmente la primera barrera física antes de etapas de ultrafiltración, ósmosis inversa o procesos avanzados de oxidación.

Su tarea principal es retirar sólidos suspendidos y microorganismos, lo que alivia el fouling de las etapas que vienen después.

Cuando se integra con biorreactores de membranas (MBR), la microfiltración permite obtener efluentes de elevada calidad aptos para reutilización industrial, riego o recarga de acuíferos, siempre que se complementen con los tratamientos requeridos por la normativa aplicable.

El diseño debe considerar la elevada concentración de sólidos biológicos presente en estos sistemas, seleccionando configuraciones hidráulicas que faciliten la limpieza y el control del ensuciamiento.

4.9.3 Industria alimentaria

La industria alimentaria utiliza la microfiltración para la clarificación y estabilización de numerosos productos líquidos.

Entre las aplicaciones más frecuentes destacan:

- Clarificación de jugos de frutas.
- Producción de bebidas fermentadas.
- Clarificación de vinos.
- Elaboración de cerveza.

- Procesamiento de leche.
- Recuperación de proteínas.
- Producción de agua de proceso.

En estas aplicaciones resulta indispensable utilizar materiales compatibles con las normas sanitarias para contacto con alimentos y procedimientos de limpieza CIP capaces de eliminar proteínas, grasas y biopelículas.

Conviene diseñar el sistema evitando zonas muertas, porque en ellas prolifera la actividad microbiana y se dificulta la limpieza.

4.9.4 Industria farmacéutica y biotecnológica

Para la industria farmacéutica, la microfiltración cumple funciones críticas: esterilizar y asegurar la calidad del producto.

Entre sus principales aplicaciones se encuentran:

- Filtración esterilizante de soluciones.
- Producción de agua purificada.
- WFI (Agua para Inyección): producción, como una etapa del tren de tratamiento.
- Separación celular.
- Purificación de productos biotecnológicos.

En estos procesos, el diseño debe cumplir estrictamente las Buenas Prácticas de Manufactura (GMP), así como los requisitos establecidos por las farmacopeas y las autoridades regulatorias.

La validación del sistema adquiere una importancia comparable al propio diseño hidráulico.

4.9.5 Industria minera

En minería se generan corrientes con muchos metales, partículas abrasivas y sólidos suspendidos en altas concentraciones.

La microfiltración se utiliza principalmente como etapa de clarificación antes de procesos de recuperación de agua o como pretratamiento para tecnologías de mayor selectividad.

Aquí se imponen los módulos tubulares y las membranas cerámicas, porque resisten bien el desgaste y la abrasión.

El diseño debe considerar velocidades tangenciales relativamente elevadas para evitar la sedimentación de partículas dentro de los módulos.

4.9.6 Industria química y petroquímica

En la industria química la microfiltración participa en numerosos procesos de separación sólido-líquido.

Entre ellos destacan:

- Recuperación de catalizadores.
- Clarificación de soluciones químicas.
- Separación de emulsiones.
- Tratamiento de efluentes industriales.
- Recuperación de productos de valor agregado.

En estos casos hay que comprobar primero que la membrana sea químicamente compatible con los solventes o reactivos del proceso.

Si se escoge mal el material, la membrana puede degradarse químicamente, perder selectividad y durar menos.

4.9.7 Pretratamiento para ósmosis inversa

Una aplicación muy valiosa de la microfiltración es el resguardo de las membranas de nanofiltración y de ósmosis inversa.

Si antes se eliminan los sólidos suspendidos, los coloides y los microorganismos, el fouling en las etapas siguientes se vuelve mucho menos probable.

Estudios hechos en la industria indican que, con un buen pretratamiento por microfiltración, los sistemas de ósmosis inversa pueden pasar bastante más tiempo entre una limpieza química y la siguiente.

Desde la perspectiva económica, esta aplicación suele justificar ampliamente la inversión adicional requerida por la microfiltración.

Figura 4.13.

Planta de ósmosis inversa con microfiltración incorporada como etapa previa.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012) y Metcalf & Eddy (2014).

Tabla 4.9

Principales aplicaciones industriales de la microfiltración

Sector	Objetivo principal	Beneficio de ingeniería	Aspecto crítico de diseño
Agua potable	Eliminación de sólidos y microorganismos	Mayor seguridad microbiológica	Control de turbidez y retrolavado
Reúso de aguas residuales	Protección de procesos posteriores	Reducción del fouling	Manejo de sólidos biológicos
Industria alimentaria	Clarificación y separación	Conservación de calidad del producto	Limpieza CIP
Industria farmacéutica	Filtración estéril y agua de alta pureza	Cumplimiento regulatorio	Validación sanitaria
Minería	Recuperación y reutilización de agua	Resistencia a abrasión	Velocidad tangencial
Industria química	Separaciones sólido-líquido	Recuperación de productos	Compatibilidad química
Pretratamiento para RO	Protección de membranas	Mayor vida útil y menor consumo químico	Calidad constante del permeado

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

No conviene ver la microfiltración como una tecnología suelta: rinde al máximo cuando es una operación unitaria dentro de un sistema de tratamiento completo. En

muchas plantas industriales su aporte va más allá de mejorar la calidad del agua, pues protege los procesos que siguen, da más confiabilidad operacional y recorta los costos totales de operación.

Al decidir si usar microfiltración, hay que analizar la cadena de tratamiento completa y ver cómo influye en las operaciones que la anteceden y la siguen. Este criterio de sistema es un principio básico de la Ingeniería de Procesos; lo aplicaremos con insistencia en los capítulos sobre ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.

Comentario editorial

Dr. Castellanos, considero que el siguiente apartado (**4.10 Caso integral de diseño**) debería convertirse en una de las características distintivas del libro. Mi propuesta es desarrollar un proyecto completo de una planta de microfiltración para un caudal del orden de **1 000 a 5 000 m³/día**, incluyendo:

- Caracterización del agua de alimentación.
- Selección de la tecnología y del material de la membrana.
- Cálculo del área total de membranas.
- Selección del número de módulos y trenes.
- Diseño preliminar del sistema de retrolavado.
- Estimación de bombas principales.
- Balance de agua de la planta.
- Consumo específico de energía.
- Estimación preliminar de CAPEX y OPEX.
- Recomendaciones de operación y mantenimiento.

4.10 Caso integral de diseño de una planta de microfiltración

Aquí se plantea el diseño conceptual de una planta de microfiltración que abastecerá a una industria alimentaria. Sirve para juntar lo estudiado y mostrar cómo procede un ingeniero al llevar las características del agua que ingresa hasta una solución técnicamente viable.

4.10.1 Planteamiento del problema

Una embotelladora de bebidas necesita asegurarse una fuente de agua confiable para sus procesos industriales. Toma el agua de un río cuya calidad cambia bastante según la época, sobre todo cuando llegan las lluvias.

Los análisis efectuados durante un año muestran los siguientes valores de diseño:

Tabla 4.10

Características del agua de alimentación.

Parámetro	**Valor**
Caudal requerido	2 400 m³/día
Caudal horario promedio	100 m³/h
Turbidez máxima	80 NTU
Sólidos suspendidos	45 mg/L
pH	7,3
Temperatura promedio	22 °C
Coliformes totales	Presentes
Sales disueltas	380 mg/L

Nota. Elaboración propia.

Hay dos exigencias para esta agua: satisfacer los requisitos de calidad que la empresa tiene internamente y abastecer un sistema de ósmosis inversa del que saldrá agua desmineralizada.

4.10.2 Selección del esquema de tratamiento

La caracterización del agua permite identificar tres problemas principales:

- Elevada variabilidad de la turbidez.
- Presencia de microorganismos.
- Necesidad de proteger la ósmosis inversa.

Considerando estas condiciones, se propone el siguiente tren de tratamiento:

Figura 4.14

Esquema conceptual del proceso de tratamiento mediante microfiltración y ósmosis inversa.

Captación

↓

Rejas

↓

Coagulación

↓

Floculación

↓

Sedimentación

↓

Microfiltración

↓

Tanque de permeado

↓

Ósmosis inversa

↓

Tanque de agua de proceso

Nota. Elaboración propia.

Visto como ingeniería, agregar coagulación y sedimentación recorta de forma notable los sólidos que alcanzan la membrana, lo que reduce el fouling y alarga la vida útil del sistema.

4.10.3 Selección de la membrana

Debido a la baja salinidad del agua y al objetivo principal de eliminar sólidos suspendidos y microorganismos, se selecciona una membrana de microfiltración de fibra hueca.

Las razones técnicas son las siguientes:

- Elevada superficie específica.
- Bajo consumo energético.
- Facilidad de retrolavado.
- Alta automatización.
- Excelente desempeño en plantas municipales e industriales.

Se adopta un flujo conservador de diseño para garantizar una operación estable durante todo el año.

Flujo de diseño = 80 L/m²·h

4.10.4 Cálculo del área de membranas

El caudal horario requerido es

$$Q = 100\ m^3/h$$

El flujo de diseño seleccionado es

$$J = 80\ L/m^2 \cdot h$$

Conversión

$80\ L/m^2 \cdot h = 0{,}08\ m^3/m^2 \cdot h$

Aplicando la ecuación de diseño

Área = Caudal / Flujo

$$At = 100 / 0{,}08$$

Resultado

$$At = 1\ 250\ m^2$$

Por seguridad operacional se adopta un margen del 20 %.

Área instalada

$$At = 1500\ m^2$$

4.10.5 Selección del número de módulos

El fabricante dispone de módulos con un área efectiva de

$$Am = 75\ m^2$$

Entonces

$$Nm = 1500 / 75$$

$$Nm = 20\ módulos$$

Se adopta la siguiente distribución:

- Cuatro trenes de operación.
- Cinco módulos por tren.

Con este arreglo el mantenimiento resulta más sencillo, y la producción continúa aunque un tren esté fuera de servicio.

4.10.6 Balance de agua

Durante los retrolavados se consume parte del permeado producido.

Se considera una recuperación global del 95 %.

Agua de alimentación = 2 526 m³/día

Permeado = 2 400 m³/día

Agua utilizada en retrolavados y purgas = 126 m³/día

Este balance constituye la base para el dimensionamiento de bombas, tanques y tuberías.

4.10.7 Estimación preliminar de potencia de bombeo

Se considera:

Caudal

$$Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$TMP = 1{,}2 \text{ bar}$$

Rendimiento de bomba = 75 %

En esta etapa conceptual basta con estimar la potencia instalada utilizando factores de diseño.

Se seleccionan:

- Dos bombas de operación.
- Una bomba de reserva.

Esta configuración garantiza continuidad del servicio durante labores de mantenimiento.

4.10.8 Sistema de retrolavado

El diseño contempla un tanque exclusivo de agua filtrada destinado al retrolavado.

Cada tren realizará automáticamente ciclos de limpieza cada treinta minutos de operación.

El sistema incorpora:

- Bomba de retrolavado.
- Soplador para limpieza con aire.

- Válvulas automáticas.
- Instrumentación de presión.
- Medidores de caudal.

La automatización permite minimizar la intervención del operador y mantener condiciones uniformes de operación.

4.10.9 Instrumentación básica

Desde el punto de vista del control de procesos, la planta debe disponer como mínimo de los siguientes instrumentos:

Tabla 4.11

Instrumentación recomendada para una planta de microfiltración.

Variable	Instrumento
Caudal de alimentación	Caudalímetro electromagnético
Caudal de permeado	Caudalímetro electromagnético
Presión de alimentación	Transmisor de presión
Presión del permeado	Transmisor de presión
Presión diferencial	Cálculo automático mediante PLC
Turbidez	Turbidímetro en línea
pH	Analizador continuo
Temperatura	Sensor Pt-100
Nivel de tanques	Transmisor ultrasónico

Nota. Elaboración propia.

4.10.10 Automatización

Hoy una planta de microfiltración se opera con sistemas de supervisión basados en PLC y SCADA.

El sistema automático controla:

- Arranque y parada de bombas.
- Apertura y cierre de válvulas.
- Secuencias de retrolavado.
- Alarmas.
- Tendencias históricas.
- Registro de producción.
- Consumo energético.

- Presión transmembrana.
- Programación de limpiezas CIP.

La automatización permite mantener condiciones de operación reproducibles y facilita el mantenimiento basado en condición.

4.10.11 Evaluación económica preliminar

En la fase conceptual no hace falta armar un presupuesto detallado, pero sí conviene identificar los componentes principales del costo de inversión y del costo de operación.

Los costos de inversión (CAPEX) comprenden principalmente:

- Módulos de membranas.
- Bastidores y colectores.
- Bombas.
- Tanques.
- Sistema CIP.
- Instrumentación y control.
- Obras civiles.
- Instalaciones eléctricas.
- Ingeniería y montaje.

Los costos de operación (OPEX) incluyen:

- Energía eléctrica.
- Productos químicos.
- Reposición de membranas.
- Mano de obra.
- Mantenimiento.
- Gestión de residuos.
- Agua utilizada en retrolavados.

En lo económico, controlar el fouling es una de las vías más eficaces para abaratar el costo del ciclo de vida completo de la planta. El motivo es que influye al mismo tiempo en la energía, los reactivos, cada cuánto se limpia y cuánto duran las membranas.

Conclusiones del caso de estudio

El análisis desarrollado demuestra que el diseño de una planta de microfiltración no consiste únicamente en calcular el área de membranas. Es necesario integrar la caracterización del agua, la selección tecnológica, el diseño hidráulico, la automatización, la instrumentación, el mantenimiento y la evaluación económica.

La metodología presentada constituye una guía general para el desarrollo de proyectos conceptuales y puede adaptarse a diferentes capacidades y tipos de agua. En proyectos ejecutivos será necesario complementar estos cálculos con simulaciones hidráulicas, especificaciones detalladas de equipos, planos de proceso (PFD y P&ID), análisis de riesgos, balances de energía y estudios económicos completos.

4.11 CRITERIOS DE INGENIERÍA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE MICROFILTRACIÓN

El diseño de sistemas de microfiltración no debe limitarse al cumplimiento de especificaciones técnicas. La experiencia obtenida en plantas industriales demuestra que pequeñas decisiones adoptadas durante la etapa de ingeniería pueden influir significativamente sobre la productividad, el consumo energético y la vida útil de las membranas. Los siguientes criterios sintetizan las principales recomendaciones derivadas de la práctica profesional.

Criterio 1. La caracterización del agua determina el éxito del proyecto

Toda planta de microfiltración debe comenzar con una caracterización representativa del agua de alimentación durante diferentes condiciones estacionales.

No es recomendable diseñar utilizando únicamente un análisis puntual, ya que las variaciones de turbidez, materia orgánica y temperatura modifican significativamente el comportamiento hidráulico del sistema.

Si se puede, los datos deben tomarse durante un ciclo hidrológico anual completo como mínimo.

Criterio 2. Diseñar para el peor escenario operativo

Se calcula la superficie de membrana con las condiciones más adversas que se esperen mientras la planta esté en servicio.

Diseñar utilizando únicamente valores promedio puede producir pérdidas de capacidad durante épocas de lluvias, incremento del fouling y mayores costos de operación.

Criterio 3. El pretratamiento es parte del sistema de membranas

Un error muy común es tomar la microfiltración como reemplazo del pretratamiento.

En realidad, ambos procesos son complementarios.

Una adecuada coagulación, floculación y sedimentación pueden reducir considerablemente la frecuencia de retrolavados y limpiezas químicas.

En términos económicos, destinar recursos a un buen pretratamiento suele ser más rentable que instalar más superficie de membranas.

Criterio 4. Operar por debajo del flujo crítico

El flujo crítico es un parámetro básico en el diseño actual.

Operar de manera constante por encima de ese valor acelera el ensuciamiento, acorta la vida de las membranas y eleva el gasto de energía.

La práctica industrial demuestra que operar ligeramente por debajo del flujo crítico suele proporcionar el menor costo total del ciclo de vida.

Criterio 5. La presión no debe utilizarse para compensar el fouling

Cuando el flujo disminuye debido al ensuciamiento, incrementar continuamente la presión transmembrana no constituye una solución adecuada.

Esta práctica acelera la compactación de la torta de filtración, incrementa el consumo energético y dificulta la recuperación del flujo mediante limpieza.

Si la presión sube de forma sostenida, hay que leerlo como una señal de diagnóstico, no como una forma de operar.

Criterio 6. Diseñar pensando en el mantenimiento

Toda planta industrial debe permitir realizar inspecciones, sustitución de módulos, mantenimiento de bombas y limpieza química sin detener completamente la producción.

Por esta razón, la incorporación de trenes redundantes y válvulas de aislamiento constituye una buena práctica de ingeniería.

Criterio 7. Automatizar las operaciones repetitivas

Los sistemas modernos incorporan control automático para:

- Retrolavados.
- Limpiezas CIP.
- Arranque y parada de bombas.
- Control de presión transmembrana.
- Alarmas de operación.
- Registro histórico de variables.

La automatización reduce errores operacionales y mejora la repetibilidad del proceso.

Criterio 8. Diseñar considerando el consumo energético

Aunque la microfiltración requiere presiones relativamente bajas, el consumo de energía continúa representando una fracción importante del costo operativo.

La selección adecuada de bombas, la optimización de pérdidas de carga y la operación dentro del intervalo óptimo de flujo permiten reducir significativamente este costo.

Criterio 9. Seleccionar materiales compatibles

Todos los componentes del sistema deben ser compatibles con:

- Agua de alimentación.
- Productos químicos de limpieza.
- Temperatura de operación.
- Presiones máximas.
- Condiciones sanitarias.

Muchas fallas tempranas en plantas industriales se deben a incompatibilidad química.

Criterio 10. Diseñar para facilitar futuras ampliaciones

La demanda de agua suele aumentar con el tiempo.

De ser posible, el diseño tiene que permitir agregar módulos nuevos sin rehacer la infraestructura que ya existe.

Esta filosofía reduce considerablemente los costos de expansión.

Criterio 11. Validar el diseño mediante pruebas piloto

En proyectos de gran capacidad o cuando el agua presenta características poco conocidas, las pruebas piloto constituyen una herramienta indispensable.

Permiten determinar:

- Flujo sostenible.
- Frecuencia de limpieza.
- Recuperación máxima.
- Comportamiento frente al fouling.
- Consumo de productos químicos.

La información obtenida reduce significativamente la incertidumbre del diseño.

Criterio 12. Evaluar el costo del ciclo de vida

La selección de una membrana no debe basarse exclusivamente en su precio de adquisición.

Debe evaluarse el costo total considerando:

- Inversión inicial.
- Energía eléctrica.
- Productos químicos.
- Sustitución de membranas.
- Mano de obra.
- Mantenimiento.
- Gestión de residuos.
- Vida útil.

En muchos proyectos sale más a cuenta una membrana de costo inicial alto, pues rinde más y necesita limpiarse con menos frecuencia.

Tabla 4.12

Criterios fundamentales para el diseño de sistemas de microfiltración.

Criterio	Recomendación principal	Impacto esperado
Caracterización del agua	Utilizar información representativa	Mayor confiabilidad del diseño
Diseño hidráulico	Operar por debajo del flujo crítico	Reducción del fouling
Pretratamiento	Minimizar la carga de sólidos	Mayor vida útil de las membranas
Presión de operación	Evitar incrementos innecesarios	Menor consumo energético
Automatización	Controlar retrolavados y CIP	Mayor estabilidad operacional
Redundancia	Incorporar trenes de reserva	Mayor disponibilidad
Compatibilidad química	Seleccionar materiales adecuados	Reducción de fallas
Análisis económico	Evaluar costo del ciclo de vida	Optimización financiera

Nota. Elaboración propia.

4.12 LECCIONES APRENDIDAS

Tras años de diseñar y operar plantas de microfiltración se sacan enseñanzas que van más allá de las ecuaciones y los cálculos de este capítulo. Son recomendaciones nacidas de la práctica profesional, que resumen puntos que a menudo deciden si un proyecto sale bien o fracasa.

Lección 1. Una membrana de alta calidad no compensará un pretratamiento deficiente.

Lección 2. El fouling debe prevenirse mediante un diseño adecuado; no debe gestionarse únicamente mediante limpiezas frecuentes.

Lección 3. La estabilidad operacional es más importante que alcanzar el máximo flujo instantáneo.

Lección 4. La automatización mejora la repetibilidad del proceso, pero requiere una instrumentación confiable y un mantenimiento preventivo.

Lección 5. La selección del módulo debe considerar no solo la productividad, sino también la facilidad de inspección, limpieza y sustitución.

Lección 6. Los costos de operación suelen superar ampliamente la inversión inicial durante la vida útil de la planta; por ello, la evaluación económica debe basarse en el costo del ciclo de vida.

Lección 7. Las pruebas piloto reducen significativamente la incertidumbre asociada al escalamiento industrial.

Lección 8. El diseño debe contemplar futuras ampliaciones, variaciones estacionales de la calidad del agua y cambios en la demanda.

Lección 9. La formación continua del personal operativo es un componente esencial para mantener el desempeño esperado de la instalación.

Lección 10. La microfiltración alcanza su máximo potencial cuando se integra adecuadamente con el resto de las operaciones unitarias del sistema de tratamiento.

Al concluir este capítulo, el lector dispone de los fundamentos científicos, criterios de diseño, herramientas de cálculo y recomendaciones prácticas necesarias para abordar proyectos de microfiltración. Estos conocimientos constituyen la base para el estudio de la **ultrafiltración**, tecnología que se desarrollará en el siguiente capítulo y que ampliará la capacidad de separación hacia coloides, macromoléculas, virus y materia orgánica de mayor complejidad.

4.13 EJERCICIOS RESUELTOS

Introducción

Para aprender Ingeniería de Membranas hay que combinar los fundamentos científicos con la práctica de diseñar procesos. Esta sección reúne ejercicios totalmente resueltos, que aplican los conceptos del capítulo con una metodología ordenada, parecida a la de proyectos reales. Se pone énfasis en interpretar técnicamente los resultados y usarlos para diseñar plantas de microfiltración, más allá de hacer la cuenta numérica.

Se aconseja al lector repetir cada cálculo con una hoja de cálculo o con Python, antes de pasar a los ejercicios de diseño de capítulos posteriores.

Ejercicio 4.1 Caracterización del agua para una planta de microfiltración

Objetivo

Evaluar la aptitud de una fuente superficial para ser tratada mediante microfiltración y establecer los requerimientos básicos de pretratamiento.

Enunciado

Una fuente superficial presenta las siguientes características:

Parámetro	Valor
Turbidez	55 NTU
SST	48 mg/L
pH	7,4

Parámetro	Valor
Temperatura	24 °C
SDI	5,2
Coliformes	Presentes

Con base en esta información:

a) Evalúe la factibilidad de utilizar microfiltración.

b) Proponga el esquema de pretratamiento.

c) Identifique los principales riesgos operacionales.

Fundamento teórico

La microfiltración elimina eficientemente sólidos suspendidos, bacterias y protozoarios. Sin embargo, cuando el agua presenta elevada turbidez o altas concentraciones de sólidos suspendidos, el fouling aumenta considerablemente. Por ello, el diseño debe comenzar con una evaluación integral de la calidad del agua.

Metodología de análisis

Este ejercicio se resuelve sin operaciones matemáticas. Los parámetros del agua se contrastan con los criterios generales de diseño, y de ese contraste surgen las operaciones unitarias que mantendrán estable el funcionamiento de la membrana.

Desarrollo

Paso 1. Evaluación de la turbidez

La turbidez de 55 NTU indica una carga importante de partículas suspendidas.

Aunque la microfiltración puede retener dichas partículas, una alimentación directa provocaría una rápida formación de la torta de filtración.

Paso 2. Evaluación de los sólidos suspendidos

Con 48 mg/L queda confirmado que el agua trae una cantidad considerable de sólidos capaces de causar fouling.

Paso 3. Evaluación microbiológica

Como hay coliformes, se necesita sí o sí una barrera física eficiente.

La microfiltración constituye una alternativa adecuada para remover bacterias y parte de los protozoarios.

Paso 4. Índice SDI

Un SDI de 5,2 indica una tendencia moderadamente alta al ensuciamiento.

Si después el agua alimentará un sistema de ósmosis inversa, es recomendable bajar este valor con un pretratamiento apropiado.

Resultado

La microfiltración resulta técnicamente viable.

No obstante, se recomienda incorporar previamente:

- Rejas.
- Coagulación.
- Floculación.
- Sedimentación.

Con este esquema llegarán menos sólidos a la membrana y esta durará más.

Interpretación ingenieril

El objetivo del pretratamiento no consiste únicamente en proteger la membrana.

También permite:

- reducir el consumo energético;
- disminuir la frecuencia de retrolavados;
- reducir el consumo de reactivos;
- aumentar la disponibilidad operacional;
- prolongar la vida útil de los módulos.

Desde la perspectiva económica, invertir en un buen pretratamiento suele ser más rentable que incrementar el área instalada de membranas.

Errores frecuentes

✓ Suponer que la microfiltración elimina todos los contaminantes presentes en el agua.
✓ Diseñar sin considerar las variaciones estacionales de la turbidez.
✓ Omitir el análisis del potencial de fouling.
✓ Dimensionar la planta utilizando únicamente un análisis puntual del agua.

Recomendaciones de diseño

Antes de iniciar el diseño definitivo debe desarrollarse una campaña de caracterización que abarque diferentes épocas del año. Asimismo, cuando el agua

alimentará procesos de nanofiltración u ósmosis inversa, resulta conveniente realizar pruebas piloto para estimar el comportamiento del sistema frente al ensuciamiento.

Ejercicio 4.2 Cómo elegir el tamaño de poro en una membrana de microfiltración

Objetivo

Elegir el tamaño de poro idóneo para un caso concreto, ponderando de manera simultánea qué tan bien separa, cuánto produce el sistema y cuán expuesto queda al ensuciamiento.

Enunciado

El proyecto es una planta de microfiltración para tratar agua superficial y abastecer a una industria alimentaria. Al analizar la fuente se detectan estos contaminantes:

Contaminante	Tamaño aproximado
Arena fina	20–500 µm
Algas	5–50 µm
Protozoarios	2–20 µm
Bacterias	0,3–5 µm

Determine:

a) El intervalo adecuado del tamaño de poro.

b) Justifique técnicamente su selección.

c) Explique las consecuencias de utilizar poros demasiado grandes o demasiado pequeños.

Fundamento teórico

La microfiltración separa por exclusión de tamaño. Por eso, el diámetro efectivo del poro figura entre las variables de diseño de mayor importancia.

Poros pequeños aumentan la eficiencia de remoción, pero incrementan la resistencia hidráulica y la tendencia al fouling.

Los poros grandes ayudan a la productividad, pero retienen peor a los microorganismos.

Diseñar es buscar el equilibrio entre la calidad del agua y la productividad.

Metodología de solución

El procedimiento comprende cuatro etapas:

1. Identificar el contaminante crítico.
2. Comparar su tamaño con el intervalo típico de microfiltración.
3. Seleccionar un tamaño de poro que garantice la retención requerida.
4. Evaluar el impacto hidráulico de dicha selección.

Desarrollo

Paso 1. Identificación del contaminante crítico

Aunque la arena y las algas presentan tamaños relativamente grandes, las bacterias constituyen el contaminante más pequeño cuya remoción es prioritaria.

Por ello, el diseño debe orientarse principalmente hacia su retención.

Paso 2. Intervalo de trabajo de la microfiltración

Las membranas comerciales presentan generalmente tamaños de poro comprendidos entre:

```
0,1 µm – 1,0 µm
```

Paso 3. Selección del tamaño de poro

Para garantizar una elevada eficiencia microbiológica se selecciona:

```
Diámetro de poro = 0,2 µm
```

Este valor permite:

- Retener prácticamente todas las bacterias.
- Eliminar protozoarios.
- Remover completamente algas.
- Mantener un flujo adecuado.

Paso 4. Evaluación hidráulica

La reducción del tamaño de poro produce:

- mayor resistencia hidráulica;
- incremento moderado de la presión requerida;
- mayor tendencia al ensuciamiento;
- mejor calidad del permeado.

En consecuencia, será necesario incorporar un adecuado pretratamiento para controlar el fouling.

Resultado

Se recomienda utilizar una membrana con tamaño de poro cercano a:

`0,2 µm`

Este valor representa un buen compromiso entre eficiencia microbiológica y productividad.

Interpretación ingenieril

La selección del tamaño de poro nunca debe realizarse únicamente considerando la calidad del agua obtenida.

También deben evaluarse:

- frecuencia de retrolavado;
- pérdida de carga;
- consumo energético;
- costo de operación;
- vida útil de la membrana.

Desde la perspectiva económica, un diámetro ligeramente mayor puede resultar más conveniente cuando existe un pretratamiento eficiente.

Errores frecuentes

❌ Seleccionar el menor tamaño de poro disponible pensando que siempre proporcionará el mejor diseño.

❌ No considerar el efecto del fouling.

❌ Ignorar la influencia del pretratamiento.

❌ Diseñar únicamente con base en la calidad del permeado.

Recomendaciones de diseño

Cuando el agua presente elevada variabilidad estacional, resulta recomendable realizar ensayos piloto con dos tamaños de poro diferentes antes de seleccionar la membrana definitiva.

Ejercicio 4.3 Cálculo del área total de membranas

Objetivo

Determinar el área efectiva de membranas necesaria para satisfacer un caudal de producción determinado.

Enunciado

Una planta debe producir:

$350\ m^3/h$

El fabricante recomienda operar con un flujo de diseño de:

$75\ L/m^2 \cdot h$

Calcular:

a) El área mínima requerida.

b) El área instalada considerando un factor de seguridad del 15 %.

Fundamento teórico

El área total de membranas depende directamente del caudal de producción e inversamente del flujo específico seleccionado.

La relación básica es:

$$\text{Área total} = \text{Caudal} / \text{Flujo}$$

El flujo utilizado corresponde al flujo sostenible y no al flujo máximo que puede alcanzar la membrana.

Metodología

1. Convertir unidades.
2. Calcular el área mínima.
3. Incorporar el factor de seguridad.
4. Interpretar el resultado.

Desarrollo

Paso 1. Conversión del flujo

$75\ L/m^2 \cdot h = 0{,}075\ m^3/m^2 \cdot h$

Paso 2. Área mínima

$$At = 350 / 0{,}075$$

$$At = 4\ 666{,}7\ m^2$$

Paso 3. Área instalada

Factor de seguridad:

15 %

Entonces

Área instalada

= 4666,7 × 1,15

= 5366,7 m²

Se adopta

Área instalada = 5 370 m²

Resultado

Área mínima

4 667 m²

Área instalada

5 370 m²

Interpretación ingenieril

El área instalada no constituye un desperdicio de inversión.

Representa una reserva de capacidad que permite:

- operar con menores flujos;
- disminuir el fouling;
- reducir el consumo energético;
- prolongar la vida útil;
- facilitar futuras ampliaciones.

En proyectos industriales suele resultar más económico incrementar moderadamente el área instalada que operar continuamente cerca del límite hidráulico de las membranas.

Errores frecuentes

❌ No convertir correctamente las unidades de L/m²·h a m³/m²·h.

❌ Olvidar el factor de seguridad.

❌ Utilizar el caudal promedio en lugar del caudal de diseño.

❌ Seleccionar el flujo máximo indicado por el fabricante sin considerar el flujo sostenible.

Recomendaciones de diseño

El flujo específico debe obtenerse preferentemente mediante pruebas piloto realizadas con el agua real del proyecto. En ausencia de estos ensayos, es recomendable utilizar valores conservadores sugeridos por el fabricante y verificar posteriormente el desempeño durante la puesta en marcha.

Ejercicio 4.4 Cálculo del número de módulos de membrana

Objetivo

Establecer cuántos módulos cubren el área de membrana calculada y con qué configuración puede la planta trabajar sin interrupciones.

Enunciado

La planta diseñada en el Ejercicio 4.3 requiere un área efectiva de membranas de:

$$A_t = 5\,370 \text{ m}^2$$

El fabricante ofrece módulos de fibra hueca con un área efectiva de:

$$A_m = 80 \text{ m}^2 \text{ por módulo}$$

Se solicita:

a) Determinar el número mínimo de módulos.

b) Proponer una distribución por trenes de operación.

c) Justificar la conveniencia de incorporar redundancia operacional.

Fundamento teórico

El tamaño de una planta de membranas sale de comparar el área efectiva que se requiere con el área útil de cada módulo comercial.

La relación básica es:

```
Número de módulos = Área total / Área por módulo
```

El resultado debe redondearse siempre al entero superior, ya que no es posible instalar fracciones de módulos.

En proyectos industriales es habitual incorporar módulos adicionales para permitir operaciones de mantenimiento sin interrumpir la producción.

Metodología de solución

El procedimiento comprende los siguientes pasos:

1. Determinar el número mínimo de módulos.

2. Redondear al entero superior.
3. Analizar posibles configuraciones hidráulicas.
4. Incorporar criterios de redundancia.

Desarrollo

Paso 1. Cálculo del número mínimo

Aplicando la ecuación de diseño:

$$Nm = At / Am$$

Sustituyendo:

$$Nm = 5370 / 80$$

$$Nm = 67{,}13 \text{ módulos}$$

Paso 2. Redondeo

Como no es posible instalar una fracción de módulo:

```
Número mínimo = 68 módulos
```

Paso 3. Distribución por trenes

Una configuración técnicamente adecuada consiste en dividir la planta en cuatro trenes.

```
68 módulos
↓
4 trenes
↓
17 módulos por tren
```

Esta distribución facilita:

- mantenimiento;
- limpieza;
- ampliaciones futuras;
- aislamiento de fallas.

Paso 4. Redundancia

Para una planta industrial que opere continuamente se recomienda incorporar un tren adicional de reserva.

Configuración recomendada:

```
5 trenes

4 en operación

1 en reserva
```

Este criterio corresponde a la filosofía de diseño **N + 1**, ampliamente utilizada en instalaciones industriales críticas.

Resultado

Número mínimo de módulos:

```
68 módulos
```

Configuración recomendada:

```
5 trenes

17 módulos por tren

4 operando

1 de reserva
```

Interpretación ingenieril

La instalación de módulos de reserva representa un incremento relativamente pequeño del CAPEX, pero proporciona importantes beneficios operacionales:

- continuidad del servicio;
- facilidad de mantenimiento;
- menor riesgo de interrupciones;
- posibilidad de ampliación futura.

En plantas industriales, la disponibilidad suele tener un mayor impacto económico que una ligera reducción de la inversión inicial.

Verificación del resultado

Antes de aceptar el diseño conviene verificar:

✓ El número de módulos es un número entero.

✓ Todos los trenes poseen una distribución uniforme.

✓ La planta puede continuar operando durante el mantenimiento de un tren.

✓ Existe espacio para futuras ampliaciones.

Errores frecuentes

❌ Redondear al entero inferior.

❌ Concentrar todos los módulos en un único tren.

❌ No considerar módulos de reserva.

❌ Diseñar sin prever ampliaciones.

Recomendaciones de diseño

En proyectos superiores a aproximadamente **2 000 m³/día**, resulta recomendable distribuir las membranas en varios trenes hidráulicamente independientes. Esta configuración mejora la flexibilidad operativa y reduce el impacto de una eventual parada por mantenimiento.

Ejercicio 4.5 Cálculo de la presión transmembrana (TMP)

Objetivo

Calcular la presión transmembrana en una unidad de microfiltración y discutir cómo repercute en el flujo de permeado.

Enunciado

En una planta de microfiltración en operación se registraron estas presiones:

Variable	Valor
Presión de alimentación	1,80 bar
Presión del concentrado	1,50 bar
Presión del permeado	0,20 bar

Determine:

a) La presión transmembrana.

b) Analice si el valor obtenido resulta adecuado para una planta de microfiltración.

Fundamento teórico

La presión transmembrana (TMP) es la fuerza impulsora que empuja el agua para que atraviese la membrana.

Se calcula mediante:

$$TMP = (Pf + Pc)/2 - Pp$$

donde:

Pf = presión de alimentación

Pc = presión del concentrado

Pp = presión del permeado

Metodología de solución

1. Determinar la presión promedio del lado de alimentación.
2. Restar la presión del permeado.
3. Comparar el resultado con el intervalo normal de operación.

Desarrollo

Paso 1. Presión promedio

```
(Pf + Pc) /2
= (1,80 + 1,50) /2
= 1,65 bar
```

Paso 2. Presión transmembrana

$$TMP = 1{,}65 - 0{,}20$$

$$TMP = 1{,}45 \text{ bar}$$

Resultado

$$TMP = 1{,}45 \text{ bar}$$

Interpretación ingenieril

Una presión transmembrana de **1,45 bar** se encuentra dentro del intervalo habitual de operación para sistemas de microfiltración.

Aun así, no hay que interpretar solo el valor absoluto.

Si durante la operación la TMP aumenta progresivamente mientras el flujo disminuye, probablemente el sistema está desarrollando fouling.

En cambio, si la TMP permanece estable y el flujo también, la operación puede considerarse hidráulicamente adecuada.

Por eso, dar seguimiento a la TMP es de los mejores indicadores del estado de la membrana.

Verificación del resultado

El resultado debe cumplir los siguientes criterios:

✓ Debe ser positivo.

✓ Debe ser inferior a la presión máxima recomendada por el fabricante.

✓ Debe ser coherente con el flujo observado.

✓ Debe compararse con el valor histórico de la planta.

Errores frecuentes

- ✗ Utilizar únicamente la presión de alimentación.
- ✗ Olvidar promediar la presión de alimentación y la del concentrado.
- ✗ Mezclar unidades de presión (bar, kPa o MPa).
- ✗ Interpretar un aumento de TMP como una mejora del desempeño.

Recomendaciones de diseño

Si se usa la presión transmembrana como la única variable de control, la operación queda mal vigilada. Un diagnóstico confiable del sistema requiere revisarla a la par del consumo específico de energía, la pérdida de carga, la temperatura y el flujo de permeado.

Ejercicio 4.6 Uso de la Ley de Darcy al diseñar una unidad de microfiltración

Objetivo

Obtener el flujo inicial de permeado con la Ley de Darcy, estudiar qué pasa cuando aumenta la resistencia hidráulica y entender cómo el fouling afecta el desempeño de una membrana.

Enunciado

Una planta piloto de microfiltración opera con las siguientes condiciones:

Parámetro	Valor
Presión transmembrana (TMP)	1,10 bar
Viscosidad del agua	$1{,}0 \times 10^{-3}$ Pa·s
Resistencia hidráulica inicial	$1{,}8 \times 10^{12}$ m^{-1}

Con el tiempo se observa que la resistencia hidráulica sube 40 % por el ensuciamiento.

Se solicita:

a) Calcular el flujo inicial de permeado.

b) Determinar el nuevo flujo cuando aumenta la resistencia.

c) Analizar las implicancias para la operación de la planta.

Fundamento teórico

La Ley de Darcy es el modelo hidráulico al que más se recurre para explicar cómo se transporta el agua en membranas porosas. Plantea que el flujo de permeado crece con la presión transmembrana y decrece con la viscosidad del fluido y con la resistencia hidráulica total, en proporción directa e inversa, respectivamente.

La expresión utilizada es:

$$J = TMP / (\mu \times Rt)$$

donde

J = flujo de permeado (m/s)

TMP = presión transmembrana (Pa)

μ = viscosidad dinámica (Pa·s)

Rt = resistencia hidráulica (m^{-1})

Metodología de solución

El procedimiento comprende los siguientes pasos:

1. Convertir la presión de bar a pascales.
2. Calcular el flujo inicial utilizando la Ley de Darcy.
3. Incrementar la resistencia hidráulica en un 40 %.
4. Calcular el nuevo flujo.
5. Comparar ambos resultados.

Desarrollo

Paso 1. Conversión de la presión

$$TMP = 1{,}10 \text{ bar}$$

Como

```
1 bar = 100 000 Pa
```

Entonces

$$TMP = 110\,000 \text{ Pa}$$

Paso 2. Cálculo del flujo inicial

Aplicando la Ley de Darcy

$$J = 110000 / (1{,}0 \times 10^{-3} \times 1{,}8 \times 10^{12})$$

$$J = 6{,}11 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Paso 3. Incremento de la resistencia

La nueva resistencia será

$$Rt = 1{,}8 \times 10^{12} \times 1{,}40$$

$$Rt = 2{,}52 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

Paso 4. Nuevo flujo

Aplicando nuevamente la Ley de Darcy

$$J = 110000 / (1{,}0 \times 10^{-3} \times 2{,}52 \times 10^{12})$$

$$J = 4{,}37 \times 10^{-5}\ \text{m/s}$$

Paso 5. Variación del flujo

La disminución porcentual del flujo es

```
Disminución (%) = ((6,11 − 4,37) / 6,11) × 100
Disminución = 28,5 %
```

Resultado

Tabla 4.14

Flujo de permeado frente a una mayor resistencia hidráulica: su efecto.

Condición	Flujo
Membrana limpia	$6{,}11 \times 10^{-5}$ m/s
Membrana con fouling	$4{,}37 \times 10^{-5}$ m/s

Nota. Elaboración propia.

Interpretación ingenieril

Aunque la resistencia aumentó un **40 %**, el flujo disminuyó aproximadamente un **29 %**.

Se ve así que el ensuciamiento afecta de manera directa la productividad de la planta.

Al diseñar, no es buena estrategia intentar recuperar ese flujo solo con más presión transmembrana, porque eso elevaría el consumo de energía y facilitaría que la torta de filtración se compacte.

La alternativa recomendada consiste en controlar el ensuciamiento mediante un adecuado pretratamiento, programas de retrolavado y limpieza química.

Verificación del resultado

Antes de aceptar el cálculo conviene comprobar que:

✓ La presión fue convertida correctamente a pascales.

✓ La viscosidad corresponde a la temperatura considerada.

✓ El flujo disminuye cuando aumenta la resistencia.

✓ Los resultados se encuentran dentro del intervalo esperado para sistemas de microfiltración.

Errores frecuentes

❌ Utilizar la presión en bar directamente en la ecuación.

❌ No convertir correctamente las unidades.

❌ Confundir resistencia de la membrana con resistencia total.

❌ Interpretar el incremento de presión como solución permanente al fouling.

Aplicación en software de ingeniería

En una hoja de cálculo, este cálculo se arma fácilmente con las expresiones siguientes:

$$TMP = 110000$$

$$\mu = 1{,}0E\text{-}3$$

$$Rt = 1{,}8E12$$

$$J = TMP/(\mu * Rt)$$

En Python alcanza con declarar las variables y aplicar la misma ecuación; así se automatiza el cálculo y se hacen análisis de sensibilidad ante cambios de presión, viscosidad o resistencia hidráulica.

Recomendaciones de diseño

Al operar plantas industriales conviene seguir de forma permanente cómo evoluciona la resistencia hidráulica, para lo cual se miran juntos el flujo de permeado y la presión transmembrana. Si la resistencia crece sin pausa, es una alerta temprana de fouling y permite programar correcciones antes de que la productividad caiga mucho.

Ejercicio 4.7 Balance de agua en una planta de microfiltración

Objetivo

Con la producción exigida y la recuperación global del sistema, estimar el caudal que debe entrar y el volumen que se va en retrolavados y purgas.

Enunciado

Una planta de microfiltración debe producir:

`5 000 m³/día`

La recuperación global del sistema es:

`96 %`

Se solicita:

a) Calcular el caudal de alimentación.

b) Determinar el volumen de agua utilizado en retrolavados y purgas.

c) Explicar por qué importa este balance al dimensionar la planta.

Fundamento teórico

La recuperación es la parte del agua de alimentación que termina convertida en permeado.

Se define mediante la expresión:

```
Recuperación = Caudal de permeado / Caudal de alimentación
```

Despejando el caudal de alimentación:

```
Caudal de alimentación = Caudal de permeado / Recuperación
```

Metodología de solución

1. Expresar la recuperación en forma decimal.
2. Calcular el caudal de alimentación.
3. Determinar el volumen destinado a retrolavados y purgas.
4. Interpretar los resultados desde el punto de vista del diseño hidráulico.

Desarrollo

Paso 1. Conversión de la recuperación

```
Recuperación = 96 %
Recuperación = 0,96
```

Paso 2. Cálculo del caudal de alimentación

```
Qalimentación = 5000 / 0,96
Qalimentación = 5 208,3 m³/día
```

Paso 3. Agua destinada a retrolavados y purgas

```
Qretrolavado = 5208,3 – 5000
Qretrolavado = 208,3 m³/día
```

Resultado

Tabla 4.15

Balance simplificado de agua para una planta de microfiltración.

Corriente	Caudal (m³/día)
Alimentación	5 208,3
Permeado	5 000,0
Retrolavados y purgas	208,3

Nota. Elaboración propia.

Interpretación ingenieril

Aunque la recuperación del **96 %** parece elevada, el volumen destinado diariamente a retrolavados y purgas supera los **200 m³**, cantidad que debe ser considerada en el diseño de tanques, tuberías, sistemas de drenaje y tratamiento de efluentes.

Este ejemplo enseña que el balance hídrico fija la capacidad de los sistemas auxiliares y los costos de operación, aparte del tamaño de la captación.

Verificación del resultado

✓ El caudal de alimentación debe ser mayor que el caudal de permeado.

✓ El volumen destinado a retrolavados debe ser positivo.

✓ La suma del permeado y de las pérdidas debe coincidir con el caudal de alimentación.

Errores frecuentes

✗ Expresar el porcentaje de recuperación como 96 en lugar de 0,96.

✗ Restar el porcentaje de recuperación en lugar de utilizar la ecuación correspondiente.

✗ No considerar el agua consumida durante los ciclos de limpieza.

Aplicación en software de ingeniería

Excel resuelve el balance con fórmulas simples. Con Python se automatiza y permite recorrer varios escenarios de recuperación para estimar cuánto varían el agua consumida, el volumen de los tanques y los costos de operación.

Recomendaciones de diseño

En proyectos que reutilizan agua, parte del volumen de retrolavado puede regresar al proceso tras un tratamiento adecuado. Antes de decidirlo hay que pesar la calidad del agua recuperada, el costo adicional de tratarla y el ahorro que supone consumir menos agua fresca.

Ejercicio 4.8 Energía específica consumida por una planta de microfiltración

Objetivo

Obtener cuánta energía consume una planta de microfiltración por unidad de producción y analizar su efecto en los costos de operación y en la eficiencia energética del proceso.

Enunciado

Una planta de microfiltración consume una potencia eléctrica total de:

$$P = 240\ kW$$

La producción de permeado es:

$$Q = 180\ m^3/h$$

Se solicita:

a) Calcular el consumo específico de energía.

b) Analizar si el valor obtenido resulta razonable para una planta de microfiltración.

c) Proponer alternativas para disminuir el consumo energético sin afectar la producción.

Fundamento teórico

Por consumo específico de energía se entiende la energía eléctrica que cuesta producir cada unidad de volumen de agua.

Sirve para medir qué tan rentable es operar una planta de membranas y también para contrastar tecnologías de tratamiento distintas.

La ecuación utilizada es:

$$CEE = P / Q$$

donde:

$$CEE = \text{consumo específico de energía } (kWh/m^3)$$

$$P = \text{potencia eléctrica } (kW)$$

$$Q = \text{producción de agua } (m^3/h)$$

Metodología de solución

El procedimiento consiste en:

1. Identificar la potencia instalada.
2. Determinar la producción horaria.
3. Aplicar la ecuación del consumo específico.
4. Interpretar el resultado desde el punto de vista energético.

Desarrollo

Paso 1. Datos

$$P = 240\ kW$$

$$Q = 180\ m^3/h$$

Paso 2. Aplicación de la ecuación

$$CEE = 240 / 180$$

Paso 3. Resultado

$$CEE = 1{,}33 \text{ kWh/m}^3$$

Resultado

El consumo específico de energía es:

$$CEE = 1{,}33 \text{ kWh/m}^3$$

Interpretación ingenieril

Este resultado indica que para producir un metro cúbico de agua tratada la planta consume aproximadamente **1,33 kWh de energía eléctrica**.

El resultado calculado está dentro del rango que se espera de una planta de microfiltración con bombeo, retrolavado e instrumentación auxiliar.

Sin embargo, el consumo específico depende de numerosos factores, entre ellos:

- presión transmembrana;
- pérdidas de carga en tuberías;
- eficiencia de las bombas;
- frecuencia de retrolavados;
- nivel de fouling;
- temperatura del agua;
- configuración hidráulica.

Por eso, la energía consumida debe leerse junto con la productividad, no como un dato suelto.

Verificación del resultado

Antes de aceptar el cálculo conviene verificar que:

✓ La potencia corresponde al consumo total de la planta.

✓ La producción está expresada en las mismas unidades de tiempo.

✓ El resultado posee unidades de kWh/m³.

✓ El valor obtenido resulta coherente con el tipo de instalación.

Errores frecuentes

❌ Utilizar únicamente la potencia de las bombas principales.

❌ No considerar los equipos auxiliares.

❌ Mezclar unidades horarias y diarias.

❌ Comparar consumos específicos obtenidos bajo condiciones de operación diferentes.

Aplicación en software de ingeniería

Este indicador puede calcularse automáticamente en Excel o Python utilizando los datos registrados por el sistema SCADA. Su seguimiento histórico permite identificar incrementos anormales del consumo energético asociados al fouling o al deterioro de la eficiencia de bombeo.

Recomendaciones de diseño

La reducción del consumo específico puede lograrse mediante:

- selección de bombas de alta eficiencia;
- disminución de pérdidas de carga;
- optimización del flujo de operación;
- reducción del fouling mediante un mejor pretratamiento;
- programación adecuada de los retrolavados;
- operación cercana al punto de máxima eficiencia de las bombas.

Una reducción modesta del consumo específico produce, durante toda la vida útil de la planta, un ahorro económico apreciable.

Ejercicio 4.9 Diagnóstico operacional del fouling

Objetivo

A partir de cómo se comporta hidráulicamente una planta de microfiltración, identificar qué ensuciamiento prevalece y sugerir medidas correctivas.

Enunciado

Tras dos meses de operar sin interrupción se anotan estos cambios:

- El flujo de permeado disminuye progresivamente.
- La presión transmembrana aumenta de manera continua.
- La calidad del permeado permanece constante.
- Se observa que la pérdida de carga del módulo, medida de la entrada a la salida, sube.

- El consumo específico de energía se incrementa aproximadamente un 18 %.

Se solicita:

a) Diagnosticar el problema.

b) Explicar las causas probables.

c) Proponer acciones correctivas.

d) Indicar si resulta conveniente incrementar la presión de operación.

Ejercicio 4.9 Diagnóstico operacional del fouling

Objetivo

Con las variables de operación que se registraron mientras el sistema funcionaba, diagnosticar el tipo de ensuciamiento de una planta de microfiltración y recomendar las acciones correctivas más adecuadas.

Enunciado

Una planta de microfiltración, tras dos meses de funcionar de forma continua, se comporta así:

- El flujo de permeado disminuye progresivamente.
- La presión transmembrana aumenta de manera continua.
- La calidad del permeado permanece prácticamente constante.
- Entre entrada y salida del módulo, la pérdida de carga sube con el tiempo.
- El consumo específico de energía se incrementa aproximadamente un 18 %.

Con base en esta información:

a) Identifique el problema principal.

b) Explique las causas más probables.

c) Proponga las acciones correctivas inmediatas.

d) Indique si sería recomendable aumentar la presión de operación.

Fundamento teórico

Mientras la planta de microfiltración opera, el fouling hace que la resistencia hidráulica aumente de a poco. Para conservar el flujo de permeado, el sistema exige entonces mayor presión. Si nadie corrige esto, aumentan los gastos de energía y cae la producción.

El diagnóstico del fouling debe realizarse analizando simultáneamente diversas variables de operación, ya que ninguna de ellas, por sí sola, permite identificar con certeza el problema.

Metodología de análisis

El procedimiento recomendado comprende las siguientes etapas:

1. Analizar la evolución del flujo de permeado.
2. Evaluar el comportamiento de la presión transmembrana.
3. Verificar si existe deterioro en la calidad del permeado.
4. Analizar la pérdida de carga.
5. Formular un diagnóstico integral.

Desarrollo

Paso 1. Evaluación del flujo

Que el flujo baje de a poco indica que el agua encuentra cada vez más resistencia para pasar.

Este comportamiento es característico del desarrollo de fouling.

Paso 2. Evaluación de la presión transmembrana

El incremento continuo de la presión transmembrana confirma que el sistema necesita una mayor fuerza impulsora para mantener la producción.

Esta condición es consistente con el aumento de la resistencia hidráulica.

Paso 3. Evaluación de la calidad del permeado

La calidad permanece constante.

Esto indica que la membrana continúa reteniendo adecuadamente los contaminantes y que no existen evidencias de ruptura o deterioro estructural.

No se trata, pues, de que la membrana haya fallado: lo que ocurre es que perdió permeabilidad.

Paso 4. Evaluación de la pérdida de carga

Dado que la pérdida de carga aumenta, queda confirmado que se acumulan materiales poco a poco en los canales hidráulicos o sobre la membrana.

Paso 5. Evaluación del consumo energético

El mayor consumo específico de energía es efecto directo de la presión adicional que se requiere para mantener la producción.

Este comportamiento confirma el diagnóstico de ensuciamiento progresivo.

Resultado

En conjunto, las variables estudiadas señalan que la planta está atravesando un fouling progresivo; lo más probable es que lo originen la materia orgánica y los sólidos suspendidos que se depositan sobre la membrana.

No existen evidencias de daño estructural de la membrana.

Interpretación ingenieril

Un error habitual es atribuir la caída del flujo a una falla de la membrana.

En realidad, la combinación de:

- disminución del flujo,
- aumento de la presión transmembrana,
- incremento de la pérdida de carga,
- aumento del consumo energético,
- calidad constante del permeado,

corresponde al comportamiento típico de un proceso de ensuciamiento reversible.

Antes de pensar en cambiar las membranas, hay que revisar las condiciones de operación y qué tan eficaces son los procedimientos de limpieza.

Acciones correctivas recomendadas

Se recomienda ejecutar las siguientes acciones en el orden indicado:

1. Verificar el funcionamiento del sistema de retrolavado.
2. Revisar la eficiencia del pretratamiento (coagulación, floculación y sedimentación).
3. Realizar una limpieza química CIP si el retrolavado no recupera el flujo esperado.
4. Revisar la calidad del agua de alimentación para identificar cambios estacionales.
5. Analizar la frecuencia de los ciclos de limpieza y ajustarla si es necesario.

¿Debe aumentarse la presión de operación?

No.

Subir la presión solo compensa la pérdida de flujo por un rato y apura el fouling.

La solución debe orientarse a reducir la resistencia hidráulica y no a incrementar la fuerza impulsora.

Verificación del diagnóstico

Antes de emitir el diagnóstico definitivo conviene comprobar que:

✓ No existen daños mecánicos en la membrana.

✓ Los sensores de presión funcionan correctamente.

✓ Los medidores de caudal han sido calibrados.

✓ La calidad del agua de alimentación no ha cambiado significativamente.

Errores frecuentes

✗ Sustituir inmediatamente las membranas.

✗ Incrementar continuamente la presión de operación.

✗ Ignorar el comportamiento histórico de la planta.

✗ Analizar únicamente una variable operacional.

✗ No verificar el desempeño del pretratamiento.

Aplicación en software de ingeniería

Los sistemas SCADA modernos permiten generar tendencias históricas de flujo, presión transmembrana, pérdida de carga y consumo energético.

El análisis conjunto de estas variables facilita la detección temprana del fouling y permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo.

Recomendaciones de diseño

Toda planta industrial necesita un sistema automático que adquiera datos y registre sin pausa las variables hidráulicas principales. Estudiar las tendencias aporta mucho más que evaluar mediciones sueltas, y es una herramienta esencial para optimizar la operación y alargar la vida de las membranas.

Ejercicio 4.10 Diseño conceptual de una planta de microfiltración

Objetivo

Aplicar los conceptos desarrollados en el capítulo para llegar a un diseño conceptual de planta de microfiltración que depure agua superficial destinada a uso industrial.

Enunciado

Una industria de alimentos requiere producir **3 600 m³/día** de agua de proceso a partir de una fuente superficial con las siguientes características:

Parámetro	Valor
Caudal requerido	3 600 m³/día
Turbidez máxima	65 NTU
Sólidos suspendidos	55 mg/L
pH	7,2
Temperatura	23 °C
Coliformes totales	Presentes
SDI	5,0

Con estos datos, se pide un diseño conceptual que comprenda:

a) Selección del esquema de tratamiento.

b) Selección del tipo de membrana y del módulo.

c) Estimación del área total de membranas.

d) Número preliminar de módulos.

e) Configuración de los trenes de operación.

f) Balance simplificado de agua.

g) Recomendaciones para el sistema de limpieza.

h) Instrumentación básica requerida.

Este ejercicio integra todos los contenidos del capítulo y constituye el modelo metodológico que se utilizará posteriormente en los capítulos dedicados a ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. En el siguiente desarrollo resolveremos este proyecto completo paso a paso, siguiendo la metodología empleada en estudios de prefactibilidad de plantas de tratamiento de agua.

Ejercicio 4.10 Diseño conceptual de una planta de microfiltración

Objetivo

Elaborar el diseño conceptual de una planta de microfiltración que produzca agua de uso industrial, con base en las herramientas de cálculo, los fundamentos científicos y los criterios de diseño expuestos antes.

Enunciado

Una industria de alimentos requiere producir **3 600 m³/día** de agua para sus procesos industriales a partir de una fuente superficial con las siguientes características:

Parámetro	Valor
Producción requerida	3 600 m³/día
Turbidez máxima	65 NTU
Sólidos suspendidos	55 mg/L
pH	7,2
Temperatura	23 °C
Coliformes	Presentes
SDI	5,0

Se solicita desarrollar un diseño conceptual que incluya:

a) Selección del tren de tratamiento.

b) Selección del tipo de membrana.

c) Cálculo preliminar del área de membranas.

d) Número de módulos.

e) Balance simplificado de agua.

f) Sistema de limpieza.

g) Instrumentación principal.

h) Recomendaciones de ingeniería.

Fundamento teórico

Aproximaciones sucesivas, eso es lo que implica diseñar una planta de microfiltración: hay que pasar por la caracterización del agua, el dimensionamiento hidráulico, la elección de equipos y la evaluación operacional. La planta no se limita a cumplir un caudal fijado; debe operar estable, ser viable económicamente y ajustarse a los cambios de calidad del agua.

Las estimaciones de la fase conceptual son preliminares y se perfeccionan más adelante, en las ingenierías básica y de detalle.

Metodología de solución

El desarrollo comprende las siguientes etapas:

1. Evaluación de la calidad del agua.

2. Selección del proceso de tratamiento.
3. Selección de la membrana.
4. Dimensionamiento preliminar.
5. Balance hidráulico.
6. Definición del sistema de limpieza.
7. Selección de la instrumentación.
8. Evaluación técnica del diseño.

Desarrollo

Paso 1. Evaluación de la calidad del agua

La turbidez de **65 NTU** y la concentración de **55 mg/L** de sólidos suspendidos indican que la microfiltración puede aplicarse satisfactoriamente, siempre que se incorpore un pretratamiento adecuado.

Los coliformes presentes confirman que hace falta una barrera física para controlar lo microbiológico.

El SDI indica una tendencia moderada al ensuciamiento, así que habrá que vigilar de cerca el control del fouling.

Paso 2. Selección del tren de tratamiento

Dadas las características del agua, el esquema de proceso que se propone es el siguiente:

```
Captación
↓
Rejas
↓
Coagulación
↓
Floculación
↓
Sedimentación
↓
Microfiltración
```

```
↓
Tanque de agua filtrada
↓
Desinfección
↓
Almacenamiento
```

Con este esquema llegan menos sólidos a la membrana y la operación gana estabilidad.

Paso 3. Selección de la membrana

Se seleccionan membranas de **fibra hueca** debido a:

- elevada superficie específica;
- facilidad de retrolavado;
- automatización sencilla;
- amplia utilización industrial;
- elevada confiabilidad.

Se adopta un flujo conservador de diseño:

$$J = 80\ L/m^2 \cdot h$$

Conversión:

$$J = 0{,}08\ m^3/m^2 \cdot h$$

Paso 4. Cálculo del área de membranas

Producción requerida:

```
3 600 m³/día
```

Producción horaria:

$$Q = 3\,600 / 24$$

$$Q = 150\ m^3/h$$

Aplicando la ecuación de diseño:

$$At = Q / J$$

Sustituyendo:

$$At = 150 / 0{,}08$$

Resultado:

$$At = 1\ 875\ m^2$$

Se adopta un factor de seguridad del **20 %**.

```
Área instalada
= 1 875 × 1,20
= 2 250 m²
```

Paso 5. Número de módulos

Se seleccionan módulos comerciales de:

```
90 m² por módulo
```

Entonces:

$$Nm = 2\ 250 / 90$$

$$Nm = 25 \text{ módulos}$$

Se propone la siguiente distribución:

- cinco trenes;
- cinco módulos por tren;
- cuatro trenes en operación;
- un tren en reserva.

Esta configuración facilita el mantenimiento y permite mantener la producción durante las limpiezas programadas.

Paso 6. Balance simplificado de agua

Se considera una recuperación global del **95 %**.

Entonces:

```
Alimentación
= 3 600 / 0,95
= 3 789 m³/día
```

Agua utilizada en retrolavados:

```
3 789 − 3 600
= 189 m³/día
```

El tanque de permeado debe tener volumen suficiente para atender a la vez al proceso industrial y a los ciclos de retrolavado.

Paso 7. Sistema de limpieza

Se recomienda incorporar:

- retrolavado automático cada 30 minutos;
- limpieza con aire comprimido;
- sistema CIP automatizado;
- monitoreo continuo de la presión transmembrana;
- limpieza química basada en condición y no únicamente en tiempo.

Paso 8. Instrumentación básica

La planta deberá disponer, como mínimo, de:

Tabla 4.16

Instrumentación básica recomendada para una planta de microfiltración.

Variable	Instrumento
Caudal de alimentación	Caudalímetro electromagnético
Caudal de permeado	Caudalímetro electromagnético
Presión de alimentación	Transmisor de presión
Presión del permeado	Transmisor de presión
TMP	Cálculo automático mediante PLC
Turbidez	Turbidímetro en línea
pH	Analizador continuo
Temperatura	Sensor Pt-100
Nivel de tanques	Transmisor ultrasónico

Nota. Elaboración propia.

Resultado

El diseño conceptual obtenido se resume en la siguiente tabla.

Tabla 4.17

Resumen del diseño conceptual de la planta.

Parámetro	Resultado
Producción	3 600 m³/día
Área instalada	2 250 m²
Número de módulos	25
Trenes	5
Recuperación	95 %
Agua para retrolavado	189 m³/día

Nota. Elaboración propia.

Interpretación ingenieril

Este diseño equilibra bien productividad, confiabilidad y mantenimiento sencillo. Contar con un tren de reserva evita detener la producción durante las limpiezas, y adoptar un flujo de diseño conservador reduce la probabilidad de fouling y extiende la vida de las membranas.

Desde el punto de vista económico, el ligero incremento del área instalada se compensa mediante una menor frecuencia de limpieza, menor consumo energético y mayor disponibilidad operacional.

Verificación del diseño

Antes de aceptar el diseño conceptual deben comprobarse los siguientes aspectos:

✓ La calidad del agua ha sido caracterizada durante diferentes épocas del año.

✓ El flujo de diseño corresponde al flujo sostenible recomendado por el fabricante.

✓ Existe capacidad suficiente para el retrolavado.

✓ Se dispone de un tren de reserva.

✓ La instrumentación permite monitorear las variables críticas del proceso.

Errores frecuentes

❌ Dimensionar utilizando el caudal promedio sin considerar variaciones futuras.

❌ Omitir el pretratamiento.

❌ No considerar el agua destinada al retrolavado.

❌ Diseñar sin redundancia operacional.

❌ Seleccionar el flujo máximo recomendado por el fabricante en lugar del flujo sostenible.

Aplicación en software de ingeniería

Este diseño puede implementarse inicialmente en una hoja de cálculo para realizar balances hidráulicos y estimaciones preliminares de equipos. Posteriormente, durante la ingeniería básica, es recomendable utilizar software especializado para verificar pérdidas de carga, seleccionar bombas, analizar escenarios de operación y desarrollar la simulación del proceso.

Recomendaciones de diseño

El diseño conceptual constituye únicamente la primera etapa del proyecto. Antes de iniciar la ingeniería de detalle deberán realizarse ensayos piloto con el agua real,

verificar el comportamiento frente al fouling, optimizar el pretratamiento y efectuar un análisis económico que incluya CAPEX, OPEX y costo del ciclo de vida. Estas actividades permitirán reducir la incertidumbre del proyecto y aumentar la confiabilidad de la planta durante toda su vida útil.

Conclusión del Capítulo 4

La microfiltración constituye una de las tecnologías de membranas más consolidadas en la Ingeniería del Agua y representa, en numerosos casos, la primera barrera física dentro de los sistemas modernos de tratamiento. Su capacidad para remover sólidos suspendidos, bacterias, algas y protozoarios, junto con su bajo consumo energético y elevado grado de automatización, la convierten en una alternativa altamente competitiva para aplicaciones municipales e industriales.

En este capítulo repasamos cómo se transporta el agua por membranas porosas y qué fundamentos científicos lo explican. Vimos también las configuraciones hidráulicas principales, los mecanismos de ensuciamiento, las estrategias de limpieza, los criterios de diseño y las aplicaciones industriales más relevantes. Con ejercicios resueltos se expuso además el método para dimensionar una planta de microfiltración, que parte de caracterizar el agua y llega a una selección preliminar de equipos.

Sin embargo, la microfiltración presenta limitaciones inherentes al tamaño de sus poros. Aunque constituye una barrera muy eficiente frente a partículas y microorganismos de dimensiones micrométricas, no permite remover coloides finos, macromoléculas disueltas, virus ni la mayor parte de la materia orgánica de bajo peso molecular. Estas limitaciones impulsaron el desarrollo de membranas con poros de menor tamaño y mayor capacidad de separación.

La siguiente etapa en la evolución de las tecnologías de membranas corresponde a la **ultrafiltración**, proceso que mantiene principios hidráulicos semejantes a los estudiados en este capítulo, pero incorpora mecanismos adicionales de separación asociados al tamaño molecular y al peso molecular de los solutos. La comprensión de la microfiltración constituye, por tanto, la base indispensable para abordar el diseño y la operación de sistemas de ultrafiltración.

Cabe agregar algo: la membrana elegida no basta por sí sola para que una planta de microfiltración funcione bien. Lo que enseña la industria es que el mejor resultado llega cuando el diseño articula pretratamiento, hidráulica, automatización, estrategias de

limpieza y monitoreo continuo de las variables de operación. Mirar el conjunto como sistema es un principio esencial de la Ingeniería del Agua, que se retomará en los capítulos que siguen.

CAPÍTULO 5

ULTRAFILTRACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

Pocas tecnologías de membranas han crecido tanto en las últimas décadas como la ultrafiltración (UF). Con un proceso físico continuo y muy automatizable, retira coloides, virus, proteínas y macromoléculas, además de materia orgánica con gran peso molecular. Hoy opera en la producción de agua potable, en el reúso de aguas residuales, en las industrias alimentaria, farmacéutica y biotecnológica, y en fabricar semiconductores.

Desde el punto de vista de la Ingeniería del Agua, la ultrafiltración representa la evolución natural de la microfiltración. Mientras esta última separa partículas del orden de décimas de micrómetro, la ultrafiltración trabaja en una escala mucho menor, donde el tamaño de los poros ya no constituye el único parámetro de diseño. En UF adquiere especial importancia el concepto de **corte de peso molecular (Molecular Weight Cut-Off, MWCO)**, ampliamente utilizado para seleccionar membranas según el tamaño molecular de los solutos que se desea retener.

La creciente preocupación por la presencia de virus, compuestos orgánicos naturales y microorganismos resistentes a los tratamientos convencionales ha impulsado el desarrollo de plantas de ultrafiltración de gran capacidad, capaces de producir agua de elevada calidad con consumos energéticos moderados y elevados niveles de confiabilidad.

En la microfiltración la separación se rige casi por completo por la exclusión de tamaño. En la ultrafiltración, en cambio, también participan la polarización por concentración, la adsorción sobre la superficie y el transporte de macromoléculas. Estos fenómenos determinan cómo responde hidráulicamente la membrana y qué tan rápido se ensucia.

Quien diseña debe entender que la ultrafiltración rinde según varios factores a la vez: la química del agua, cuán grandes son las moléculas contaminantes, la hidrodinámica

del equipo y las condiciones de operación. Por eso el tamaño de poro no basta para elegir la membrana; también hay que mirar el peso molecular de lo que se pretende separar.

La ultrafiltración constituye, además, una excelente etapa de pretratamiento para nanofiltración y ósmosis inversa, ya que reduce significativamente la carga de coloides y materia orgánica responsable del fouling en estas tecnologías. Por ello, en numerosos proyectos modernos se integra dentro de trenes de tratamiento multibarrera que combinan diferentes procesos de membranas para alcanzar calidades de agua cada vez más exigentes.

Industrialmente, la ultrafiltración sigue abriéndose camino en sectores de alta tecnología. La farmacia la usa para purificar productos biotecnológicos y concentrar proteínas; en alimentos se aplica a leche, suero y bebidas; en aguas residuales produce efluentes aptos para reúso; y en la obtención de agua ultrapura es una etapa básica que antecede a la nanofiltración y a la ósmosis inversa.

Con los nuevos materiales poliméricos, las membranas cerámicas y las superficies modificadas mediante nanotecnología, estos sistemas aguantan mejor los químicos, resisten más esfuerzo mecánico y duran más. Eso les abre más campos de aplicación y abarata la operación.

El capítulo recorre los principios científicos que rigen la ultrafiltración y las membranas que se usan en la industria. Después analiza la polarización por concentración y los criterios de diseño, repasa las aplicaciones más relevantes y explica cómo se desarrolla un proyecto de ingeniería para una planta de este tipo.

Al cerrar el capítulo, el lector sabrá elegir una membrana de ultrafiltración, plantear criterios de diseño, calcular su desempeño hidráulico y elaborar un diseño conceptual de planta, ya sea para tratar agua o para separaciones industriales.

5.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA ULTRAFILTRACIÓN

En la ultrafiltración, una presión empuja el agua a través de una membrana semipermeable; las macromoléculas, los coloides, los virus y otras especies más grandes no logran pasar.

La fuerza impulsora sigue siendo la presión transmembrana, igual que en la microfiltración, pero separar se vuelve más complicado: lo retenido mide casi lo mismo que los poros y, a menudo, lo mismo que la capa límite que se forma sobre la membrana.

Por eso el sistema responde a la hidrodinámica, la convección y la difusión molecular, y también a cómo se afectan entre sí, en lo fisicoquímico, el soluto disuelto y el polímero de la membrana.

Desde la ingeniería, se puede ver la ultrafiltración como un transporte selectivo. El agua es la que pasa con mayor facilidad; las macromoléculas se retienen más o menos según su tamaño, su forma y sus propiedades superficiales.

A diferencia de la microfiltración, donde el diámetro de poro suele expresarse directamente en micrómetros, en ultrafiltración es más frecuente especificar la membrana mediante su **corte de peso molecular (MWCO)**, parámetro que representa el peso molecular aproximado de una molécula para la cual la membrana alcanza una retención cercana al 90 %.

Gracias a esta idea, la membrana se escoge de acuerdo con el tamaño de las proteínas, polisacáridos, virus u otras macromoléculas que contenga el agua o el proceso industrial.

Interpretación ingenieril

El tamaño de poro continúa siendo importante, pero deja de ser el principal criterio de selección. En ultrafiltración el ingeniero diseña considerando la distribución de pesos moleculares de los contaminantes y no únicamente sus dimensiones geométricas.

5.2.1 PRINCIPIOS DE SEPARACIÓN

El mecanismo predominante en ultrafiltración continúa siendo la exclusión por tamaño; sin embargo, cuando las dimensiones de las moléculas se aproximan al tamaño de los poros, aparecen fenómenos adicionales que modifican la eficiencia de separación.

Al acercarse a la membrana, las macromoléculas pueden deformarse, orientarse e interactuar con ella en grado variable. Además, lo que se acumula junto a la superficie crea un gradiente de concentración que modifica el flujo de permeado y da origen a la polarización por concentración, tema del apartado siguiente.

Como consecuencia, dos membranas con el mismo tamaño nominal de poro pueden presentar comportamientos diferentes cuando se utilizan para separar proteínas, polisacáridos o compuestos húmicos de distintas características.

Desde la perspectiva del diseño, la selección de una membrana debe considerar simultáneamente:

- peso molecular del contaminante;
- forma y flexibilidad de la molécula;
- concentración de alimentación;
- interacción química con la superficie de la membrana;
- condiciones hidrodinámicas del sistema.

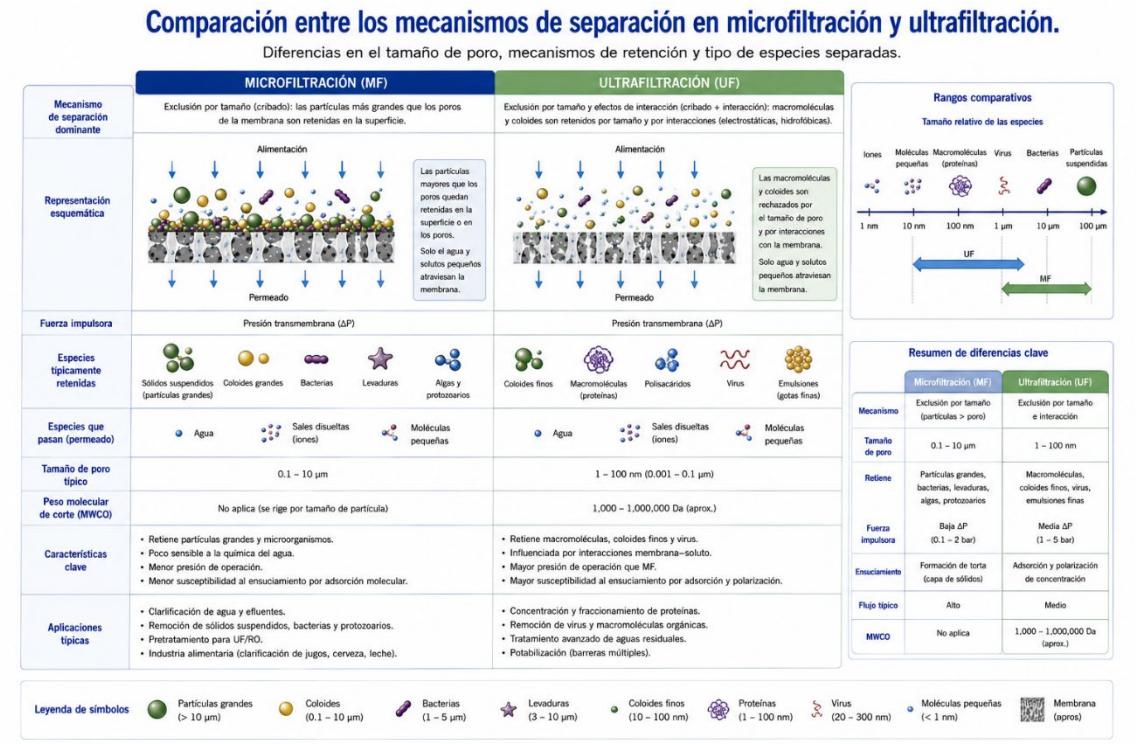
5.2.2 TAMAÑO DE PORO Y CORTE DE PESO MOLECULAR (MWCO)

Para microfiltración, el criterio habitual de selección es el diámetro nominal del poro, en micrómetros. Pero ese dato no alcanza si se quiere separar proteínas, virus, polisacáridos u otras macromoléculas: su tamaño se parece al del interior de la membrana y su geometría cambia bastante de una a otra.

Por esta razón, la ultrafiltración emplea como parámetro de diseño el **corte de peso molecular** o **Molecular Weight Cut-Off (MWCO)**. Este parámetro representa el peso molecular aproximado de una molécula para la cual la membrana presenta una retención cercana al 90 %, bajo condiciones normalizadas de ensayo.

Figura 5.1

Comparación entre los mecanismos de separación en microfiltración y ultrafiltración.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Strathmann (2011).

Es importante señalar que el MWCO no constituye una propiedad absoluta de la membrana, sino un parámetro operacional que depende del método experimental utilizado, de la naturaleza de la molécula patrón y de las condiciones de operación. En consecuencia, dos fabricantes pueden reportar valores ligeramente diferentes para membranas aparentemente similares.

Para el ingeniero, el MWCO es útil porque le indica qué membrana usar según el tamaño molecular de aquello que quiere retener o dejar pasar. Se aprovecha especialmente al concentrar proteínas, recuperar enzimas, separar macromoléculas o producir agua de alta calidad.

Los intervalos de MWCO de mayor uso industrial aparecen en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1.

Clasificación general de membranas de ultrafiltración según su corte de peso molecular

MWCO (Da)	Aplicaciones principales
1 000	Separación de pequeños péptidos y compuestos orgánicos de bajo peso molecular
5 000	Concentración de proteínas pequeñas y enzimas
10 000	Purificación de proteínas y recuperación de biomoléculas
30 000	Tratamiento de aguas superficiales y eliminación de virus

MWCO (Da)	Aplicaciones principales
50 000	Industria alimentaria y concentración de proteínas del suero
100 000	Clarificación de soluciones coloidales y tratamiento de efluentes

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Strathmann (2011).

Debe resaltarse que el MWCO se expresa en **Dalton (Da)**, unidad que corresponde aproximadamente a la masa de un átomo de hidrógeno. En aplicaciones de ingeniería también se utilizan múltiplos como el kilodalton (kDa), donde:

```
1 kDa = 1000 Da
```

Así, una membrana con un MWCO de **10 kDa** presenta una retención cercana al 90 % para moléculas con un peso molecular aproximado de **10 000 Da**.

Con todo, lo que se retiene en realidad varía además con la forma de la molécula, con qué tan flexibles sean sus cadenas de polímero, con las interacciones electrostáticas y con la hidrodinámica del proceso.

Interpretación ingenieril

Mientras que el diámetro de poro constituye el principal criterio de selección en microfiltración, el MWCO se convierte en el parámetro fundamental en ultrafiltración. En la práctica profesional, el ingeniero selecciona primero el peso molecular del compuesto que desea retener y, posteriormente, elige una membrana cuyo MWCO garantice el grado de separación requerido.

5.2.3 COEFICIENTE DE RECHAZO

La eficiencia de una membrana se cuantifica mediante el **coeficiente de rechazo**, parámetro que expresa la capacidad de la membrana para impedir el paso de un determinado soluto.

Se define mediante la siguiente expresión:

```
Coeficiente de rechazo = (1 − Cp/Cf) × 100
```

Forma abreviada:

$$R = (1 - Cp/Cf) \times 100$$

donde:

R = coeficiente de rechazo (%)

Cp = concentración del soluto en el permeado

Cf = concentración del soluto en la alimentación

Cuando el valor de **R** se aproxima al **100 %**, la membrana retiene prácticamente la totalidad del soluto. En cambio, valores bajos indican que la mayor parte del compuesto atraviesa la membrana.

Cuando se trabaja con ultrafiltración, este coeficiente permite evaluar cuánta materia orgánica natural, proteína, virus o coloide se remueve.

El rechazo no queda fijado solo por la membrana. Inciden también otros factores, como los siguientes:

- peso molecular del soluto;
- geometría molecular;
- carga eléctrica;
- concentración de alimentación;
- presión transmembrana;
- velocidad tangencial;
- temperatura.

Por ello, el rechazo debe determinarse experimentalmente para las condiciones específicas de cada proceso.

Ejemplo de aplicación

Una corriente de alimentación contiene **250 mg/L** de proteína y el permeado presenta **8 mg/L**.

Aplicando la ecuación:

$$R = (1 - 8/250) \times 100$$

$$R = 96{,}8\ \%$$

Este resultado indica que la membrana retiene aproximadamente el **97 %** de la proteína presente en la alimentación.

Interpretación ingenieril

Rechazar mucho no equivale a diseñar mejor. En algunos procesos industriales lo que interesa es recuperar el permeado; en otros, el producto valioso es el concentrado. Por eso la membrana se escoge según la meta del proceso, sin perseguir a toda costa el coeficiente de rechazo más alto.

5.2.4 VARIABLES QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE LA ULTRAFILTRACIÓN

El comportamiento hidráulico y la eficiencia de separación de una membrana de ultrafiltración dependen de múltiples variables que interactúan simultáneamente. Desde la perspectiva del diseño, estas variables pueden agruparse en cuatro categorías principales:

Variables de la membrana

- Material de fabricación.
- MWCO.
- Hidrofilicidad.
- Rugosidad superficial.
- Espesor de la capa activa.

Variables del agua de alimentación

- Concentración de sólidos suspendidos.
- Materia orgánica natural.
- Proteínas.
- Coloides.
- pH.
- Fuerza iónica.
- Temperatura.

Variables hidráulicas

- Presión transmembrana.
- Velocidad tangencial.
- Flujo de permeado.
- Tiempo de operación.
- Recuperación.

Variables operacionales

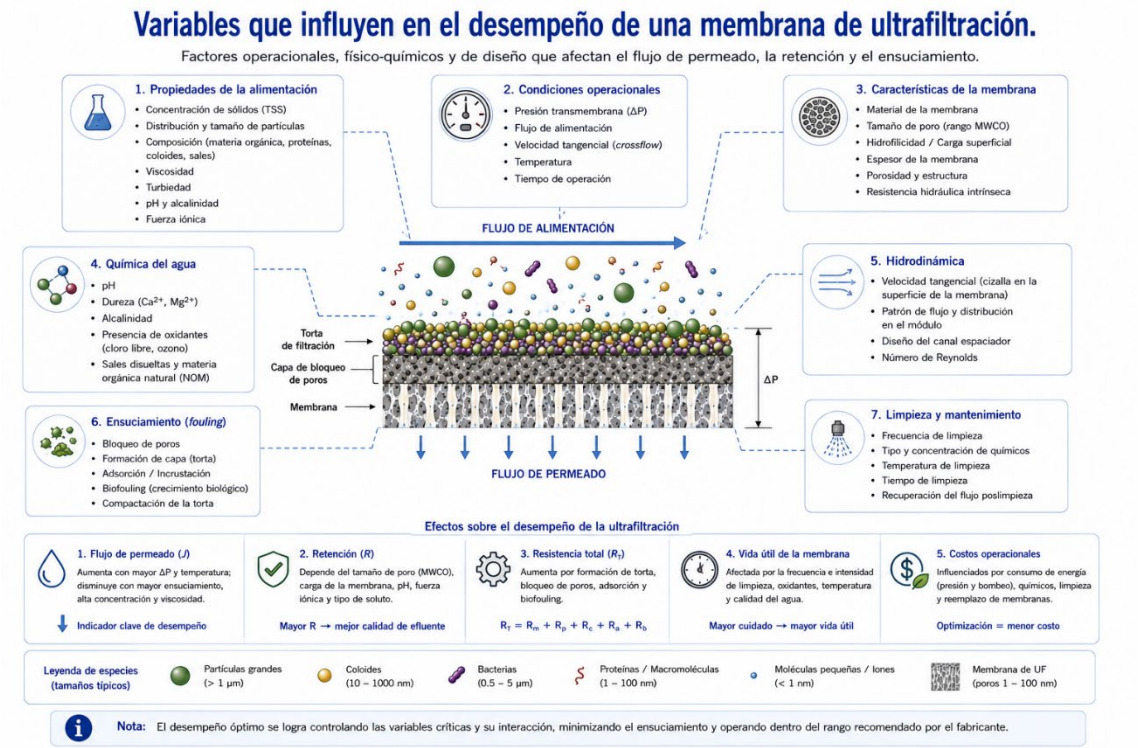
- Frecuencia de retrolavado.
- Limpieza química.

- Configuración del módulo.
- Estrategia de control.
- Automatización.

Al estudiar estas variables de manera integrada, es posible optimizar al mismo tiempo la productividad, el gasto energético y la duración de las membranas.

Figura 5.2.

Variables que influyen en el desempeño de una membrana de ultrafiltración.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012) y Mulder (1996).

Al finalizar esta sección, el lector comprenderá que la selección de una membrana de ultrafiltración no depende únicamente del tamaño de poro, sino de una combinación de propiedades físicas, químicas e hidráulicas. En el siguiente apartado se estudiará uno de los fenómenos más importantes en el diseño de estos sistemas: **la polarización por concentración**, responsable de limitar el flujo de permeado y de condicionar el desempeño de prácticamente todas las aplicaciones industriales de ultrafiltración.

5.3 POLARIZACIÓN POR CONCENTRACIÓN

Pocos fenómenos influyen tanto en un sistema de ultrafiltración como la polarización por concentración. No se confunde con el fouling, que es un depósito

permanente o semipermanente sobre la membrana: aquí los solutos se acumulan solo de forma temporal junto a ella, arrastrados por el flujo de permeado.

Cuando el agua atraviesa la membrana, los solutos retenidos no pueden acompañar completamente al solvente y comienzan a acumularse cerca de la superficie. Esta acumulación origina una capa límite cuya concentración es mayor que la existente en el volumen principal del fluido.

Entre la alimentación y la superficie de la membrana aparece entonces una diferencia de concentración. Esa diferencia empuja una difusión que va al revés del arrastre convectivo, y pasado un tiempo ambos procesos se igualan y quedan en equilibrio dinámico.

Esta capa límite cambia cómo responde hidráulicamente la membrana, hace caer el permeado y prepara el terreno para que después aparezca el fouling.

En términos de Ingeniería Química, se trata de un fenómeno en que se transportan a la vez cantidad de movimiento y masa, con convección y difusión actuando en sentidos opuestos.

5.3.1 FORMACIÓN DE LA CAPA LÍMITE

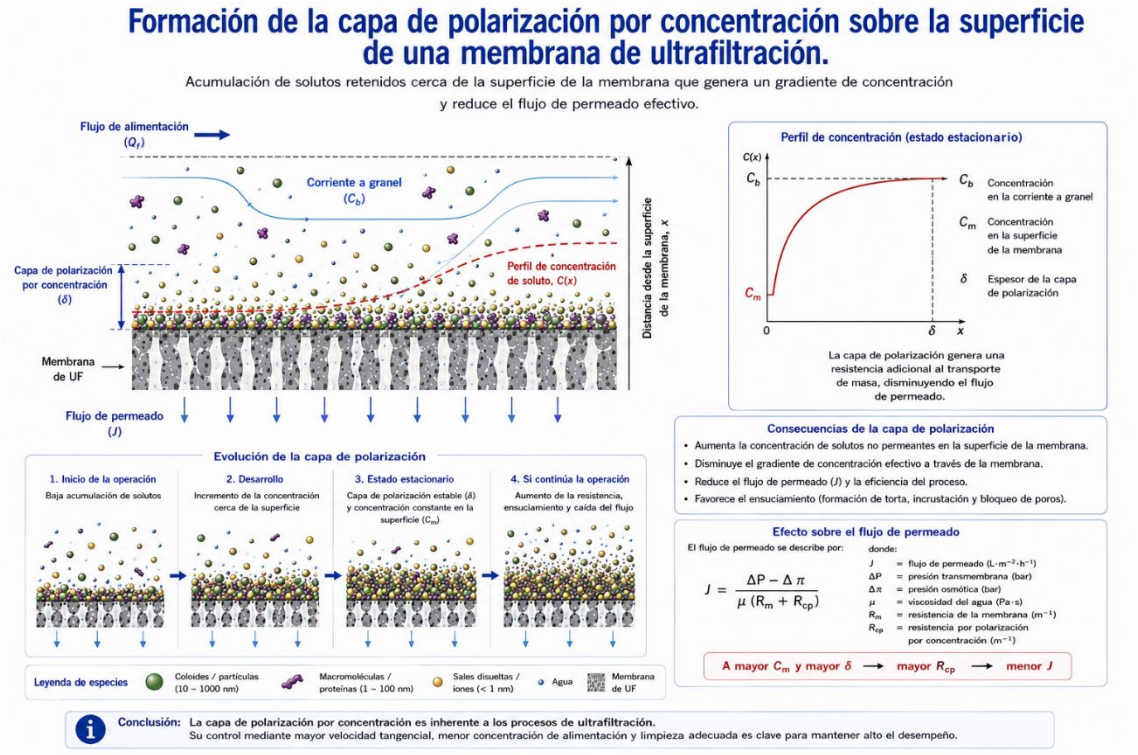
Cuando una membrana de ultrafiltración está operando, se reconocen tres regiones bien distintas.

La primera corresponde al flujo principal o **corriente de alimentación**, donde la concentración del soluto permanece prácticamente uniforme debido a la mezcla producida por la velocidad tangencial.

La segunda región corresponde a la **capa límite hidrodinámica**, en la cual la velocidad del fluido disminuye progresivamente debido a la condición de no deslizamiento sobre la superficie de la membrana.

Figura 5.3

Así se forma la capa de polarización en una membrana de ultrafiltración.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Cussler (2009).

Finalmente, sobre la superficie de la membrana se desarrolla una **capa límite de concentración**, donde los solutos retenidos alcanzan concentraciones considerablemente superiores a las existentes en el seno del líquido.

En la Figura 5.4 se aprecia cómo se distribuyen las velocidades y las concentraciones en este proceso.

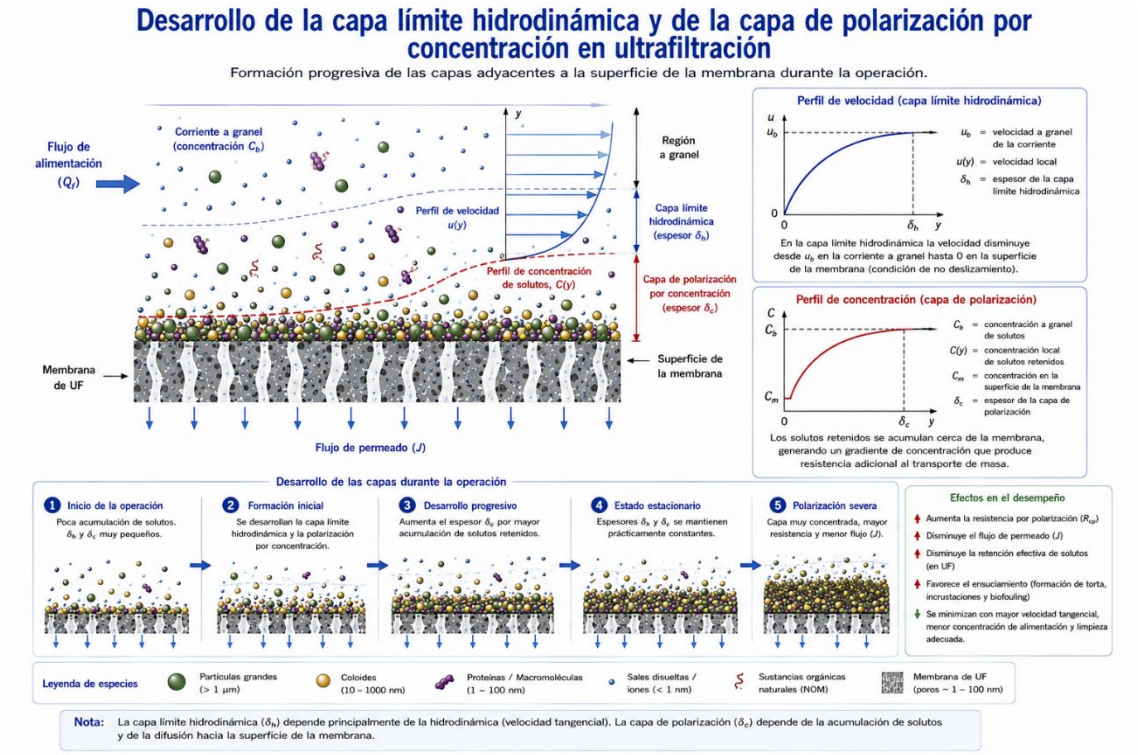
En el diseño, lo que más condiciona el espesor de la capa son estos factores:

- velocidad tangencial;
- viscosidad del fluido;
- coeficiente de difusión del soluto;
- geometría del canal de flujo;
- rugosidad superficial de la membrana.

Con estas variables, el ingeniero puede controlar qué tan intensa resulta la polarización por concentración.

Figura 5.4

Desarrollo de las capas límite hidrodinámica y de polarización por concentración en la ultrafiltración.



Nota. Elaboración propia.

5.3.2 BALANCE DE TRANSPORTE DE MASA

Para describir cómo se acumulan los solutos en la membrana, se plantea un balance entre dos formas de transporte.

El primero corresponde al transporte convectivo, producido por el flujo de permeado, que tiende a llevar los solutos hacia la membrana.

El segundo corresponde al transporte difusivo, originado por el gradiente de concentración, que tiende a devolver los solutos hacia la corriente principal.

Cuando ambos mecanismos alcanzan el equilibrio se establece una condición estacionaria.

Este fenómeno puede expresarse mediante la siguiente relación simplificada.

```
Transporte convectivo = Transporte difusivo
```

Expresado matemáticamente:

$$J \times C = D \times (dC/dx)$$

donde

J = flujo de permeado

C = concentración del soluto

D = coeficiente de difusión

```
dC/dx = gradiente de concentración
```

Esta ecuación es una de las bases del diseño en ultrafiltración, porque explica que, al subir el flujo de permeado, la polarización por concentración suba también.

Interpretación ingenieril

A mayor flujo de permeado, más rápido llegan los solutos a la membrana. Cuando la difusión no alcanza a compensar ese aporte, la concentración en la superficie sube poco a poco hasta perjudicar el desempeño del sistema.

Por esta razón, en ultrafiltración no siempre resulta conveniente operar con el mayor flujo posible.

5.3.3 CONCENTRACIÓN SUPERFICIAL

En una membrana de ultrafiltración pueden distinguirse dos concentraciones de interés para el diseño.

La primera corresponde a la concentración del agua de alimentación.

```
Cf
```

La segunda variable es qué tan concentrada queda la zona pegada a la membrana.

```
Cm
```

Generalmente se cumple que:

```
Cm > Cf
```

Si la operación es exigente, en la superficie puede haber una concentración varias veces mayor que en el seno del líquido.

Este incremento favorece:

- incremento de la viscosidad local;
- formación de geles;
- precipitación de compuestos;
- adsorción sobre la membrana;
- aparición de fouling irreversible.

De allí que una meta central del diseño sea contener la concentración en la superficie dentro de márgenes aceptables.

5.3.4 FACTORES QUE AFECTAN LA POLARIZACIÓN POR CONCENTRACIÓN

Varios factores determinan qué tan fuerte es la polarización, y al diseñar una planta hay que examinarlos en conjunto.

Velocidad tangencial

Si aumenta la velocidad tangencial, el fluido se mezcla mejor y la capa límite resulta más delgada.

Así la concentración superficial baja y el permeado puede sostenerse por más tiempo.

Pero con velocidades demasiado grandes los equipos consumen más energía y se desgastan mecánicamente.

Presión transmembrana

El aumento de la presión incrementa inicialmente el flujo de permeado.

Sin embargo, cuando la polarización alcanza valores elevados, el beneficio obtenido disminuye progresivamente y finalmente desaparece.

Este comportamiento conduce al concepto de **flujo límite**, que será desarrollado en el siguiente apartado.

Temperatura

Con mayor temperatura, el agua se vuelve menos viscosa y el coeficiente de difusión crece.

Como consecuencia, la polarización por concentración disminuye.

Aun así, el límite superior de temperatura lo marca lo que tolere térmicamente el material de la membrana.

Concentración de alimentación

Si la alimentación llega más concentrada, la concentración en la superficie también será más alta.

Por ello, las aplicaciones industriales con soluciones altamente concentradas presentan mayores problemas de polarización y fouling.

Tabla 5.2

Influencia de las principales variables sobre la polarización por concentración

Variable	Efecto sobre la polarización
Incremento de la velocidad tangencial	Disminuye
Incremento de la presión transmembrana	Aumenta
Incremento de la concentración de alimentación	Aumenta
Incremento del coeficiente de difusión	Disminuye
Incremento de la temperatura	Generalmente disminuye

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Un error común en ultrafiltración es creer que el flujo crece sin fin al subir la presión transmembrana. Sin embargo, la polarización por concentración fija un techo práctico. Por eso el diseño moderno regula a la vez la velocidad tangencial, la presión y la hidrodinámica, buscando la máxima productividad sin capas concentradas en la superficie de la membrana.

5.3.5 FLUJO LÍMITE

Al diseñar una planta de ultrafiltración hay que averiguar entre qué valores la membrana opera estable y con rentabilidad. Intuitivamente parecería que más presión transmembrana siempre da más permeado, pero lo observado en la industria es que esa proporción se rompe cuando la polarización por concentración se vuelve fuerte.

Al comienzo, más presión da más permeado, casi en proporción directa. Luego los solutos se concentran en la superficie, la resistencia al transporte aumenta y el flujo crece cada vez menos. Finalmente se llega a un estado donde más presión apenas cambia el flujo.

Esta condición se denomina **flujo límite** y representa el máximo flujo que puede mantenerse de forma continua sin provocar un incremento inaceptable de la polarización por concentración y del fouling.

Para la ingeniería, el flujo límite pesa más como restricción de diseño que la presión máxima que resiste la membrana.

Interpretación física del flujo límite

El flujo límite refleja el balance entre el empuje que da la presión y la resistencia extra que aportan los solutos acumulados en la superficie de la membrana.

Mientras no se llegue a ese punto, subir la presión incrementa claramente la producción de permeado.

Después de alcanzarlo, prácticamente toda la energía adicional suministrada al sistema se consume en incrementar la concentración superficial de los solutos y no en aumentar la producción de agua.

En consecuencia, operar por encima del flujo límite produce:

- incremento acelerado del fouling;
- mayor consumo específico de energía;
- aumento de la frecuencia de limpieza;
- reducción de la vida útil de la membrana;
- incremento de los costos de operación.

En términos económicos, estas consecuencias casi siempre superan el beneficio de cualquier pequeño aumento de producción que se logre.

Comportamiento del flujo de permeado

El comportamiento típico de una membrana de ultrafiltración puede dividirse en tres regiones.

Región I. Operación estable

Aquí casi no hay polarización por concentración, y el flujo crece prácticamente en línea recta con la presión transmembrana.

Corresponde al intervalo recomendado para el diseño.

Región II. Zona de transición

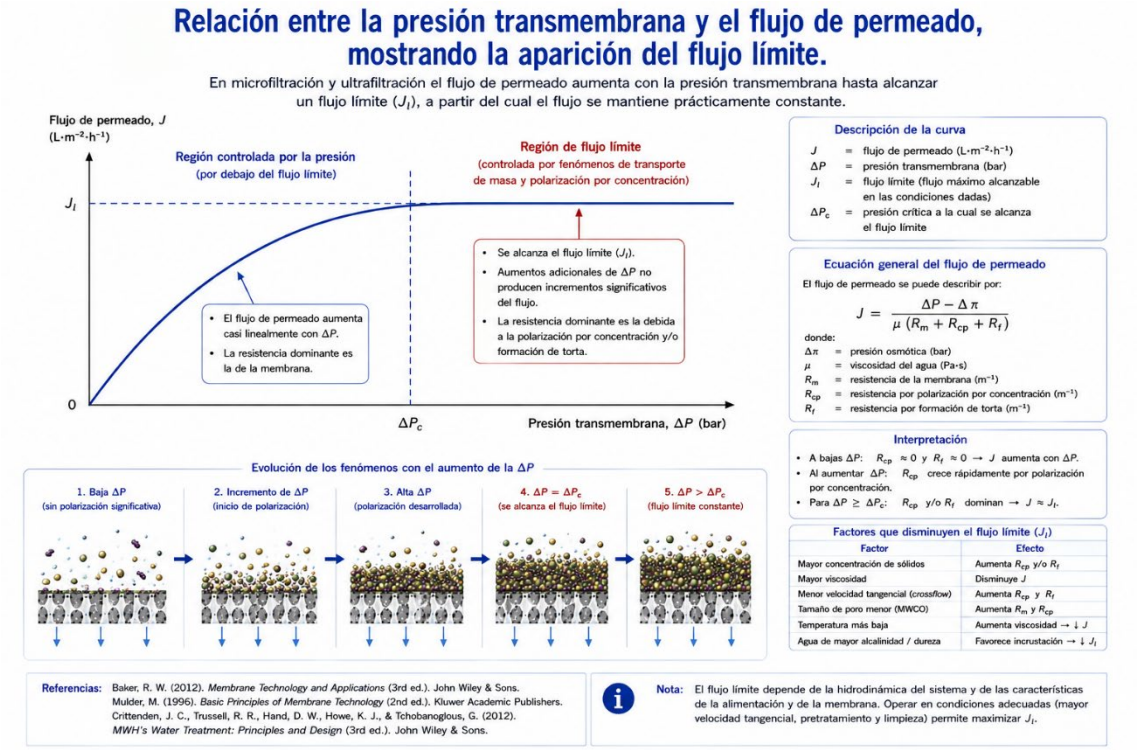
La concentración superficial comienza a incrementarse rápidamente.

La curva pierde pendiente porque la resistencia al transporte va en aumento.

El sistema continúa operando, aunque el margen de seguridad frente al fouling comienza a reducirse.

Figura 5.5.

Relación entre la presión transmembrana y el flujo de permeado



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Crittenden et al. (2012).

Región III. Flujo límite

La acumulación de solutos alcanza niveles elevados.

El flujo permanece prácticamente constante aun cuando la presión continúe aumentando.

En esta región el riesgo de fouling irreversible aumenta considerablemente.

Interpretación ingenieril

La planta no debe diseñarse para operar permanentemente en el flujo límite.

El criterio recomendado consiste en seleccionar un flujo de diseño comprendido entre el **70 % y el 90 % del flujo límite**, dependiendo de la variabilidad de la calidad del agua y de la experiencia operacional disponible.

Con este margen la operación es más estable y los costos de mantenimiento bajan de manera apreciable.

5.3.6 FLUJO CRÍTICO

Aunque los términos **flujo límite** y **flujo crítico** suelen utilizarse indistintamente, representan conceptos diferentes.

El **flujo crítico** corresponde al valor máximo del flujo para el cual el fouling permanece prácticamente despreciable.

Bajo este valor casi no se acumula material sobre la membrana, y el flujo se mantiene estable durante periodos largos de operación.

Cuando el flujo supera el valor crítico comienza un incremento acelerado del ensuciamiento.

Este comportamiento puede representarse de manera simplificada mediante la siguiente relación conceptual.

```
Si J < Jcr

El fouling es mínimo.

Si J > Jcr

El fouling aumenta rápidamente.
```

donde:

J = flujo de permeado

Jcr = flujo crítico

En muchas aplicaciones industriales el flujo crítico resulta inferior al flujo límite.

Por esta razón, ciertos diseñadores toman como criterio principal el flujo crítico al escoger las condiciones de operación.

Diferencias entre flujo crítico y flujo límite

Tabla 5.3.

Comparación entre flujo crítico y flujo límite

Característica	Flujo crítico	Flujo límite
Inicio del fouling	Sí	Ya existe fouling importante
Incremento del flujo con la presión	Elevado	Muy pequeño
Riesgo operacional	Bajo	Alto
Consumo energético	Moderado	Elevado
Recomendación de operación	Muy recomendable	No recomendable para operación continua

Nota. Elaboración propia.

Aplicaciones en el diseño de plantas

Durante la ingeniería conceptual de una planta de ultrafiltración es habitual realizar pruebas piloto para determinar experimentalmente el flujo crítico y el flujo límite del agua específica que será tratada.

Con esta información pueden establecerse:

- el flujo de diseño;
- el número de módulos;
- la frecuencia de retrolavados;
- los intervalos de limpieza química;
- el consumo energético esperado;
- el costo de operación.

La determinación experimental de estos parámetros reduce considerablemente la incertidumbre del proyecto.

5.3.7 ESTRATEGIAS PARA CONTROLAR LA POLARIZACIÓN POR CONCENTRACIÓN

Controlar la polarización por concentración es una de las metas principales al operar sistemas de ultrafiltración.

Las estrategias más utilizadas son las siguientes:

Incrementar la velocidad tangencial

Con más velocidad el fluido se mezcla mejor y la capa límite se hace más delgada.

Pero una velocidad excesiva eleva el consumo de energía y erosiona algunos componentes.

Optimizar la presión transmembrana

La presión debe seleccionarse de manera que el sistema opere por debajo del flujo crítico y con un margen suficiente respecto al flujo límite.

Subir la presión sin necesidad no mejora la productividad y encarece la operación.

Mejorar el pretratamiento

Si antes se retiran los sólidos suspendidos, los coloides y la materia orgánica, la capa de polarización se forma mucho menos y el fouling tarda más en aparecer.

Optimizar la recuperación

Recuperaciones excesivamente elevadas incrementan la concentración de solutos y favorecen la polarización.

Por ello, al fijar la recuperación hay que equilibrar el ahorro de agua con la estabilidad de la operación.

Diseñar adecuadamente los canales hidráulicos

Cómo están configurados los canales incide de forma directa en el reparto de velocidades, en la turbulencia y en cuán gruesa es la capa límite.

Un diseño hidráulico adecuado mejora el transporte de masa y permite operar con mayores flujos sin incrementar el fouling.

Reflexión ingenieril

Uno de los errores más comunes consiste en intentar aumentar la producción de una planta incrementando únicamente la presión transmembrana. La experiencia industrial demuestra que esta estrategia rara vez resulta efectiva a largo plazo. El aumento sostenido de la productividad se consigue mediante un enfoque integral que combine un pretratamiento eficiente, una adecuada hidrodinámica, la selección correcta del flujo de diseño y un programa de limpieza basado en el comportamiento real de la membrana. Estos principios constituyen la base del diseño moderno de sistemas de ultrafiltración y serán aplicados en los capítulos posteriores dedicados a nanofiltración y ósmosis inversa.

5.3.8 MODELOS DE POLARIZACIÓN POR CONCENTRACIÓN

Los modelos matemáticos de la polarización por concentración han servido para optimizar plantas de ultrafiltración, tanto en su diseño como en su funcionamiento. Enlazan el permeado con la velocidad tangencial, con la cantidad de soluto que se concentra sobre la membrana y con el coeficiente que mide la transferencia de masa.

Aunque existen diversos enfoques teóricos, el más utilizado en ingeniería es el **modelo de película (Film Theory Model)**, debido a su sencillez y a la buena aproximación que proporciona para la mayoría de aplicaciones industriales.

El modelo parte de que, sobre la membrana, hay una película líquida de espesor más o menos constante, y que en ella la masa se transporta sobre todo por difusión molecular.

Lo que se acumula de solutos en esa película explica por qué la concentración superficial sube poco a poco y el flujo de permeado cae.

En la práctica, con este modelo se calcula cómo afectan al desempeño hidráulico los cambios de temperatura, de velocidad tangencial y de concentración en la alimentación.

Modelo de película

El modelo establece la siguiente relación:

$$J = k \times \ln (Cm / Cf)$$

donde

J = flujo de permeado

k = coeficiente de transferencia de masa

Cm = concentración sobre la superficie de la membrana

Cf = concentración de la alimentación

ln = logaritmo natural

Según la ecuación, el permeado no se determina solo por la presión que se aplica; cuenta también cómo se transporta la masa desde la membrana hacia el resto del líquido.

Interpretación física

Cuando aumenta la velocidad tangencial, el coeficiente de transferencia de masa (**k**) también aumenta.

Como consecuencia:

- disminuye el espesor de la capa límite;
- disminuye la concentración superficial;
- disminuye la polarización;
- aumenta el flujo sostenible.

Por eso, diseñar bien hidráulicamente los canales de alimentación importa tanto como escoger la membrana.

Influencia del coeficiente de transferencia de masa

El coeficiente de transferencia de masa depende principalmente de:

- velocidad tangencial;
- viscosidad del fluido;
- difusividad del soluto;

- geometría del canal;
- régimen de flujo;
- temperatura.

En consecuencia, durante la ingeniería básica suele estimarse mediante correlaciones experimentales obtenidas a partir de números adimensionales.

5.3.9 CORRELACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA

En Ingeniería Química, la transferencia de masa se describe frecuentemente mediante números adimensionales que permiten extrapolar resultados experimentales a diferentes escalas.

Los más utilizados en ultrafiltración son:

- Número de Reynolds.
- Número de Schmidt.
- Número de Sherwood.

Con ellos se obtiene el coeficiente de transferencia de masa y se ve cuánto incide la hidrodinámica en la polarización.

Número de Reynolds

El número de Reynolds indica qué régimen de flujo hay dentro del módulo.

Su expresión es:

$$Re = (\rho \times V \times Dh) / \mu$$

donde

Re = número de Reynolds

ρ = densidad del fluido

V = velocidad media

Dh = diámetro hidráulico

μ = viscosidad dinámica

Un Reynolds alto promueve la turbulencia y, con ella, una capa límite más delgada.

Número de Schmidt

El número de Schmidt compara la rapidez con que se difunden la masa y la cantidad de movimiento.

Se expresa mediante:

$$Sc = \mu / (\rho \times D)$$

donde

Sc = número de Schmidt

D = coeficiente de difusión

Cuando el número de Schmidt aumenta, el transporte difusivo disminuye y la polarización por concentración tiende a incrementarse.

Número de Sherwood

El número de Sherwood expresa qué tan intensa es la transferencia de masa.

Se calcula mediante:

$$Sh = (k \times Dh) / D$$

donde

Sh = número de Sherwood

k = coeficiente de transferencia de masa

En ingeniería de membranas suele estimarse mediante correlaciones experimentales del tipo:

$$Sh = a \times Re^{b} \times Sc^{c}$$

donde los coeficientes **a**, **b** y **c** dependen de la geometría del módulo y del régimen de flujo.

Interpretación ingenieril

Aunque estas correlaciones pueden parecer complejas, su utilidad práctica es enorme. Permiten estimar la transferencia de masa sin necesidad de realizar ensayos experimentales para cada condición de operación.

En proyectos industriales, estos cálculos se utilizan para:

- seleccionar la velocidad tangencial;
- diseñar los canales hidráulicos;
- estimar la caída de presión;
- calcular el flujo sostenible;

- optimizar el consumo energético.

5.3.10 INFLUENCIA DE LA HIDRODINÁMICA SOBRE LA POLARIZACIÓN

La hidrodinámica tiene un peso decisivo en cómo se comporta una planta de ultrafiltración.

Del diseño del canal de alimentación dependen el reparto de velocidades, el crecimiento de la capa límite y cuán intensamente se transfiere masa.

En términos generales:

- velocidades bajas favorecen la acumulación de solutos;
- velocidades intermedias proporcionan un equilibrio adecuado entre transferencia de masa y consumo energético;
- velocidades excesivamente elevadas reducen la polarización, pero incrementan significativamente el costo de bombeo.

Por ello, el objetivo del diseño consiste en identificar la velocidad tangencial óptima y no simplemente la máxima velocidad posible.

Tabla 5.4

Efecto de la velocidad tangencial en una membrana de ultrafiltración

Velocidad tangencial	Polarización	Consumo energético	Productividad
Baja	Alta	Bajo	Baja
Media	Moderada	Moderado	Alta
Alta	Baja	Alto	Alta

Nota. Elaboración propia.

Recomendaciones de ingeniería

Al diseñar plantas de ultrafiltración conviene tener en cuenta estas recomendaciones:

- Diseñar para operar por debajo del flujo crítico.
- Optimizar la velocidad tangencial utilizando criterios técnico-económicos.
- Evitar incrementos innecesarios de presión transmembrana.
- Incluir un pretratamiento apropiado, que reduzca coloides y materia orgánica.
- Diseñar los canales hidráulicos de manera que favorezcan una distribución uniforme del flujo.

- Verificar el comportamiento hidráulico mediante pruebas piloto cuando se trate de aguas con alta variabilidad.

Reflexión ingenieril

La experiencia industrial demuestra que la polarización por concentración no puede eliminarse completamente; forma parte del funcionamiento normal de toda membrana de ultrafiltración. El objetivo del ingeniero no consiste en hacerla desaparecer, sino en mantenerla dentro de niveles que permitan una operación estable, un consumo energético razonable y una larga vida útil de las membranas. Este enfoque resulta esencial para el diseño de sistemas eficientes y constituye uno de los principios que se repetirá en los capítulos dedicados a nanofiltración y ósmosis inversa.

5.4 MATERIALES Y CONFIGURACIONES DE MEMBRANAS DE ULTRAFILTRACIÓN

Al diseñar ultrafiltración, elegir el material de la membrana es de las decisiones con más peso. Normalmente se evalúa primero el rendimiento hidráulico, pero la estabilidad térmica, la compatibilidad química, la resistencia mecánica, la facilidad de limpieza y la duración condicionan mucho lo que costará la instalación durante su vida. Por eso conviene analizarlos antes de decidir.

En la práctica industrial no hay una membrana universal que sirva para todas las aplicaciones. Cada material tiene ventajas y limitaciones, y se evalúan según la calidad del agua, las condiciones de operación y lo que busca el proceso.

En Ingeniería del Agua, las membranas que se usan en ultrafiltración se dividen en dos grandes grupos:

- Membranas poliméricas.
- Membranas cerámicas.

Cada grupo posee características particulares que condicionan su campo de aplicación.

5.4.1 MEMBRANAS POLIMÉRICAS

Las membranas poliméricas dominan hoy el mercado mundial de la ultrafiltración. Son económicas de fabricar, muy productivas y se moldean fácilmente en distintas geometrías.

Los materiales más utilizados son:

- Polisulfona (PS).
- Polietersulfona (PES).
- Fluoruro de polivinilideno (PVDF).
- Poliacrilonitrilo (PAN).
- Acetato de celulosa (CA).

Cada uno de estos polímeros tiene propiedades propias en cuanto a hidrofilicidad, resistencia química y estabilidad térmica.

Polisulfona (PS)

La polisulfona fue uno de los primeros materiales utilizados ampliamente en ultrafiltración.

Sus principales características son:

- buena resistencia mecánica;
- elevada estabilidad dimensional;
- facilidad de fabricación;
- costo relativamente bajo.

Su principal limitación es que es hidrofóbico, lo que favorece que se adsorba materia orgánica y que aumente la tendencia al fouling.

Actualmente suele modificarse mediante tratamientos superficiales destinados a incrementar su hidrofilicidad.

Polietersulfona (PES)

La polietersulfona está entre los materiales más empleados en las plantas modernas de ultrafiltración.

Presenta:

- elevada resistencia química;
- excelente estabilidad térmica;
- buena resistencia mecánica;
- alta permeabilidad.

Además, admite modificaciones superficiales que reducen significativamente la adsorción de proteínas y sustancias húmicas.

Como consecuencia, muchas plantas destinadas al tratamiento de agua potable emplean actualmente membranas de PES.

Fluoruro de polivinilideno (PVDF)

El PVDF se caracteriza por su extraordinaria resistencia química y mecánica.

Entre sus principales ventajas destacan:

- elevada resistencia a oxidantes;
- buena resistencia a la abrasión;
- larga vida útil;
- excelente comportamiento durante limpiezas químicas frecuentes.

Gracias a ello son frecuentes tanto en sistemas que reutilizan aguas residuales como en biorreactores de membranas (MBR).

Poliacrilonitrilo (PAN)

Las membranas de PAN son más hidrofílicas que las de otros polímeros convencionales.

Como consecuencia:

- disminuye la adsorción de materia orgánica;
- disminuye el fouling;
- mejora la estabilidad del flujo.

Sin embargo, poseen menor resistencia química frente a determinados agentes oxidantes.

Acetato de celulosa (CA)

En los primeros años del desarrollo de las tecnologías de membranas, el acetato de celulosa tuvo una importancia histórica notable.

Actualmente su utilización ha disminuido debido a:

- menor resistencia química;
- sensibilidad al ataque microbiológico;

- limitaciones frente a temperaturas elevadas.

No obstante, continúan empleándose en aplicaciones específicas donde se requiere elevada hidrofilicidad y condiciones de operación moderadas.

Tabla 5.5

Comparación de los principales materiales poliméricos utilizados en ultrafiltración

Material	Resistencia química	Hidrofilicidad	Tendencia al fouling	Aplicaciones típicas
Polisulfona (PS)	Alta	Baja	Moderada	Agua potable
Polietersulfona (PES)	Muy alta	Moderada	Baja	Agua potable, industria farmacéutica
PVDF	Excelente	Moderada	Baja	MBR, reúso de aguas
PAN	Buena	Alta	Muy baja	Bioprocesos
Acetato de celulosa	Moderada	Alta	Baja	Aplicaciones especiales

Nota. Elaboración propia.

5.4.2 MEMBRANAS CERÁMICAS

Las membranas cerámicas representan la alternativa de mayor robustez para aplicaciones industriales severas.

Generalmente se fabrican utilizando materiales como:

- alúmina (Al_2O_3);
- zirconia (ZrO_2);
- titanio (TiO_2);
- carburo de silicio (SiC).

Estos materiales superan con holgura a las membranas poliméricas en resistencia mecánica y química.

Entre sus principales ventajas destacan:

- resistencia a temperaturas superiores a 200 °C;
- elevada estabilidad frente a ácidos y álcalis;
- resistencia a solventes orgánicos;
- excelente comportamiento frente a la abrasión;
- posibilidad de realizar limpiezas químicas agresivas.

Como consecuencia, las membranas cerámicas se utilizan ampliamente en:

- industria alimentaria;
- industria química;
- minería;
- tratamiento de efluentes industriales;
- recuperación de catalizadores.

Su principal limitación corresponde al elevado costo inicial.

Aun así, al calcular el costo de todo el ciclo de vida, las cerámicas suelen competir bien porque duran mucho tiempo.

Interpretación ingenieril

No conviene decidir entre una membrana cerámica y una polimérica mirando solo lo que cuestan al comprarlas.

Debe considerarse:

- frecuencia de limpieza;
- agresividad química del proceso;
- temperatura;
- costo de sustitución;
- disponibilidad operacional;
- vida útil esperada.

En numerosos procesos industriales continuos, una membrana cerámica puede resultar económicamente más conveniente que una polimérica, aun cuando su inversión inicial sea considerablemente superior.

5.4.3 MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DE MEMBRANAS

En los últimos años han surgido muchas técnicas para mejorar las propiedades de la superficie de las membranas.

Estas modificaciones buscan principalmente:

- incrementar la hidrofilicidad;
- disminuir la adsorción de proteínas;
- reducir el fouling;
- aumentar la resistencia química;

- mejorar la estabilidad mecánica.

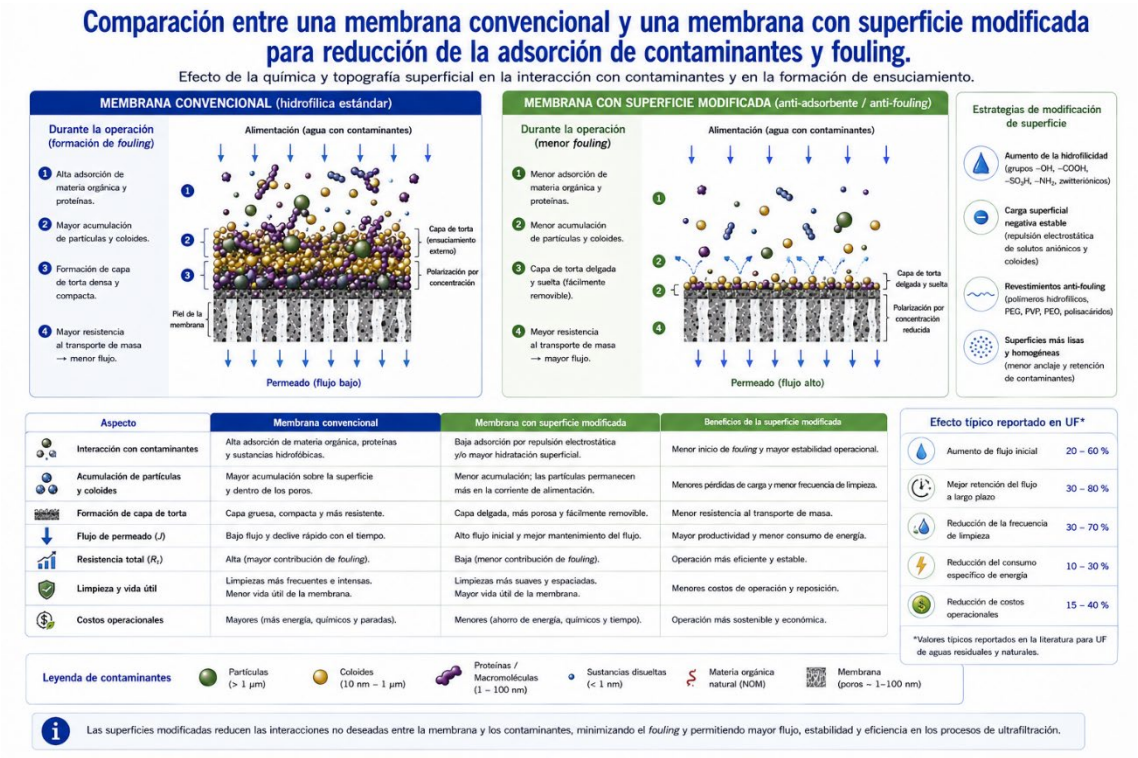
Entre las técnicas más utilizadas se encuentran:

- injerto de polímeros hidrofílicos;
- recubrimientos con nanopartículas;
- modificación mediante plasma;
- incorporación de óxidos metálicos;
- funcionalización química de la superficie.

Estas tecnologías han permitido desarrollar membranas de nueva generación con mayor productividad y menor frecuencia de limpieza.

Figura 5.6.

Una membrana convencional frente a otra de superficie modificada, con menos adsorción de contaminantes y menos fouling.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

La historia de los materiales de membrana enseña que una planta no rinde solo por su hidráulica. La química de la superficie influye en cómo se forma el fouling y en cuán fácil es limpiar. En consecuencia, el material se elige en la ingeniería conceptual

como decisión estratégica, pensando en cómo se comportará la planta durante toda su operación.

5.4.4 CONFIGURACIONES DE MÓDULOS DE ULTRAFILTRACIÓN

La que separa es la membrana, pero cuánto rinde depende en gran medida del módulo donde va alojada. Ese módulo define cómo se reparte el flujo, cuánta presión se pierde, cómo se limpia, cuánta energía se consume y si la planta puede crecer.

En el diseño, el módulo y la membrana se escogen juntos, ya que ambas decisiones fijan el comportamiento hidráulico del sistema y sus costos operativos durante el tiempo que esté funcionando. Una mala combinación de ambos suele pagarse por años.

Las configuraciones comerciales más utilizadas en ultrafiltración son:

- fibra hueca;
- espiralada;
- tubular;
- placas y marcos.

Cada una presenta ventajas particulares para determinadas aplicaciones industriales.

5.4.4.1 Módulos de fibra hueca

Hoy, en las plantas de agua potable y de reúso de aguas residuales, la configuración más extendida es la de fibra hueca.

Cada módulo contiene miles de fibras capilares de pequeño diámetro agrupadas dentro de una carcasa cilíndrica. El agua puede circular por el interior de las fibras (flujo interno) o por el exterior de ellas (flujo externo), dependiendo del diseño del fabricante.

Las principales ventajas de esta configuración son:

- elevada superficie de membrana por unidad de volumen;
- diseño compacto;
- bajo consumo de energía;
- facilidad de automatización;
- excelente desempeño en operaciones de retrolavado.

Entre sus limitaciones destacan:

- sensibilidad frente a sólidos abrasivos;
- mayor dificultad para inspeccionar fibras individuales;
- necesidad de un pretratamiento eficiente.

Por estos motivos se prefieren los módulos de fibra hueca para aguas que contienen pocas partículas gruesas en suspensión.

5.4.4.2 Módulos espiralados

Los módulos espiralados se arman con membranas planas enrolladas en torno a un tubo colector central.

Esta configuración proporciona una elevada densidad de empaquetamiento, permitiendo instalar grandes áreas de membrana en un volumen reducido.

Sus principales ventajas son:

- elevada productividad;
- reducido espacio de instalación;
- menor costo por metro cuadrado de membrana;
- facilidad de reemplazo.

Su limitación es que se tapan con más facilidad cuando el agua trae altas concentraciones de sólidos suspendidos.

Por ello, su utilización requiere generalmente un pretratamiento más exigente que el empleado en módulos tubulares.

5.4.4.3 Módulos tubulares

Los módulos tubulares consisten en tubos de mayor diámetro cuyas paredes internas o externas contienen la membrana activa.

Con esta geometría se pueden usar velocidades tangenciales altas, y se forma bastante menos capa de polarización por concentración.

Las principales ventajas son:

- elevada resistencia al fouling;
- facilidad de limpieza;
- buena tolerancia a sólidos suspendidos;
- posibilidad de trabajar con fluidos viscosos.

Sin embargo, presentan:

- menor superficie específica;
- mayor consumo energético;
- costo inicial más elevado.

Estas características explican que se empleen mucho en la industria alimentaria y química, así como con efluentes industriales difíciles de tratar.

5.4.4.4 Módulos de placas y marcos

Aquí las membranas planas se disponen entre placas rígidas que mantienen separadas unos espaciadores.

El agua pasa por canales relativamente anchos, lo que facilita limpiar e inspeccionar los elementos filtrantes.

Entre sus ventajas destacan:

- facilidad de mantenimiento;
- sustitución sencilla de membranas;
- inspección visual rápida;
- elevada flexibilidad operacional.

Como desventajas presentan:

- menor densidad de empaquetamiento;
- mayor requerimiento de espacio;
- costo de fabricación relativamente elevado.

Actualmente su utilización se concentra en plantas piloto, laboratorios y aplicaciones industriales especializadas.

Tabla 5.6.

Comparación de las principales configuraciones de módulos de ultrafiltración

Configuración	Densidad de empaquetamiento	Resistencia al fouling	Facilidad de limpieza	Aplicaciones principales
Fibra hueca	Muy alta	Moderada	Alta	Agua potable, reúso
Espiralada	Alta	Moderada	Media	Agua de proceso, alimentos
Tubular	Baja	Muy alta	Muy alta	Industria química, minería

Configuración	Densidad de empaquetamiento	Resistencia al fouling	Facilidad de limpieza	Aplicaciones principales
Placas y marcos	Baja	Alta	Muy alta	Laboratorios, bioprocesos

Nota. Elaboración propia.

5.4.5 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL MÓDULO

Al elegir el módulo se ponderan a la vez lo técnico, lo económico y lo operacional.

Entre los principales criterios de selección destacan:

Calidad del agua de alimentación

Si el agua tiene muchos sólidos suspendidos, se necesitan configuraciones fáciles de limpiar y que permitan trabajar con velocidades tangenciales mayores.

Naturaleza del producto

Cuando el producto de interés corresponde al concentrado, como ocurre en la concentración de proteínas o enzimas, el diseño hidráulico debe minimizar la degradación del producto y facilitar su recuperación.

Disponibilidad operacional

En plantas que operan continuamente resulta conveniente seleccionar configuraciones que permitan sustituir módulos individuales sin detener completamente la producción.

Consumo energético

Las configuraciones que requieren elevadas velocidades tangenciales presentan generalmente mayores costos de bombeo.

En consecuencia, el análisis económico debe incluir todo el ciclo de vida y no solo la inversión del primer día.

Facilidad de limpieza

Procesos con elevado potencial de fouling requieren módulos compatibles con limpiezas químicas frecuentes y procedimientos CIP automatizados.

Escalabilidad

En plantas de gran capacidad conviene usar configuraciones modulares, de modo que la producción se amplíe por etapas agregando nuevos trenes de membranas.

Interpretación ingenieril

No existe una configuración universalmente superior. La selección óptima depende del equilibrio entre productividad, facilidad de limpieza, consumo energético, confiabilidad operacional y costo total del proyecto. La experiencia demuestra que una configuración técnicamente adecuada para agua potable puede resultar completamente inadecuada para una industria alimentaria o un proceso biotecnológico.

5.4.6 TENDENCIAS RECIENTES EN EL DESARROLLO DE MÓDULOS

Durante la última década, el diseño de módulos de ultrafiltración ha evolucionado hacia configuraciones que buscan maximizar la productividad y reducir el fouling mediante mejoras en la hidrodinámica y en los materiales de construcción.

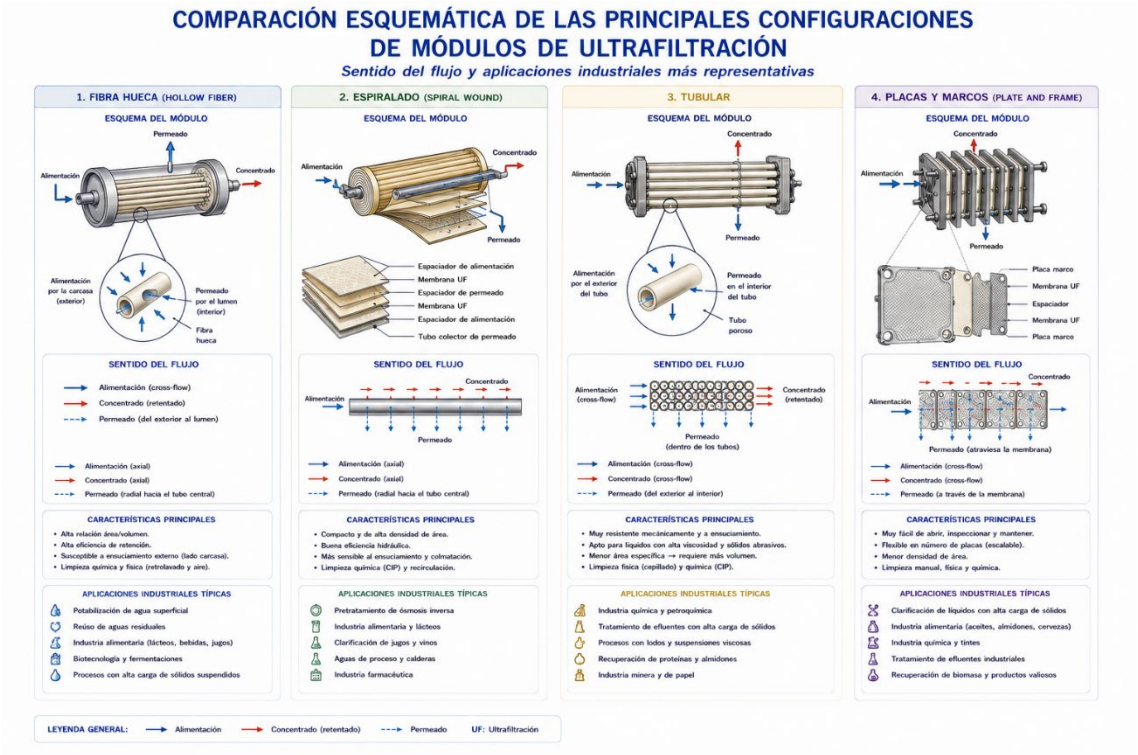
Las principales líneas de desarrollo incluyen:

- módulos con distribución optimizada del flujo;
- espaciadores de geometría avanzada para incrementar la turbulencia controlada;
- módulos híbridos que combinan membranas poliméricas y cerámicas;
- superficies con recubrimientos hidrofílicos de alta estabilidad;
- módulos preparados para monitoreo en línea mediante sensores integrados.

Con estas innovaciones mejora la eficiencia hidráulica, las limpiezas se espacian y las membranas duran más.

Figura 5.7

Comparación esquemática de las principales configuraciones de módulos de ultrafiltración



Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Lo ocurrido con los módulos de ultrafiltración demuestra que el rendimiento no lo define solo el material de la membrana. Pesan directamente la forma del módulo, el reparto del flujo y el diseño hidráulico, tanto en la transferencia de masa como en la polarización por concentración y el fouling. Escoger el módulo, entonces, es una decisión estratégica de ingeniería y no una compra guiada por el precio inicial.

5.5 MODELADO HIDRÁULICO DE SISTEMAS DE ULTRAFILTRACIÓN

Para diseñar y optimizar sistemas de ultrafiltración, una herramienta esencial es el modelado hidráulico. Con él se cuantifica cómo se vinculan la presión, las propiedades del fluido, las características de la membrana y el permeado que se obtiene.

Aunque el agua que atraviesa una membrana involucra convección, difusión e interacciones fisicoquímicas a la vez, en ingeniería basta con modelos sencillos para representar el comportamiento global, y dan una muy buena aproximación en el diseño preliminar.

Aquí se desarrollan los modelos que más se usan en la práctica, destacando qué significan físicamente y cuándo conviene aplicarlos.

5.5.1 MODELO DE RESISTENCIAS EN SERIE

Un modelo muy usado para describir hidráulicamente la ultrafiltración es el de resistencias en serie. Según él, el agua encuentra una resistencia tras otra a lo largo de su paso por el sistema.

Sumando cada resistencia individual se obtiene la resistencia total:

$$Rt = Rm + Rpc + Rf + Rg$$

donde:

Rt = resistencia hidráulica total

Rm = resistencia propia de la membrana

Rpc = resistencia debida a la polarización por concentración

Rf = resistencia asociada al fouling

Rg = resistencia producida por la formación de una capa de gel

En sistemas nuevos, la mayor parte de la resistencia es la de la propia membrana.

Con el tiempo, la importancia relativa de las demás resistencias aumenta progresivamente debido al ensuciamiento y a la acumulación de solutos.

Interpretación ingenieril

Que la resistencia total aumente no quiere decir que la membrana se haya deteriorado sin remedio. Buena parte de las resistencias se puede eliminar con retrolavados o con limpiezas químicas bien programadas.

Por ello, durante la operación resulta conveniente evaluar periódicamente la contribución de cada resistencia para determinar el procedimiento de limpieza más apropiado.

5.5.2 LEY DE DARCY APLICADA A ULTRAFILTRACIÓN

El permeado se estima con la Ley de Darcy, ajustada para membranas.

La expresión utilizada es:

$$J = TMP / (\mu \times Rt)$$

donde:

J = flujo de permeado (m/s)

TMP = presión transmembrana (Pa)

μ = viscosidad dinámica (Pa·s)

Rt = resistencia total (m^{-1})

Esta ecuación constituye la base del dimensionamiento hidráulico de plantas de ultrafiltración.

Distinto de lo que ocurre en microfiltración, aquí la resistencia total cambia continuamente durante la operación, por efecto de la polarización por concentración y del avance del fouling.

Como consecuencia, el flujo también experimenta una disminución progresiva si no se aplican procedimientos periódicos de limpieza.

Ejemplo de interpretación

Si la presión transmembrana se mantiene constante y el flujo baja con el tiempo, según este modelo la única explicación es que subió la resistencia total.

Este comportamiento es un indicador clave para decidir cuándo programar el mantenimiento.

5.5.3 INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD

La viscosidad del agua influye directamente sobre el flujo de permeado.

Si sube la temperatura, la viscosidad baja y el flujo tiende a aumentar.

Al contrario, con temperaturas bajas la viscosidad sube y el flujo se reduce.

En aplicaciones industriales resulta frecuente corregir los resultados experimentales a una temperatura de referencia, generalmente **20 °C** o **25 °C**, con el fin de facilitar la comparación entre diferentes ensayos.

Interpretación ingenieril

Un descenso del flujo durante el invierno no siempre indica la presencia de fouling. En muchos casos corresponde simplemente al incremento de la viscosidad del agua.

Entonces, si se van a cambiar las condiciones operativas, conviene llevar antes el flujo a su temperatura de referencia.

5.5.4 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FLUJO

Una membrana nueva arranca con un flujo alto, pues todavía no tiene depósitos en la superficie.

Conforme avanza la operación, la acumulación de coloides y macromoléculas provoca una disminución progresiva del flujo hasta alcanzar una condición cuasi estacionaria.

Desde el punto de vista práctico pueden distinguirse tres etapas.

Etapa I. Acondicionamiento

Corresponde a las primeras horas de operación.

El flujo cae con relativa rapidez porque se forma la capa inicial de polarización.

Etapa II. Operación estable

El flujo disminuye lentamente.

La velocidad de formación del fouling es aproximadamente compensada por los procedimientos rutinarios de retrolavado.

Esta constituye la región deseable de operación.

Etapa III. Ensuciamiento acelerado

El flujo comienza a disminuir rápidamente.

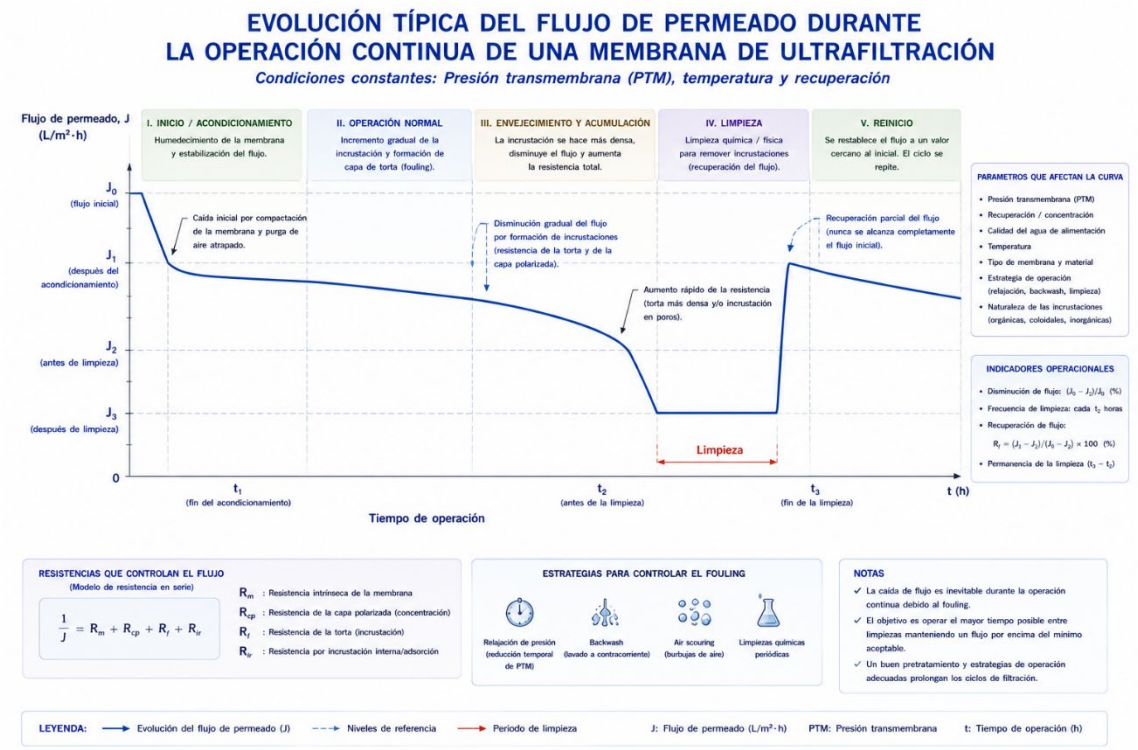
La presión transmembrana aumenta.

La frecuencia de limpieza química se incrementa.

Esta condición indica que la membrana requiere una intervención más profunda.

Figura 5.8

Así evoluciona normalmente el permeado cuando una membrana de ultrafiltración opera sin interrupción.



Nota. Elaboración propia.

5.5.5 CAÍDA DE PRESIÓN EN LOS MÓDULOS

Además de la presión transmembrana, en el diseño se incluye la pérdida de carga que sufre el fluido al recorrer los canales del módulo.

Una caída de presión excesiva produce:

- incremento del consumo energético;
- distribución no uniforme del flujo;
- disminución de la productividad;
- aumento del esfuerzo mecánico sobre la membrana.

Por esta razón, durante el diseño hidráulico deben seleccionarse adecuadamente:

- diámetro de tuberías;
- longitud de los módulos;
- velocidad tangencial;
- número de módulos por tren.

La pérdida de carga constituye un parámetro de diseño tan importante como la propia presión transmembrana.

5.5.6 BALANCE HIDRÁULICO DE UN TREN DE ULTRAFILTRACIÓN

El balance hidráulico sirve para comprobar que los módulos de un tren reciben el mismo caudal.

Un balance simplificado puede expresarse como:

```
Caudal de alimentación = Caudal de permeado + Caudal de concentrado
```

Forma abreviada:

$$Qf = Qp + Qc$$

donde:

Qf = caudal de alimentación

Qp = caudal de permeado

Qc = caudal de concentrado

Este balance constituye la base para el dimensionamiento de bombas, colectores y válvulas.

Durante la ingeniería básica suele complementarse con balances de masa para los principales contaminantes retenidos.

Interpretación ingenieril

Que el caudal se reparta de forma pareja entre los módulos es esencial para que todas las membranas trabajen en condiciones similares. Si hay diferencias grandes, aparecen zonas con más fouling, las membranas envejecen de forma desigual y el sistema dura menos.

5.5.7 VARIABLES DE DISEÑO HIDRÁULICO

En la práctica profesional, el modelado hidráulico permite determinar simultáneamente un conjunto de variables fundamentales para el diseño.

Entre las más importantes se encuentran:

- presión transmembrana de operación;
- flujo sostenible;
- velocidad tangencial;
- recuperación del sistema;
- caída de presión;

- consumo específico de energía;
- número de módulos;
- número de trenes;
- frecuencia de retrolavado;
- frecuencia de limpieza química.

Estas variables se encuentran estrechamente relacionadas y deben optimizarse de manera conjunta.

El objetivo del diseño no consiste en maximizar una única variable, sino en alcanzar un equilibrio entre productividad, estabilidad operacional, consumo energético y costo del ciclo de vida.

Tabla 5.7

Principales variables consideradas en el modelado hidráulico de sistemas de ultrafiltración

Variable	Influencia sobre el diseño
Presión transmembrana	Determina la fuerza impulsora del proceso
Flujo de permeado	Define la productividad de la planta
Velocidad tangencial	Controla la polarización por concentración
Resistencia hidráulica	Determina la disminución del flujo
Recuperación	Influye sobre el consumo de agua y el fouling
Caída de presión	Determina el consumo energético
Temperatura	Modifica la viscosidad y la permeabilidad

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

El modelado hidráulico es más que ecuaciones: ayuda a entender el sistema y a prever fallas operativas antes de que la planta empiece a funcionar. Bien aplicado, disminuye la incertidumbre del diseño, ahorra energía y alarga la vida de las membranas.

5.6 FOULING EN ULTRAFILTRACIÓN

Ninguna limitación operacional de la ultrafiltración pesa tanto como el fouling, y ningún reto es mayor al diseñar, operar y mantener plantas de agua. A medida que avanza, el permeado desciende, la presión transmembrana asciende y el consumo específico de energía se eleva, lo que repercute en la eficiencia técnica y económica.

La polarización por concentración es reversible y se relaciona con el transporte de masa. El fouling, en cambio, consiste en que materiales se depositan, se adsorben o se acumulan sobre la membrana o dentro de sus poros, y según los contaminantes y la operación, puede revertirse en parte o ser definitivo.

En la práctica industrial, el fouling suele originarse por la acción simultánea de diversos mecanismos. Por ello, el ingeniero debe analizar el sistema como un fenómeno multifactorial y no atribuir la pérdida de rendimiento a una única causa.

5.6.1 CLASIFICACIÓN DEL FOULING

Según la Ingeniería del Agua, el fouling se agrupa en cuatro categorías principales.

- fouling orgánico;
- fouling inorgánico o scaling;
- fouling biológico;
- fouling coloidal.

Esta clasificación facilita la selección de estrategias de prevención y limpieza.

Fouling orgánico

Cuando sustancias orgánicas, sean naturales o sintéticas, se adsorben y se acumulan en la membrana, se produce fouling orgánico.

Entre los compuestos más frecuentes se encuentran:

- ácidos húmicos;
- ácidos fúlvicos;
- proteínas;
- polisacáridos;
- aceites y grasas;
- compuestos orgánicos naturales (NOM).

Estos materiales forman películas relativamente compactas que incrementan la resistencia hidráulica y favorecen la adhesión de nuevos contaminantes.

Entre las aguas superficiales, los ácidos húmicos son una causa principal de este tipo de fouling.

Fouling inorgánico (Scaling)

Scaling es la precipitación, sobre la membrana, de sales de baja solubilidad.

Los compuestos más frecuentes son:

- carbonato de calcio;
- sulfato de calcio;
- sulfato de bario;
- sílice;
- hidróxido de hierro.

La formación de estos depósitos depende de factores como:

- pH;
- temperatura;
- concentración de sales;
- recuperación del sistema;
- índice de saturación.

A diferencia del fouling orgánico, el scaling suele requerir limpiezas químicas específicas mediante soluciones ácidas.

Fouling biológico (Biofouling)

El biofouling es el crecimiento de microorganismos sobre la membrana, y se desarrolla en etapas.

Se inicia con la adhesión de bacterias; luego se forman biopelículas, constituidas por microorganismos y por sustancias poliméricas extracelulares (EPS).

Ofrecen gran resistencia hidráulica y complican mucho la limpieza de las membranas.

En plantas que funcionan sin pausa con aguas superficiales o residuales, es de los problemas más enredados.

Fouling coloidal

Lo causan partículas finísimas que se acumulan; su tamaño va, por lo común, de unos nanómetros a unos pocos micrómetros. Es el fouling coloidal.

Entre ellas destacan:

- arcillas;
- sílice coloidal;
- óxidos metálicos;
- coloides orgánicos.

Como son tan pequeñas, se mantienen estables mucho tiempo y pueden alojarse parcialmente en los poros de la membrana.

Tabla 5.8

Clasificación de los principales mecanismos de fouling en ultrafiltración

Tipo de fouling	Origen	Consecuencia principal	Estrategia de control
Orgánico	Proteínas, materia orgánica natural	Disminución del flujo	Limpieza alcalina
Inorgánico	Sales poco solubles	Incremento de la resistencia	Limpieza ácida
Biológico	Microorganismos	Formación de biopelículas	Desinfección y limpieza química
Coloidal	Arcillas, sílice, óxidos	Obstrucción de poros	Optimización del pretratamiento

Nota. Elaboración propia.

5.6.2 MECANISMOS DE FORMACIÓN DEL FOULING

El fouling se desarrolla en una secuencia de etapas que avanzan de manera progresiva mientras la planta opera.

Al principio, el flujo de permeado arrastra partículas y macromoléculas hasta la superficie de la membrana.

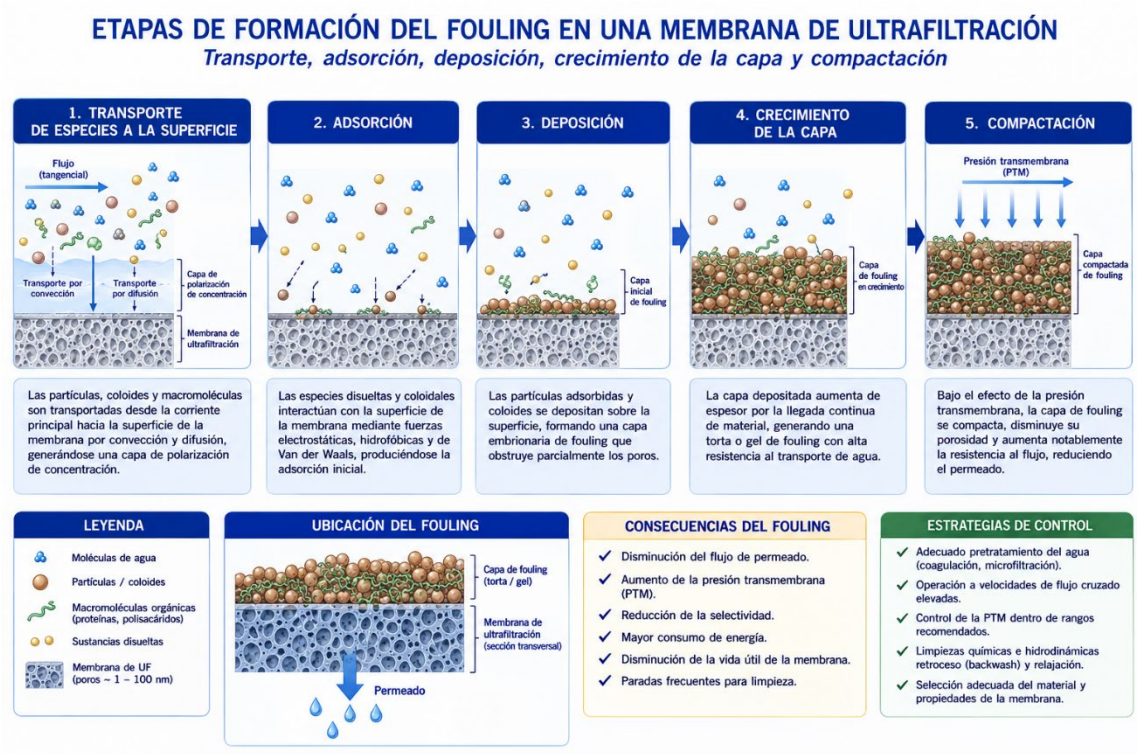
Posteriormente, algunas especies comienzan a adsorberse sobre la superficie mediante interacciones físicas o químicas.

Con el paso del tiempo llegan más partículas que se asientan sobre las ya retenidas, y esa capa ofrece cada vez más resistencia hidráulica.

Por último, la presión transmembrana puede compactar esa capa y dificultar todavía más el paso del agua.

Figura 5.9

Etapas de formación del fouling en una membrana de ultrafiltración.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Crittenden et al. (2012).

Interpretación ingenieril

El fouling no aparece de forma instantánea. Se desarrolla gradualmente y, en muchas ocasiones, puede controlarse mediante acciones preventivas antes de que la pérdida de rendimiento sea significativa. Esta característica justifica la implementación de sistemas de monitoreo continuo y programas de mantenimiento predictivo.

5.6.3 FACTORES QUE FAVORECEN EL FOULING

Cuán severo resulte el fouling depende de cómo interactúen el agua, la membrana y la forma de operar.

Entre los factores más importantes destacan:

Calidad del agua

Cuando abundan la materia orgánica, los coloides y los microorganismos, el fouling se forma mucho más rápido.

Presión transmembrana

Presiones excesivas favorecen la compactación de la capa depositada y dificultan su eliminación mediante retrolavado.

Velocidad tangencial

Si las velocidades son bajas, los materiales se acumulan más fácilmente en la membrana.

Temperatura

Con la temperatura cambian la viscosidad del agua, el ritmo de difusión y la actividad biológica; por ese camino interviene en el fouling.

Material de la membrana

Las membranas hidrofóbicas presentan generalmente mayor afinidad por proteínas y compuestos orgánicos que las membranas hidrofílicas.

Tabla 5.9

Influencia de las variables operacionales sobre la formación del fouling

Variable	Efecto sobre el fouling
Aumento de la materia orgánica	Incrementa
Aumento de la presión transmembrana	Incrementa
Aumento de la velocidad tangencial	Disminuye
Mejor pretratamiento	Disminuye
Mayor hidrofilicidad de la membrana	Disminuye

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Según la experiencia industrial, el fouling no es un problema que dependa solo de la membrana. Casi siempre proviene de decisiones del diseño: pretratamiento insuficiente, flujo de operación mal escogido o limpieza ineficiente. Por esta razón, la Ingeniería del Agua de hoy previene el fouling desde el comienzo del diseño, lo que reduce las correcciones posteriores y mejora el rendimiento global de la planta.

5.6.4 MODELOS DE FOULING Y DIAGNÓSTICO OPERACIONAL

Hay modelos que relacionan cómo cae el permeado con cada mecanismo de ensuciamiento, y con ellos se describe el comportamiento de la membrana al operar. Permiten reconocer el fouling predominante, estimar a qué ritmo se deteriora el sistema y fijar a tiempo cuándo limpiar.

En la práctica, un diagnóstico de fouling no se apoya en una sola variable. Se combinan el consumo específico de energía, la calidad del permeado, la pérdida de carga, el flujo de permeado y la presión transmembrana.

El seguimiento continuo de estas variables constituye la base del mantenimiento predictivo en plantas de membranas.

Modelo de Hermia

Uno de los modelos más utilizados para interpretar el comportamiento del fouling es el propuesto por **Hermia (1982)**, el cual describe cuatro mecanismos ideales de bloqueo de poros.

Estos mecanismos son:

- bloqueo completo;
- bloqueo estándar;
- bloqueo intermedio;
- formación de torta.

Aunque en una planta real suelen presentarse simultáneamente varios mecanismos, este modelo resulta muy útil para interpretar la evolución del ensuciamiento.

Bloqueo completo

Aquí, toda partícula que llega a la membrana tapa un poro completamente.

Como consecuencia, el número de poros disponibles disminuye progresivamente mientras el tamaño de los poros restantes permanece inalterado.

Este comportamiento suele observarse durante las primeras etapas de operación cuando las partículas retenidas presentan dimensiones similares al diámetro de los poros.

Bloqueo estándar

En este caso las partículas penetran parcialmente en los poros y reducen gradualmente su diámetro efectivo.

El flujo desciende de manera continua porque la resistencia hidráulica interna va creciendo.

Este mecanismo es frecuente durante la filtración de proteínas y macromoléculas flexibles.

Bloqueo intermedio

Corresponde a una situación intermedia entre los dos mecanismos anteriores.

Algunas partículas bloquean completamente determinados poros, mientras que otras se depositan sobre partículas previamente retenidas.

Es un comportamiento común en aguas naturales, donde los tamaños de partícula se reparten en un rango amplio.

Formación de torta

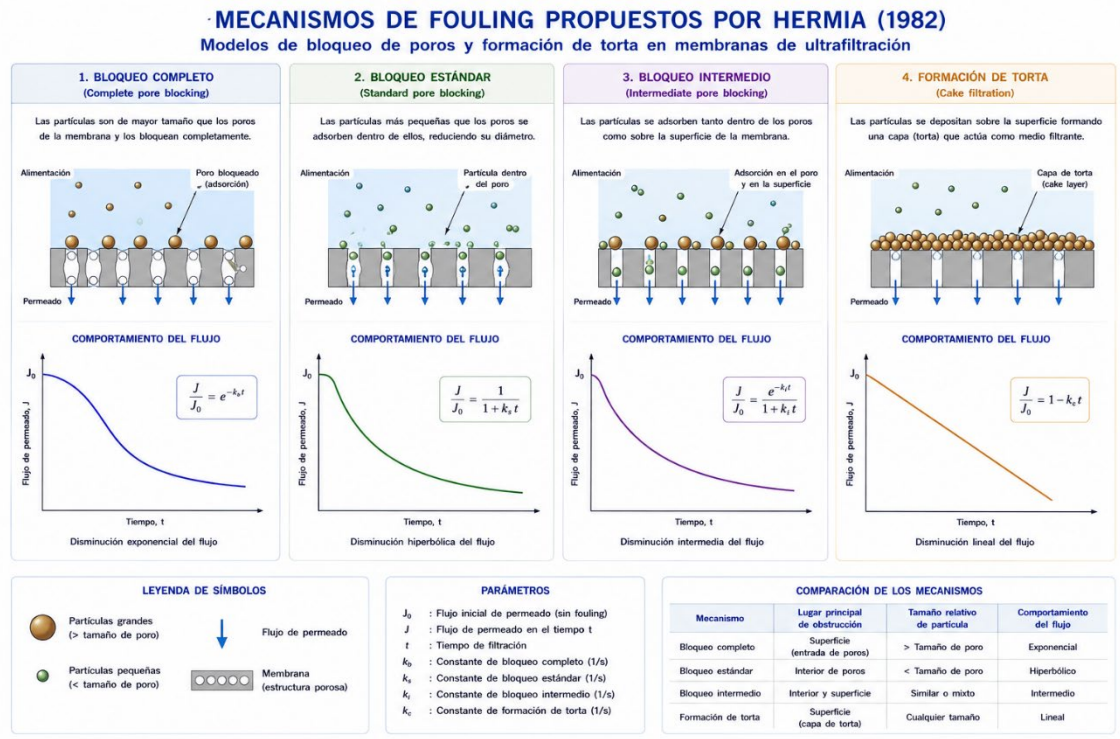
Cuando los poros ya están en su mayoría cubiertos, las partículas se van apilando en la superficie y forman una capa continua.

Desde ahí, la resistencia adicional ya no la determina la membrana, sino el espesor y la compactación de esa capa.

En numerosas aplicaciones industriales, este mecanismo predomina durante casi toda la operación.

Figura 5.10

Representación esquemática de los mecanismos de fouling propuestos por Hermia.



Nota. Elaboración propia con base en Hermia (1982), Baker (2012) y Mulder (1996).

Interpretación ingenieril

El conocimiento del mecanismo predominante permite seleccionar la estrategia de limpieza más adecuada. Por ejemplo, una capa superficial de torta suele eliminarse

eficazmente mediante retrolavado, mientras que un bloqueo interno de poros puede requerir una limpieza química específica.

5.6.5 INDICADORES OPERACIONALES PARA EL DIAGNÓSTICO DEL FOULING

En la industria, el sistema de control de la planta calcula solo ciertos indicadores de desempeño, y con ellos se evalúa el estado de la membrana.

Los principales indicadores son:

Flujo normalizado

El flujo se corrige por temperatura; de lo contrario, los cambios de viscosidad del agua llevarían a interpretaciones erradas.

Que el flujo normalizado vaya bajando poco a poco es de los primeros avisos de ensuciamiento.

Presión transmembrana

Cuando la presión aumenta mientras el caudal de producción permanece constante, la resistencia hidráulica del sistema está aumentando.

Este comportamiento suele asociarse al desarrollo del fouling.

Pérdida de carga

Si la diferencia de presión entre entrada y salida del módulo se agranda, hay materiales acumulándose en los canales.

Consumo específico de energía

El aumento del consumo energético refleja el mayor esfuerzo requerido por las bombas para mantener la producción.

Calidad del permeado

Si la calidad permanece constante mientras disminuye el flujo, el problema suele corresponder al fouling.

Si, en cambio, el permeado sale de peor calidad, puede que la membrana se haya dañado físicamente.

Tabla 5.10

Indicadores utilizados para el diagnóstico operacional de membranas de ultrafiltración

Variable monitoreada	Tendencia observada	Diagnóstico probable
Flujo de permeado	Disminuye	Desarrollo de fouling
Presión transmembrana	Aumenta	Incremento de la resistencia hidráulica
Pérdida de carga	Aumenta	Acumulación de depósitos
Consumo específico de energía	Aumenta	Mayor resistencia al flujo
Calidad del permeado	Disminuye	Posible daño de la membrana

Nota. Elaboración propia.

5.6.6 MONITOREO PREDICTIVO

Las plantas modernas incorporan sistemas SCADA y plataformas de análisis de datos que permiten supervisar continuamente el estado de las membranas.

Monitorear de forma predictiva es estudiar cómo varían las variables operacionales con el tiempo, para detectar tendencias antes de que se produzca una falla importante.

Entre las ventajas de este enfoque destacan:

- reducción de paradas no programadas;
- optimización de la frecuencia de limpieza;
- disminución del consumo de reactivos;
- prolongación de la vida útil de las membranas;
- reducción del costo de operación.

En años recientes, el aprendizaje automático ha reforzado el poder predictivo de estos sistemas, porque detecta patrones de ensuciamiento que pasarían inadvertidos con métodos convencionales.

Interpretación ingenieril

El mantenimiento basado en condición sustituye progresivamente al mantenimiento basado únicamente en intervalos de tiempo. Esta estrategia permite intervenir la planta cuando los indicadores muestran una degradación real del desempeño, optimizando los recursos y aumentando la disponibilidad operacional.

5.6.7 ESTRATEGIAS PARA MINIMIZAR EL FOULING

Prevenir el fouling empieza en la etapa de diseño y continúa mientras la planta esté en operación.

Las estrategias más eficaces incluyen:

- selección adecuada del pretratamiento;

- operación por debajo del flujo crítico;
- optimización de la velocidad tangencial;
- control de la recuperación del sistema;
- programación automática de retrolavados;
- limpieza química basada en indicadores operacionales;
- selección de membranas con superficies hidrofílicas;
- monitoreo continuo mediante sistemas de adquisición de datos.

Estas medidas permiten reducir la velocidad de formación del fouling y mejorar la estabilidad del proceso.

Reflexión ingenieril

La experiencia en plantas industriales demuestra que el fouling no puede eliminarse completamente; constituye una consecuencia natural del funcionamiento de los sistemas de membranas. Sin embargo, mediante un diseño adecuado, un pretratamiento eficiente y una estrategia de monitoreo predictivo es posible mantenerlo dentro de niveles aceptables y garantizar una operación estable durante largos periodos. En este contexto, el papel del ingeniero no consiste en combatir el fouling una vez que aparece, sino en anticiparse a su desarrollo mediante decisiones de diseño fundamentadas en criterios hidráulicos, de transferencia de masa y de operación.

Figura 5.11

Estrategia integral para el control del fouling en sistemas de ultrafiltración

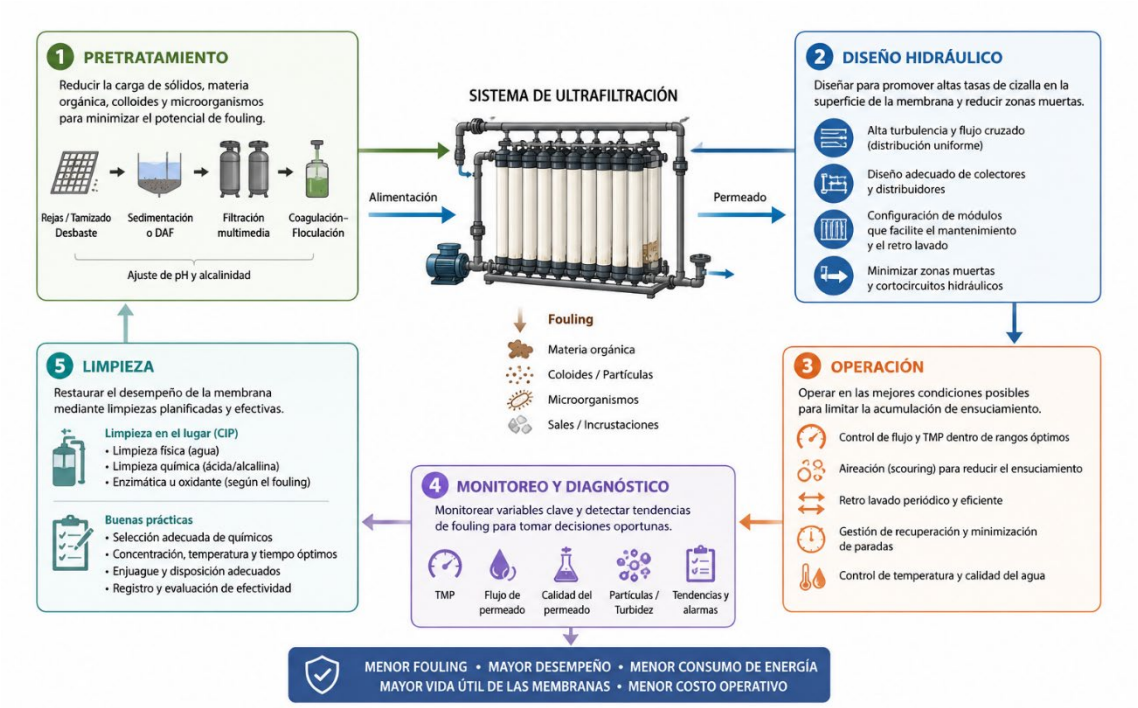


Figura 5.11. Estrategia integral para el control del *fouling* en sistemas de ultrafiltración.

Nota. Elaboración propia.

5.7 LIMPIEZA Y RECUPERACIÓN DE MEMBRANAS DE ULTRAFILTRACIÓN

Limpiar las membranas es indispensable para mantener el desempeño hidráulico en ultrafiltración y prolongar la vida de los módulos. A lo largo de la operación normal se acumulan partículas, coloides, sales, microorganismos y materia orgánica, y la resistencia hidráulica que provocan no se elimina con solo ajustar la operación.

En consecuencia, toda planta de ultrafiltración debe incorporar estrategias de limpieza física y química diseñadas desde la etapa de ingeniería conceptual.

La limpieza no se hace únicamente para devolver el flujo de permeado. Se busca además que la calidad del agua producida no varíe, ahorrar energía, reemplazar membranas con menos frecuencia y garantizar que la planta no se detenga.

Para el diseño, un sistema de limpieza bien concebido puede ser lo que separe una planta económicamente viable de otra con altos costos de operación.

5.7.1 OBJETIVOS DE LA LIMPIEZA

La limpieza de membranas persigue los siguientes objetivos principales:

- recuperar el flujo de permeado;
- disminuir la presión transmembrana;

- reducir la resistencia hidráulica;
- eliminar depósitos superficiales;
- controlar el crecimiento microbiológico;
- prolongar la vida útil de las membranas;
- mantener la calidad del permeado;
- disminuir el consumo específico de energía.

Estos objetivos se evalúan en conjunto con indicadores operacionales que se registran antes y después de cada limpieza.

5.7.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE LIMPIEZA

Los procedimientos de limpieza utilizados en ultrafiltración pueden clasificarse en tres categorías principales:

- limpieza física;
- limpieza química;
- limpieza combinada.

Para elegir el procedimiento se considera qué fouling predomina y de qué material es la membrana.

Limpieza física

La limpieza física retira sobre todo los depósitos reversibles que se han acumulado en la superficie de la membrana.

Las técnicas más utilizadas son:

- retrolavado;
- lavado con aire;
- incremento temporal de la velocidad tangencial;
- enjuague hidráulico.

Tienen la ventaja de no necesitar reactivos químicos y de poder ejecutarse en forma automática mientras la planta opera.

Pierden eficacia, sin embargo, cuando el fouling ya se metió en los poros de la membrana.

Limpieza química

Cuando la limpieza física no consigue recuperar el flujo de diseño, resulta necesario utilizar soluciones químicas capaces de disolver o desprender los contaminantes adheridos.

La selección del reactivo depende de la naturaleza del fouling.

Entre los productos utilizados con mayor frecuencia se encuentran:

- soluciones alcalinas;
- soluciones ácidas;
- agentes oxidantes;
- agentes quelantes;
- detergentes especializados.

Antes de usar un reactivo, se verifica su compatibilidad química con la membrana según las especificaciones del fabricante.

Limpieza combinada

En plantas industriales es habitual combinar procedimientos físicos y químicos.

Una estrategia típica consiste en realizar:

- retrolavados automáticos durante la operación;
- limpiezas químicas periódicas;
- limpiezas intensivas durante paradas programadas.

Esta combinación permite mantener estable el desempeño de la planta durante largos periodos.

Tabla 5.11

Comparación de los principales procedimientos de limpieza en ultrafiltración

Procedimiento	Tipo de fouling	Frecuencia típica	Recuperación del flujo
Retrolavado	Reversible	Minutos a horas	Moderada
Aireación	Depósitos superficiales	Horas	Moderada
Limpieza química	Fouling irreversible	Semanas o meses	Alta
Limpieza intensiva	Fouling severo	Paradas programadas	Muy alta

Nota. Elaboración propia.

5.7.3 RETROLAVADO (BACKWASH)

El retrolavado constituye la operación de limpieza más frecuente en plantas de ultrafiltración.

Se invierte durante un lapso el sentido del flujo, usando agua permeada, de modo que se desprendan los materiales que se acumularon en la superficie.

En esta operación la presión actúa en dirección opuesta a la de la filtración normal, y así se desprende la capa de depósitos.

Las principales ventajas del retrolavado son:

- operación completamente automática;
- reducido consumo de reactivos;
- recuperación rápida del flujo;
- bajo costo operativo.

Sin embargo, el retrolavado únicamente elimina los depósitos reversibles y no resulta suficiente frente a procesos avanzados de fouling.

Figura 5.12

Esquema del proceso de retrolavado en una membrana de ultrafiltración

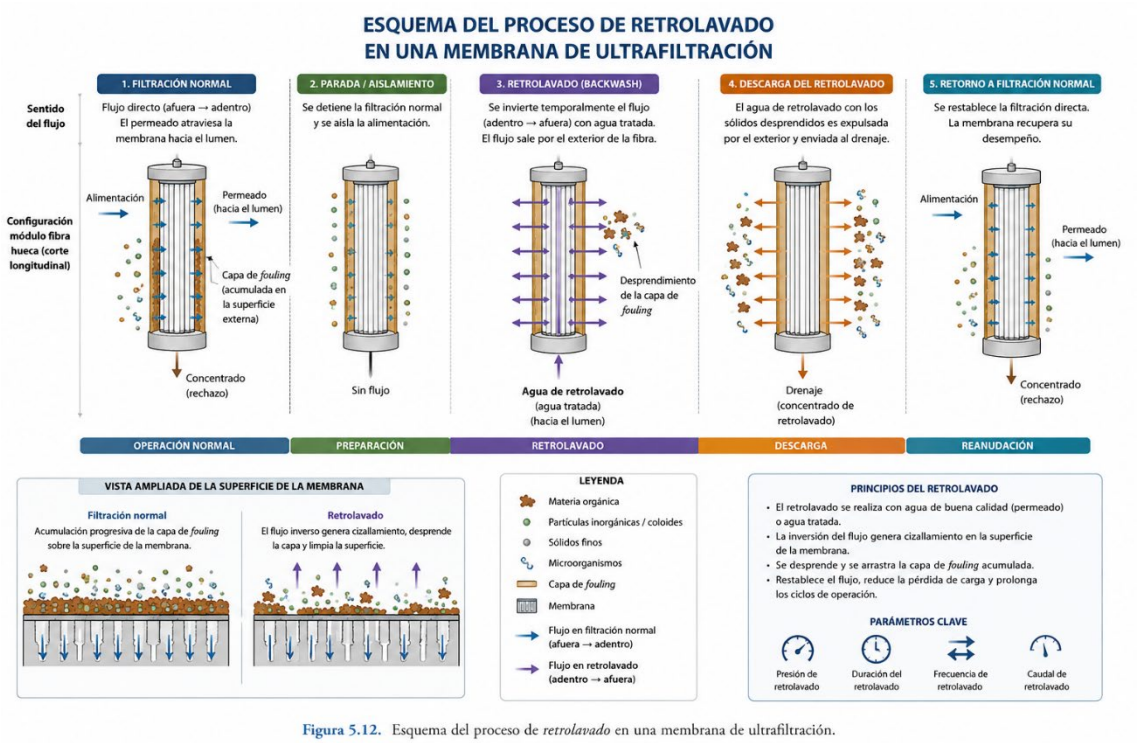


Figura 5.12. Esquema del proceso de *retrolavado* en una membrana de ultrafiltración.

Nota. Elaboración propia.

Criterios de diseño

Durante la ingeniería básica deben definirse:

- duración del retrolavado;
- frecuencia de ejecución;
- caudal de lavado;
- presión de retrolavado;
- volumen de agua requerido.

Estos valores se definen según la calidad del agua que ingresa y lo observado en las pruebas piloto.

5.7.4 LIMPIEZA QUÍMICA (CIP)

Cuando el retrolavado ya no permite recuperar el flujo de diseño, se requiere una limpieza química conocida internacionalmente como **Cleaning in Place (CIP)**.

El sistema CIP permite circular soluciones químicas a través de la instalación sin desmontar las membranas, reduciendo significativamente los tiempos de mantenimiento.

Un sistema CIP típico comprende:

- tanque de preparación de soluciones;
- bomba de recirculación;
- intercambiador de calor (cuando se requiere controlar la temperatura);
- filtros de protección;
- instrumentación de presión, temperatura, pH y conductividad;
- tuberías y válvulas de aislamiento.

El diseño del sistema CIP debe garantizar una distribución uniforme del reactivo en todos los módulos.

5.7.5 SELECCIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS

Una limpieza química funciona bien solo si se identificó correctamente el tipo de fouling predominante.

La Tabla 5.12 resume los reactivos utilizados con mayor frecuencia.

Tabla 5.12

Reactivos comúnmente empleados para la limpieza química de membranas de ultrafiltración.

Tipo de fouling	Reactivo recomendado	Objetivo
Orgánico	Hidróxido de sodio (NaOH)	Solubilizar proteínas y materia orgánica
Inorgánico	Ácido cítrico o ácido clorhídrico diluído	Disolver incrustaciones minerales
Biológico	Hipoclorito de sodio* o peróxido de hidrógeno**	Control microbiológico
Óxidos metálicos	Agentes quelantes (EDTA)	Remover depósitos metálicos

Nota. Elaboración propia. *El uso de hipoclorito depende de la compatibilidad química de la membrana. **La selección del oxidante debe realizarse conforme a las recomendaciones del fabricante.

Interpretación ingenieril

La selección incorrecta del reactivo puede producir daños irreversibles en la membrana.

Por esta razón, el procedimiento de limpieza debe establecerse considerando simultáneamente:

- naturaleza del fouling;
- material de la membrana;
- concentración del reactivo;
- temperatura de limpieza;
- tiempo de contacto;
- compatibilidad química.

5.7.6 EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DEL FLUJO

Terminado cada procedimiento de limpieza, se evalúa qué tan eficaz fue.

La recuperación del flujo puede expresarse mediante:

```
Recuperación (%) = (JL / J0) × 100
```

donde:

JL = flujo después de la limpieza

```
J0 = flujo inicial de una membrana limpia
```

La interpretación general es la siguiente:

- recuperación superior al 95 %: limpieza altamente eficaz;

- recuperación entre 85 % y 95 %: desempeño aceptable;
- recuperación inferior al 85 %: posible fouling irreversible o envejecimiento de la membrana.

Para interpretar estos valores se toman en cuenta el fabricante y las condiciones propias de cada operación.

Reflexión ingenieril

Se comete mucho el error de ver la limpieza como asunto exclusivo de mantenimiento. Cada cuánto se limpia, qué tamaño tiene el sistema CIP y cuántos reactivos y cuánta agua se consumen deben fijarse al diseñar la planta. Un sistema bien diseñado no solo recupera el flujo: abarata de forma importante el ciclo de vida y mejora la disponibilidad.

5.7.7 OPTIMIZACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE LIMPIEZA

Decidir cuándo limpiar es de lo más importante al operar una planta de ultrafiltración. Con limpiezas escasas se favorece el fouling irreversible y la vida de las membranas se acorta; con limpiezas excesivas se malgasta agua, reactivos, energía y horas de parada.

Por esta razón, los programas modernos de limpieza no se establecen mediante intervalos fijos de tiempo, sino a partir del comportamiento hidráulico real del sistema.

Optimizar esos programas obliga a revisar juntas varias variables y su evolución en el tiempo: permeado, presión transmembrana, pérdida de carga, calidad del permeado y gasto específico de energía.

Criterios para iniciar una limpieza

En plantas industriales se suele programar una limpieza cuando se presenta una o varias de las condiciones siguientes:

- caída del flujo normalizado por debajo del valor fijado en el diseño;
- incremento sostenido de la presión transmembrana;
- aumento significativo de la pérdida de carga;
- incremento del consumo específico de energía;
- disminución de la recuperación obtenida mediante retrolavados;
- pérdida de estabilidad operacional.

Estos criterios permiten intervenir el sistema antes de que el fouling alcance un nivel irreversible.

5.7.8 DISEÑO DEL SISTEMA CIP

En una planta de ultrafiltración de capacidad media o grande, la limpieza química requiere una unidad auxiliar que no puede faltar.

Su diseño debe permitir la circulación uniforme de las soluciones de limpieza a través de todos los módulos, garantizando tiempos de contacto suficientes para remover los depósitos acumulados sin deteriorar la membrana.

Un sistema CIP normalmente incluye los siguientes equipos:

- tanque de preparación de soluciones;
- tanque de enjuague;
- bomba de recirculación;
- filtro de protección;
- calentador o intercambiador de calor, cuando el procedimiento requiera controlar la temperatura;
- válvulas automáticas;
- tuberías de impulsión y retorno;
- instrumentación para presión, temperatura, pH, conductividad y caudal.

Durante la ingeniería de detalle también deben definirse aspectos como el volumen útil de los tanques, el caudal de recirculación, la velocidad mínima de circulación y el tiempo de residencia de la solución limpiadora.

Criterios de diseño

Para garantizar una limpieza eficiente, el sistema CIP debe cumplir los siguientes requisitos:

- asegurar una velocidad suficiente para evitar zonas muertas;
- mantener una distribución uniforme del reactivo en todos los módulos;
- facilitar el drenaje completo de las soluciones utilizadas;
- permitir el enjuague con agua permeada;
- minimizar el consumo de reactivos;

- facilitar la automatización mediante PLC o sistema SCADA.

Si estos criterios entran en el diseño desde el inicio, el mantenimiento de la planta cuesta bastante menos durante la operación.

5.7.9 INDICADORES DE DESEMPEÑO DESPUÉS DE LA LIMPIEZA

La eficacia de un procedimiento de limpieza debe verificarse mediante indicadores cuantitativos.

Los más utilizados son:

- recuperación del flujo normalizado;
- disminución de la presión transmembrana;
- reducción de la pérdida de carga;
- recuperación de la permeabilidad hidráulica;
- estabilidad del flujo durante las horas posteriores a la limpieza.

La evaluación simultánea de estos indicadores permite determinar si el procedimiento aplicado fue suficiente o si es necesario realizar una limpieza adicional.

Tabla 5.13

Indicadores utilizados para evaluar la eficacia de la limpieza de membranas

Indicador	Resultado esperado
Flujo normalizado	Recuperación cercana al valor inicial
Presión transmembrana	Disminución respecto al valor previo a la limpieza
Pérdida de carga	Reducción significativa
Permeabilidad hidráulica	Recuperación parcial o total
Calidad del permeado	Sin alteraciones respecto al diseño

Nota. Elaboración propia.

5.7.10 AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE LIMPIEZA

Las plantas modernas de ultrafiltración incorporan sistemas automáticos capaces de ejecutar secuencias completas de limpieza sin intervención del operador.

Un programa automático comprende generalmente las siguientes etapas:

1. Detención del proceso de filtración.
2. Drenaje parcial del módulo.
3. Retrolavado.
4. Inyección de aire, cuando corresponda.

5. Preparación de la solución química.
6. Recirculación del reactivo.
7. Tiempo de remojo.
8. Enjuague con agua permeada.
9. Verificación de presión, flujo y conductividad.
10. Retorno automático al servicio.

Automatizar reduce la variabilidad operacional, hace más reproducibles los procedimientos y baja el riesgo de errores humanos.

5.7.11 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS PROGRAMAS DE LIMPIEZA

Según la ingeniería económica, la limpieza es un costo operativo que hay que optimizar.

Los principales componentes del costo son:

- consumo de agua permeada;
- consumo de reactivos químicos;
- energía eléctrica para bombeo;
- mano de obra;
- disposición de soluciones agotadas;
- pérdida temporal de producción;
- depreciación del sistema CIP.

La mejor frecuencia de limpieza es la que lleva el costo total anual a su mínimo, sopesando a la vez cuánto se deterioran las membranas y cuánto cuestan las limpiezas.

En proyectos grandes conviene hacer un análisis de costo del ciclo de vida (Life Cycle Cost, LCC): inversión inicial, operación y reposición de membranas, todo en una misma cuenta.

Tabla 5.14

Componentes del costo de limpieza de una planta de ultrafiltración

Componente	Influencia sobre el costo operativo
Agua utilizada	Consumo de recurso hídrico
Reactivos químicos	Costo directo de limpieza

Componente	Influencia sobre el costo operativo
Energía	Bombeo y recirculación
Mano de obra	Supervisión y mantenimiento
Tiempo fuera de servicio	Pérdida de producción
Reposición de membranas	Costo de capital a largo plazo

Nota. Elaboración propia.

5.7.12 TENDENCIAS RECIENTES EN LIMPIEZA DE MEMBRANAS

La investigación reciente se orienta hacia estrategias que reduzcan la necesidad de limpiezas químicas frecuentes y minimicen el impacto ambiental del proceso.

Entre las principales tendencias destacan:

- membranas con superficies superhidrofílicas;
- recubrimientos antifouling basados en nanotecnología;
- limpieza mediante ultrasonido;
- aplicación de campos eléctricos para reducir la deposición de partículas;
- sistemas de monitoreo predictivo apoyados en inteligencia artificial;
- optimización automática de los ciclos de limpieza mediante algoritmos de aprendizaje automático.

Estas tecnologías apuntan a elevar la disponibilidad operacional y, al mismo tiempo, a gastar menos agua, reactivos y energía.

Figura 5.13.

Estrategia moderna de gestión del fouling

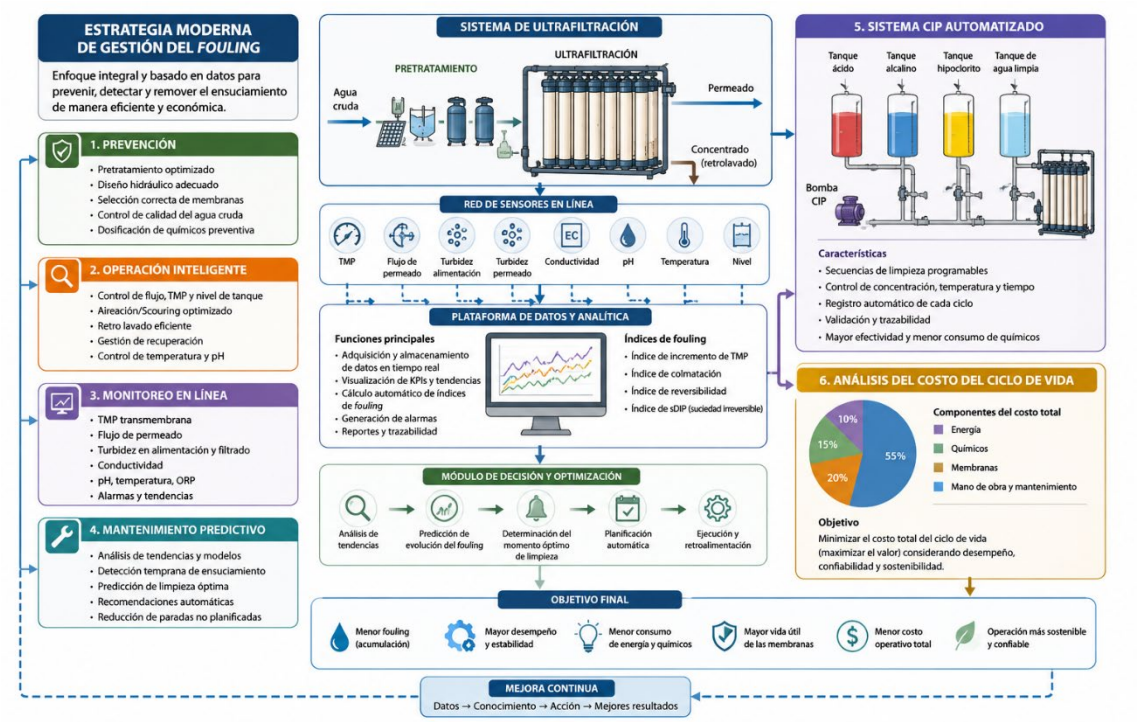


Figura 5.13. Estrategia moderna de gestión del *fouling* y de los programas de limpieza en una planta de ultrafiltración.

Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Mulder (1996) y Judd (2011).

Reflexión ingenieril

El buen funcionamiento de una planta de ultrafiltración no depende solo de la membrana ni de la hidráulica. La experiencia enseña que la limpieza define en buena medida la disponibilidad, el gasto de energía, la duración de las membranas y el costo global del tratamiento. Por ello el CIP forma parte del diseño desde el inicio, y no es un equipo auxiliar que se agrega al final.

5.8 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE PLANTAS DE ULTRAFILTRACIÓN

Diseñar una planta de ultrafiltración es un proceso iterativo donde se combinan criterios hidráulicos, fisicoquímicos, económicos y operacionales. Otros procesos unitarios convencionales se comportan distinto: aquí el desempeño de la membrana depende de variables que cambian durante la operación, y por eso el diseño prevé, además del arranque, los efectos del fouling, de la polarización por concentración y del paulatino envejecimiento de la membrana.

En el ejercicio profesional, se parte caracterizando con detalle el agua de alimentación y se termina eligiendo cuántos módulos instalar, cómo se configura la hidráulica, qué sistema de limpieza y qué instrumentación se usan, además de estimar los costos de inversión y de operación.

El procedimiento desarrollado en este capítulo corresponde a una metodología de ingeniería conceptual ampliamente utilizada en proyectos de abastecimiento de agua, reutilización de efluentes e instalaciones industriales.

5.8.1 INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL DISEÑO

Antes de dimensionar es indispensable reunir información suficiente acerca de la calidad del agua y de las condiciones previstas de operación.

Entre los parámetros más importantes se encuentran:

Características hidráulicas

- caudal promedio;
- caudal máximo horario;
- variación estacional del caudal;
- presión disponible.

Características fisicoquímicas

- pH;
- temperatura;
- conductividad;
- alcalinidad;
- dureza;
- sólidos suspendidos;
- turbidez;
- color;
- carbono orgánico total (TOC).

Características microbiológicas

- coliformes;
- bacterias heterotróficas;
- virus;
- protozoarios.

Características operacionales

- horas de funcionamiento por día;
- disponibilidad requerida;
- recuperación esperada;
- vida útil del proyecto;
- calidad requerida del permeado.

La confiabilidad del diseño dependerá directamente de la calidad de esta información.

5.8.2 SELECCIÓN DEL FLUJO DE DISEÑO

Fijar el flujo es una de las decisiones que más cuentan en el proyecto.

Un flujo excesivamente elevado reduce el área requerida de membranas y disminuye la inversión inicial, pero incrementa el fouling, el consumo energético y la frecuencia de limpieza.

En el otro extremo, un flujo demasiado bajo encarece mucho la inversión inicial, porque exige más superficie de membrana.

Por eso, el diseño debe apuntar al flujo que reduzca el costo de todo el ciclo de vida, y no solo el de la inversión.

Lo usual es moverse dentro del intervalo que va del flujo crítico al flujo límite, este último obtenido en ensayos.

Cuando no se dispone de ensayos piloto, debe adoptarse un valor conservador proporcionado por el fabricante y posteriormente ajustarlo durante la puesta en marcha de la planta.

Interpretación ingenieril

El flujo de diseño jamás debe igualar el máximo logrado en los ensayos de laboratorio. Una planta industrial tiene que absorber cambios en la calidad del agua, el envejecimiento de las membranas, la incertidumbre de los experimentos y las ampliaciones que vengan después.

5.8.3 CÁLCULO DEL ÁREA DE MEMBRANAS

Con el flujo de diseño ya fijado, la expresión siguiente da el área efectiva de membranas:

```
Área de membranas = Caudal de permeado / Flujo de diseño
```

En forma abreviada:

$$A = Q / J$$

Donde:

A = área efectiva de membranas (m²)

Q = caudal de permeado (m³/h)

J = flujo de diseño (m³/m²·h)

El área calculada representa el valor mínimo necesario para satisfacer la producción requerida.

Durante la ingeniería básica se recomienda incorporar un factor de seguridad comprendido generalmente entre **10 % y 25 %**, dependiendo de la calidad del agua y de la incertidumbre del proyecto.

Ejemplo conceptual

Producción requerida:

$$Q = 250 \text{ m}^3/\text{h}$$

Flujo seleccionado:

$$J = 70 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$$

$$J = 0{,}070 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$$

Entonces:

$$A = 250 / 0{,}070$$

$$A = 3\,571 \text{ m}^2$$

Considerando un factor de seguridad del 15 %:

```
Área instalada
= 3 571 × 1,15
= 4 107 m²
```

Este valor será utilizado posteriormente para calcular el número de módulos.

5.8.4 SELECCIÓN DEL NÚMERO DE MÓDULOS

El número de módulos depende del área instalada y del área útil proporcionada por cada elemento comercial.

La ecuación utilizada es:

```
Número de módulos = Área instalada / Área por módulo
```

o de forma abreviada:

$$Nm = A / Am$$

donde:

Nm = número de módulos

A = área instalada

Am = área efectiva de un módulo

El resultado siempre debe redondearse al entero superior.

A esto se suma una recomendación para plantas industriales: prever módulos de reserva, de modo que la operación no se interrumpa cuando se haga mantenimiento.

Criterios de ingeniería

El número de módulos no debe distribuirse en un único tren hidráulico.

Resulta preferible dividir la planta en varios trenes independientes, lo que ofrece las siguientes ventajas:

- facilita el mantenimiento programado;
- permite ampliar la capacidad de producción;
- reduce el impacto de fallas individuales;
- mejora la flexibilidad operacional.

En instalaciones de gran capacidad es frecuente adoptar configuraciones del tipo **N + 1**, donde un tren permanece en reserva mientras los restantes operan normalmente.

5.8.5 RECUPERACIÓN DEL SISTEMA

La recuperación representa la fracción del agua de alimentación transformada en permeado.

Se expresa mediante:

```
Recuperación = Qp / Qf
```

donde:

Qp = caudal de permeado

Qf = caudal de alimentación

Despejando el caudal de alimentación:

$$Qf = Qp / Recuperación$$

La recuperación influye directamente sobre:

- consumo de agua;
- volumen de retrolavado;
- concentración de contaminantes;
- riesgo de fouling;
- costo operativo.

Si la recuperación es demasiado alta, el concentrado acumula más sólidos y sobre la membrana se forman depósitos con mayor facilidad.

Así, al fijar la recuperación se pesan juntas la oferta de agua y la estabilidad con que debe funcionar la planta.

Tabla 5.15

Variables fundamentales para el dimensionamiento de una planta de ultrafiltración

Variable	Influencia sobre el diseño
Caudal de diseño	Determina la capacidad de producción
Flujo de operación	Define el área de membranas
Área instalada	Determina el número de módulos
Recuperación	Influye sobre el balance hidráulico
Número de trenes	Determina la flexibilidad operacional
Factor de seguridad	Incrementa la confiabilidad del sistema

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

La experiencia demuestra que los errores de diseño rara vez se originan por la utilización de ecuaciones incorrectas. La mayoría de las dificultades operacionales provienen de la selección inadecuada de los parámetros de diseño, especialmente del flujo de operación, la recuperación y la configuración hidráulica. Por ello, el ingeniero debe considerar el dimensionamiento como un proceso de optimización técnico-económica y no únicamente como una aplicación mecánica de fórmulas.

5.8.6 DISEÑO HIDRÁULICO DE LOS TRENES DE ULTRAFILTRACIÓN

Conocidos el área total y la cantidad de módulos, toca resolver la configuración hidráulica. Aquí se busca repartir el caudal parejo entre los módulos, recortar las pérdidas de carga y conseguir que todos trabajen en condiciones homogéneas.

En la práctica industrial, las membranas rara vez se instalan formando una única línea de tratamiento. Lo habitual es dividir la planta en varios trenes hidráulicamente independientes que operan en paralelo.

Esta configuración ofrece importantes ventajas operacionales:

- facilita las labores de mantenimiento;
- permite aislar un tren sin detener toda la producción;
- simplifica futuras ampliaciones;
- mejora la confiabilidad del sistema;
- reduce el impacto de fallas individuales.

La cantidad de trenes se fija a partir del caudal de diseño, de los módulos disponibles y de la disponibilidad operacional que se exija.

Distribución del caudal

Cuando todos los trenes poseen características hidráulicas similares, el caudal total puede distribuirse uniformemente.

La relación es:

```
Caudal por tren = Caudal total / Número de trenes
```

o de forma abreviada

$$Qt = Q / Nt$$

donde

Qt = caudal por tren

Q = caudal total de alimentación

Nt = número de trenes

Con este reparto resulta más fácil equilibrar hidráulicamente la planta y también se simplifica su control automático.

Número de módulos por tren

Conocido el número total de módulos, éstos deben distribuirse entre los diferentes trenes.

```
Módulos por tren = Número total de módulos / Número de trenes
```

El resultado debe redondearse procurando mantener una distribución uniforme.

Cuando el número de módulos no sea exactamente divisible, es preferible instalar los módulos adicionales en el tren de reserva.

5.8.7 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE COLECTORES

Los colectores principales tienen la función de distribuir uniformemente el agua de alimentación hacia cada tren y recoger posteriormente el permeado y el concentrado.

Un diseño inadecuado puede originar diferencias importantes de presión entre trenes, provocando:

- distribución desigual del flujo;
- mayor fouling en algunos módulos;
- diferencias de producción;
- envejecimiento no uniforme de las membranas.

Durante el diseño deben verificarse los siguientes aspectos:

- velocidad del agua en los colectores;
- pérdida de carga;
- equilibrio hidráulico;
- facilidad de drenaje;
- accesibilidad para mantenimiento.

Siempre que sea posible, la disposición de tuberías debe ser simétrica para garantizar condiciones similares en todos los trenes.

Velocidades recomendadas

Como criterio general de diseño, las velocidades del agua en tuberías principales suelen mantenerse dentro de los siguientes intervalos:

Tabla 5.16

Velocidades que sirven de referencia al diseñar la hidráulica de plantas de ultrafiltración.

Servicio	Velocidad recomendada
Agua de alimentación	1,0–2,0 m/s
Permeado	0,8–1,5 m/s
Concentrado	1,5–2,5 m/s
Soluciones CIP	1,5–2,5 m/s

Nota**.** Elaboración propia con base en criterios de diseño de plantas industriales.

Estas velocidades constituyen valores orientativos y deben verificarse mediante cálculos hidráulicos específicos para cada proyecto.

5.8.8 DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO

Mediante el bombeo se suministra la energía para superar la presión transmembrana, las pérdidas por fricción en tuberías y accesorios, y la resistencia de la propia membrana.

Su selección debe realizarse considerando:

- caudal máximo;
- presión de operación;
- pérdidas de carga;
- crecimiento esperado del fouling;
- ampliaciones futuras.

Durante la ingeniería conceptual se recomienda seleccionar bombas cuyo punto de operación se encuentre próximo al punto de máxima eficiencia (Best Efficiency Point, BEP).

Operar muy alejados de dicho punto incrementa:

- consumo energético;
- vibraciones;
- desgaste mecánico;
- costos de mantenimiento.

Configuración de bombas

En plantas industriales es frecuente adoptar configuraciones del tipo:

- una bomba en operación y una en reserva;
- dos bombas en operación y una en reserva;
- varias bombas de velocidad variable trabajando en paralelo.

Se decide según el tamaño de la planta y el grado de disponibilidad que se exija.

5.8.9 INSTRUMENTACIÓN PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO

La automatización de una planta de ultrafiltración requiere instrumentación capaz de supervisar continuamente las principales variables del proceso.

Como mínimo, el diseño debe contemplar:

Tabla 5.17

Instrumentos mínimos aconsejados para proyectar la hidráulica de una planta de UF.

Variable	Instrumento recomendado
Caudal de alimentación	Caudalímetro electromagnético
Caudal de permeado	Caudalímetro electromagnético
Presión de alimentación	Transmisor de presión
Presión del concentrado	Transmisor de presión
Presión del permeado	Transmisor de presión
Temperatura	Sensor Pt-100
pH	Analizador en línea
Turbidez	Turbidímetro
Conductividad	Conductivímetro
Nivel de tanques	Transmisor ultrasónico

Nota. Elaboración propia.

La información proporcionada por estos instrumentos permite calcular automáticamente variables derivadas como:

- presión transmembrana;
- recuperación;
- consumo específico de energía;
- flujo normalizado;
- rendimiento de cada tren.

5.8.10 AUTOMATIZACIÓN Y ESTRATEGIA DE CONTROL

Las plantas modernas de ultrafiltración operan mediante sistemas de control distribuido (DCS) o controladores lógicos programables (PLC), integrados con plataformas SCADA para supervisión y adquisición de datos.

Las principales funciones del sistema de control incluyen:

- regulación automática del caudal;
- control de la presión transmembrana;
- ejecución de secuencias de retrolavado;
- operación automática del sistema CIP;

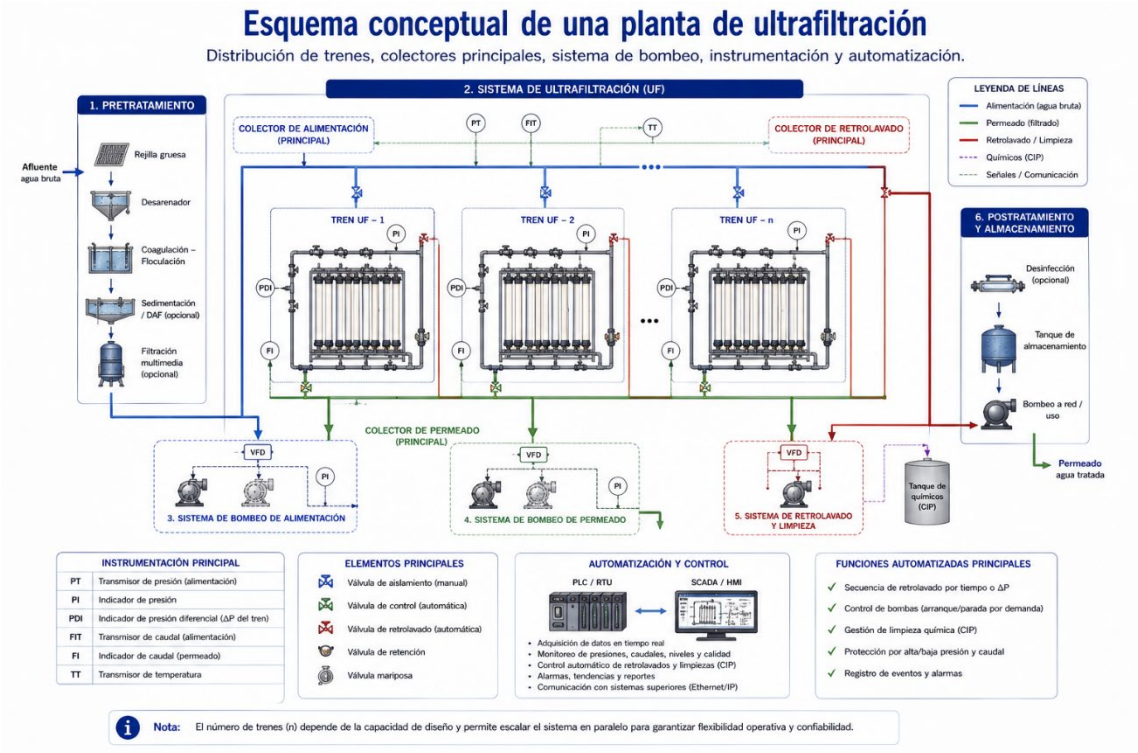
- monitoreo continuo de alarmas;
- registro histórico de variables operacionales;
- generación de reportes de desempeño.

El sistema debe incorporar estrategias de protección capaces de detener automáticamente la operación cuando se detecten condiciones anormales, tales como:

- presión excesiva;
- pérdida de flujo;
- rotura de membranas;
- fallas de bombeo;
- niveles bajos en tanques;
- fallas eléctricas.

Figura 5.14

Planta de ultrafiltración con distribución de trenes, colectores, bombeo y control.



Nota. Elaboración propia.

5.8.11 FILOSOFÍA DE DISEÑO DE PLANTAS DE ULTRAFILTRACIÓN

La experiencia obtenida en plantas industriales demuestra que el éxito de un sistema de ultrafiltración no depende únicamente de la calidad de la membrana seleccionada. Una planta confiable surge de la integración adecuada de todos sus componentes: captación, pretratamiento, bombeo, módulos de membranas, sistema de limpieza, instrumentación y automatización.

Bajo este enfoque, el diseño debe apuntar a la mayor disponibilidad operacional y al menor costo del ciclo de vida, sin limitarse a buscar la inversión inicial más baja.

Una filosofía de diseño basada exclusivamente en la reducción del CAPEX suele conducir a plantas con mayores costos de operación, menor flexibilidad y una vida útil más corta. Por el contrario, un enfoque integral permite alcanzar un equilibrio entre inversión, eficiencia energética, facilidad de mantenimiento y confiabilidad.

Reflexión ingenieril

En la práctica profesional, el diseño de una planta de ultrafiltración constituye un proceso de optimización multidisciplinaria. El ingeniero debe integrar conocimientos de mecánica de fluidos, transferencia de masa, química del agua, selección de materiales, automatización, instrumentación y evaluación económica. Precisamente esta integración distingue al diseñador de procesos del simple calculista y constituye una de las competencias fundamentales que debe desarrollar un estudiante de maestría en Ingeniería del Agua.

5.9 CASO INTEGRAL DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE ULTRAFILTRACIÓN

Esta sección aplica lo aprendido en el capítulo a un diseño conceptual: una planta de ultrafiltración que entregará agua para uso industrial. El método es el que se sigue en proyectos reales durante esa etapa conceptual, y sirve de base para la ingeniería básica y la de detalle.

5.9.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Una empresa del sector alimentario proyecta ampliar su capacidad de producción y requiere disponer de un sistema de ultrafiltración para tratar agua superficial destinada a la fabricación de bebidas.

Se prevé una operación sin pausas, las veinticuatro horas del día, con alta confiabilidad.

Su producción alimentará un sistema de ósmosis inversa ubicado aguas abajo.

En consecuencia, el diseño debe reducir al mínimo el potencial de fouling en las membranas de ósmosis inversa.

La Tabla 5.18 resume cómo es el agua de alimentación.

Tabla 5.18

Características del agua de alimentación

Parámetro	**Valor**
Producción requerida	6 000 m³/día
Turbidez	18 NTU
Sólidos suspendidos	22 mg/L
Carbono orgánico total	5,5 mg/L
pH	7,4
Temperatura	22 °C
Conductividad	540 µS/cm
SDI	4,5
Coliformes	Presentes

Nota. Elaboración propia.

5.9.2 OBJETIVOS DE DISEÑO

El sistema deberá cumplir los siguientes requisitos:

- producir 6 000 m³/día de agua tratada;
- remover sólidos suspendidos y coloides;
- reducir el SDI por debajo del valor recomendado para ósmosis inversa;
- garantizar una disponibilidad operacional superior al 95 %;
- minimizar el consumo específico de energía;
- facilitar la operación automática y el mantenimiento.

5.9.3 SELECCIÓN DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO

A partir de la calidad del agua y de lo que exige el proceso, se plantea el tren de tratamiento que sigue.

```
Captación
↓
Rejas de desbaste
```

```
↓
Coagulación
↓
Floculación
↓
Sedimentación lamelar
↓
Filtración multimedia
↓
Ultrafiltración
↓
Tanque de permeado
↓
Ósmosis inversa
↓
Tanque de almacenamiento
```

Con este esquema baja de forma apreciable la carga de sólidos y de materia orgánica que llega a la ultrafiltración, y el fouling se desarrolla menos.

5.9.4 SELECCIÓN DE LA MEMBRANA

Puesto que el propósito central es cuidar el sistema de ósmosis inversa, las membranas de ultrafiltración elegidas son de PVDF. Los motivos son estos:

- elevada resistencia química;
- excelente comportamiento frente al hipoclorito, cuando es compatible con las especificaciones del fabricante;
- buena resistencia mecánica;
- larga vida útil;
- amplia experiencia industrial.

Se adopta un MWCO de aproximadamente:

```
100 kDa
```

valor apropiado para retener coloides, bacterias y virus que traen las aguas superficiales.

5.9.5 SELECCIÓN DEL FLUJO DE DISEÑO

Las pruebas piloto indican que el flujo crítico se sitúa alrededor de:

90 L/m² ·h

Para asegurar un funcionamiento estable los doce meses del año, el flujo de diseño se fija en el 80 % del flujo crítico.

Por tanto:

$$J = 72\ L/m^2 \cdot h$$

Conversión de unidades:

$$J = 0{,}072\ m^3/m^2 \cdot h$$

Interpretación ingenieril

El flujo seleccionado no corresponde al máximo alcanzable por la membrana, sino al valor que proporciona el mejor equilibrio entre productividad, fouling, frecuencia de limpieza y consumo energético.

De este criterio depende en gran medida que las membranas duren más.

5.9.6 CÁLCULO DEL ÁREA TOTAL DE MEMBRANAS

Producción requerida:

$$Q = 6000\ m^3/día$$

Producción horaria:

$$Q = 6000 / 24$$

$$Q = 250\ m^3/h$$

Aplicando la ecuación de diseño:

$$A = Q / J$$

Sustituyendo:

$$A = 250 / 0{,}072$$

$$A = 3472{,}2\ m^2$$

Se adopta un factor de seguridad del 20 %.

Área instalada

= 3472 × 1,20

= 4167 m²

Se considera para el diseño:

Área instalada = 4200 m²

5.9.7 SELECCIÓN DEL NÚMERO DE MÓDULOS

El fabricante ofrece módulos con un área efectiva de:

105 m² por módulo

Por tanto:

$$Nm = 4200 / 105$$

$$Nm = 40 \text{ módulos}$$

Se seleccionan:

40 módulos

distribuidos de la siguiente forma:

- cinco trenes;
- ocho módulos por tren;
- cuatro trenes en operación;
- un tren de reserva.

Esta configuración garantiza elevada disponibilidad operacional y facilita las labores de mantenimiento.

5.9.8 BALANCE SIMPLIFICADO DE AGUA

Se adopta una recuperación global del sistema de:

95 %

Entonces:

Qalimentación

= 6000 /0,95

= 6316 m³/día

Agua utilizada en retrolavados y purgas:

6316−6000

=316 m³/día

Ese volumen hay que sumarlo al dimensionamiento de los tanques para retrolavado y del sistema que trata los efluentes.

5.9.9 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

Considerando la potencia instalada de bombeo:

$$P = 310\ kW$$

y una producción horaria de:

$$Q = 250\ m^3/h$$

el consumo específico será:

$$CEE = 310/250$$

$$CEE = 1{,}24\ kWh/m^3$$

Este valor resulta consistente con plantas industriales de ultrafiltración correctamente diseñadas.

Tabla 5.19

Resumen del diseño conceptual de la planta de ultrafiltración

Parámetro	**Valor**
Producción	6 000 m³/día
Área instalada	4 200 m²
Número de módulos	40
Número de trenes	5
Módulos por tren	8
Recuperación	95 %
Agua para retrolavado	316 m³/día
Consumo específico de energía	1,24 kWh/m³

Nota. Elaboración propia.

5.9.10 EVALUACIÓN TÉCNICA DEL DISEÑO

Hidráulicamente la operación queda bien por debajo del flujo crítico. Con ello baja la probabilidad de que haya polarización por concentración y el fouling avanza menos.

La configuración de cinco trenes proporciona flexibilidad operacional, permitiendo mantener la producción durante las actividades de mantenimiento preventivo.

La recuperación seleccionada representa un compromiso razonable entre eficiencia en el uso del agua y estabilidad del proceso. Asimismo, el consumo específico de energía obtenido resulta compatible con instalaciones industriales modernas de características similares.

Si se combina un pretratamiento sólido con retrolavado automático y un programa de limpieza química, la disponibilidad operacional se mantendrá alta y las membranas durarán más.

Reflexión ingenieril

El caso deja claro que calcular el área de membranas es solo una parte del diseño de una planta de ultrafiltración. El proyecto prospera si se articulan la caracterización del agua, la elección de la membrana, la hidráulica, el pretratamiento, la automatización, la estrategia de limpieza y la evaluación económica. Esa mirada integral sostiene la ingeniería moderna de membranas y será la referencia en los capítulos siguientes, que tratan la nanofiltración y luego la ósmosis inversa.

5.10 EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE PLANTAS DE ULTRAFILTRACIÓN

Que una tecnología remueva muchos contaminantes no es razón suficiente para elegirla. En ingeniería, igual de importante es probar que la propuesta se sostiene técnica, económica y ambientalmente a lo largo de la vida de la instalación.

Con la evaluación técnico-económica se contrastan alternativas de diseño que se miden bajo varios criterios simultáneos: cuánto cuesta construir, cuánto cuesta operar, cuánta energía se consume, qué disponibilidad ofrece la planta, cuántos años duran los equipos y qué riesgos operacionales existen.

En ultrafiltración esta evaluación pesa bastante, porque una decisión que parece barata al invertir puede traer altos costos de mantenimiento y de reposición de membranas durante la operación.

5.10.1 COMPONENTES DE LA INVERSIÓN (CAPEX)

La inversión inicial o **Capital Expenditure (CAPEX)** comprende todos los costos asociados al diseño, adquisición e instalación de la planta antes de su puesta en marcha.

Los principales componentes son:

- obras civiles;
- sistema de captación;
- equipos de pretratamiento;

- módulos de ultrafiltración;
- bombas;
- tuberías y válvulas;
- sistema CIP;
- instrumentación;
- sistema de automatización;
- instalaciones eléctricas;
- montaje electromecánico;
- ingeniería;
- supervisión y puesta en marcha.

Los módulos de membranas suelen absorber buena parte de la inversión en una planta de ultrafiltración, aunque la proporción cambia con la capacidad instalada y con cuánto se automatice.

Tabla 5.20

Distribución referencial de la inversión inicial en una planta de ultrafiltración

Concepto	Participación aproximada (%)
Obras civiles	15–25
Equipos de pretratamiento	15–20
Módulos de ultrafiltración	20–30
Bombas y sistema hidráulico	10–15
Sistema CIP	5–10
Instrumentación y automatización	8–15
Ingeniería, montaje y puesta en marcha	10–15

Nota. Elaboración propia.

La proporción de cada rubro cambia con el tamaño de la planta, con la calidad del agua que ingresa y con el grado de automatización.

5.10.2 COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX)

Se llama costos de operación a lo que cuesta mantener funcionando la planta mientras dure su vida útil.

En ultrafiltración, los principales componentes del **OPEX** son:

- consumo de energía eléctrica;

- reposición de membranas;
- productos químicos para limpieza;
- agua utilizada en retrolavados;
- mano de obra;
- mantenimiento preventivo;
- mantenimiento correctivo;
- disposición de residuos;
- análisis de laboratorio.

A diferencia del CAPEX, estos costos se presentan de manera recurrente y, en proyectos de larga duración, pueden superar ampliamente la inversión inicial.

Interpretación ingenieril

Optar por la membrana más barata no siempre da el menor costo total del proyecto. Puede resultar más rentable una de precio de compra mayor, siempre que dure más, necesite limpiezas menos seguidas y gaste menos energía.

5.10.3 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

En una planta de ultrafiltración, la energía se ubica entre los rubros más relevantes del costo operativo.

El consumo específico de energía se expresa como:

$$\text{CEE} = \text{Energía consumida} / \text{Volumen de agua producida}$$

o de forma abreviada:

$$\text{CEE} = E / V$$

donde:

$$\text{CEE} = \text{consumo específico de energía } (kWh/m^3)$$

$$E = \text{energía consumida } (kWh)$$

$$V = \text{volumen de agua producida } (m^3)$$

Con este indicador se pueden comparar alternativas de diseño sin importar la capacidad de cada planta.

Al evaluar proyectos, se aconseja estimar cuánta energía se consumirá en el año y analizar su sensibilidad ante cambios en la tarifa eléctrica.

5.10.4 COSTO DEL CICLO DE VIDA (LIFE CYCLE COST)

El costo del ciclo de vida es un instrumento central para decidir cuál alternativa de diseño conviene más.

Este análisis incorpora:

- inversión inicial;
- costos anuales de operación;
- costos de mantenimiento;
- reposición de membranas;
- consumo energético;
- valor residual de los equipos.

La evaluación debe realizarse considerando todo el horizonte del proyecto, que en plantas de tratamiento suele situarse entre 20 y 30 años.

Interpretación ingenieril

El criterio de menor inversión inicial no garantiza la alternativa más económica. La experiencia demuestra que muchas plantas diseñadas exclusivamente para reducir el CAPEX presentan posteriormente elevados costos de operación, disminuyendo la rentabilidad del proyecto.

5.10.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En todo proyecto hay incertidumbre acerca de la calidad del agua, del precio de la energía, de cuánto durarán las membranas y de cómo evolucionarán los costos operativos.

Por eso conviene hacer un análisis de sensibilidad con varios escenarios.

Las variables que normalmente se analizan son:

- variación del precio de la energía;
- incremento del costo de las membranas;
- disminución del flujo de diseño;
- reducción de la vida útil de las membranas;
- aumento de la frecuencia de limpieza;
- incremento del costo de reactivos.

Se trata de identificar qué variables influyen más en la rentabilidad del proyecto.

Tabla 5.21

Variables recomendadas para el análisis de sensibilidad

Variable	Escenario de evaluación
Precio de la energía	±20 %
Costo de membranas	±15 %
Flujo de diseño	±10 %
Vida útil de membranas	±20 %
Frecuencia de limpieza	±25 %
Costo de reactivos	±20 %

Nota. Elaboración propia.

5.10.6 INDICADORES PARA LA TOMA DE DECISIONES

Al comparar alternativas, el ingeniero debe mirar juntos los indicadores técnicos, los económicos y los ambientales.

Entre los principales indicadores se encuentran:

- consumo específico de energía;
- costo unitario del agua tratada;
- disponibilidad operacional;
- recuperación del sistema;
- frecuencia de limpieza;
- vida útil esperada de las membranas;
- costo anual de mantenimiento;
- generación de residuos.

La selección final debe basarse en el equilibrio entre estos indicadores y no únicamente en el costo de inversión.

Figura 5.15

Evaluación técnico-económica de una planta de ultrafiltración, CAPEX, OPEX, costo del ciclo de vida, energía, disponibilidad y sensibilidad.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

La evaluación técnico-económica constituye la etapa en la que convergen todas las decisiones adoptadas durante el diseño. Una planta correctamente dimensionada, con una adecuada selección de membranas, un sistema hidráulico eficiente y un programa de limpieza optimizado no solo ofrecerá un mejor desempeño técnico, sino también un menor costo del ciclo de vida. En la práctica profesional, el ingeniero no diseña únicamente para que una planta funcione; diseña para que opere de manera confiable, sostenible y económicamente competitiva durante décadas.

5.11 CRITERIOS DE INGENIERÍA PARA EL DISEÑO DE PLANTAS DE ULTRAFILTRACIÓN

El diseño de una planta de ultrafiltración debe concebirse como un proceso integral en el que interactúan disciplinas como la ingeniería química, la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica, la automatización y la ingeniería sanitaria. La selección adecuada de una membrana constituye únicamente una parte del proyecto; el éxito operativo depende de la correcta integración entre el pretratamiento, la hidráulica, el sistema de limpieza, la instrumentación y la estrategia de control.

Lo observado en plantas industriales indica que los problemas de operación casi nunca provienen de un fallo en el material de la membrana. Proceden de un diseño de proceso deficiente o de una operación distinta de la prevista durante la ingeniería.

En consecuencia, el diseñador debe adoptar una visión sistémica y evaluar el comportamiento de toda la instalación durante su vida útil.

5.11.1 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA MEMBRANA

Para elegir la membrana hay que mirar de forma conjunta las características del agua, lo que se espera del tratamiento y cómo será la operación más adelante.

Como criterios generales se recomienda:

- elegir el MWCO según los contaminantes que se quiere remover y no solo según lo que haya disponible en el mercado;
- verificar la compatibilidad química frente a los reactivos utilizados durante la limpieza;
- considerar la temperatura máxima de operación;
- evaluar la resistencia frente a agentes oxidantes;
- revisar la vida útil garantizada por el fabricante;
- comparar los costos a lo largo del ciclo de vida, no el simple precio de compra.

En proyectos destinados al abastecimiento de agua potable, la estabilidad operacional suele ser más importante que obtener el flujo máximo de permeado.

5.11.2 CRITERIOS PARA EL PRETRATAMIENTO

El pretratamiento determina en gran medida el comportamiento de la planta.

Una membrana correctamente seleccionada puede presentar un desempeño deficiente cuando el pretratamiento resulta insuficiente.

Durante el diseño deben analizarse los siguientes aspectos:

- variabilidad estacional de la calidad del agua;
- presencia de sólidos suspendidos;
- materia orgánica natural;
- microorganismos;
- hierro y manganeso;

- aceites y grasas;
- potencial de incrustación.

Dependiendo de estas características pueden incorporarse procesos como:

- coagulación;
- floculación;
- sedimentación;
- filtración multimedia;
- carbón activado;
- oxidación avanzada.

La meta es disminuir la carga contaminante antes de que llegue a la membrana, y no usar la ultrafiltración para tapar las fallas del pretratamiento.

5.11.3 CRITERIOS HIDRÁULICOS

Desde el punto de vista hidráulico deben considerarse las siguientes recomendaciones:

- mantener una distribución uniforme del caudal entre todos los módulos;
- evitar zonas de baja velocidad que favorezcan la deposición de sólidos;
- limitar las pérdidas de carga en tuberías y accesorios;
- diseñar colectores simétricos;
- prever puntos de purga y drenaje;
- facilitar el aislamiento individual de cada tren.

Que la hidráulica sea uniforme influye de manera decisiva en cuánto duran las membranas.

5.11.4 CRITERIOS PARA EL CONTROL DEL FOULING

El fouling debe prevenirse desde la etapa de diseño.

Las principales estrategias son:

- operar por debajo del flujo crítico;
- optimizar la velocidad tangencial;
- limitar la recuperación cuando exista riesgo de incrustaciones;

- automatizar los retrolavados;
- implementar sistemas CIP eficientes;
- monitorear continuamente la presión transmembrana.

Debe recordarse que ninguna estrategia de limpieza puede compensar permanentemente un diseño hidráulico inadecuado.

5.11.5 CRITERIOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN

Las plantas modernas operan mediante sistemas automáticos capaces de supervisar continuamente las variables críticas del proceso.

Como mínimo, el sistema de control debe registrar:

- caudal;
- presión;
- temperatura;
- conductividad;
- turbidez;
- nivel de tanques;
- estado de bombas;
- secuencias de retrolavado;
- secuencias CIP.

Asimismo, debe permitir:

- operación manual;
- operación automática;
- registro histórico de datos;
- generación de alarmas;
- comunicación remota;
- integración con sistemas SCADA.

Al automatizar, el proceso se vuelve más estable y se reduce la variabilidad que introduce la operación manual.

5.11.6 CRITERIOS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

El consumo de energía figura entre los componentes más pesados del costo operativo.

Para mejorar la eficiencia energética se recomienda:

- seleccionar bombas próximas a su punto de máxima eficiencia (BEP);
- minimizar pérdidas de carga;
- evitar presiones innecesariamente elevadas;
- optimizar la frecuencia de retrolavados;
- utilizar variadores de frecuencia cuando existan variaciones importantes del caudal;
- realizar mantenimiento preventivo del sistema hidráulico.

La eficiencia energética debe evaluarse mediante indicadores normalizados como el consumo específico de energía (kWh/m³).

5.11.7 CRITERIOS PARA LA AMPLIACIÓN FUTURA

Toda planta debería diseñarse considerando posibles incrementos de capacidad.

Durante la ingeniería conceptual resulta conveniente prever:

- espacio disponible para nuevos trenes;
- capacidad adicional en colectores principales;
- reserva de potencia eléctrica;
- capacidad excedente del sistema CIP;
- espacio para nuevos tanques de almacenamiento.

Estas previsiones reducen significativamente el costo de futuras ampliaciones.

Tabla 5.22

Criterios de ingeniería para el diseño de plantas de ultrafiltración

Aspecto	Recomendación principal
Selección de membranas	Fundamentar la elección en el MWCO, la compatibilidad química y el costo del ciclo de vida
Pretratamiento	Diseñar para reducir la carga contaminante antes de la membrana
Hidráulica	Garantizar distribución uniforme del caudal y bajas pérdidas de carga
Fouling	Operar por debajo del flujo crítico y automatizar la limpieza
Automatización	Integrar PLC, SCADA y monitoreo continuo

Aspecto	Recomendación principal
Energía	Minimizar el consumo específico mediante un diseño hidráulico eficiente
Mantenimiento	Incorporar accesibilidad y sistemas CIP desde la ingeniería conceptual
Expansión	Prever espacio e infraestructura para incrementos futuros de capacidad

Nota. Elaboración propia.

Figura 5.16

Criterios de ingeniería para caracterización, pretratamiento, membranas, diseño hidráulico, automatización, limpieza, evaluación económica y sostenibilidad.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Proyectar una planta de ultrafiltración exige más que dimensionar módulos y tuberías. Obliga a comprender cómo interactúan el transporte de materia, la hidráulica, la química del agua, los materiales y la automatización. Hoy se persiguen soluciones

robustas, con rendimiento estable aunque varíe la calidad del agua, que usen menos recursos y se operen sin dificultad por décadas.

En consecuencia, el éxito de un proyecto no depende de optimizar un único parámetro, sino de alcanzar un equilibrio entre confiabilidad, eficiencia energética, facilidad de mantenimiento, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica.

5.11.8 ERRORES FRECUENTES EN EL DISEÑO DE PLANTAS DE ULTRAFILTRACIÓN

Lo vivido en el diseño, la construcción y la operación de plantas de ultrafiltración muestra que casi todas las dificultades operacionales nacen de decisiones tomadas al inicio del proyecto y no de la tecnología de membranas. Buena parte de esos errores se evita con una caracterización correcta del agua, pruebas piloto y criterios de ingeniería ya probados.

A continuación se exponen los errores que más se repiten en proyectos industriales, junto con recomendaciones para prevenirlos.

Error 1. Diseñar utilizando el flujo máximo indicado por el fabricante

Un error muy común consiste en fijar el flujo de diseño con el máximo que dan los catálogos técnicos de las membranas.

Conviene recordar que esas cifras suelen corresponder a condiciones ideales de laboratorio, que no reflejan necesariamente la operación real.

Cuando una planta se diseña utilizando dichos valores, suelen presentarse:

- incremento acelerado del fouling;
- mayor frecuencia de limpieza;
- aumento del consumo energético;
- reducción de la vida útil de las membranas.

Recomendación

Seleccionar el flujo de diseño utilizando los resultados de pruebas piloto y mantener un margen de seguridad respecto al flujo crítico.

Error 2. Subestimar la importancia del pretratamiento

Es frecuente creer que la ultrafiltración, por sí sola, resolverá los problemas de calidad del agua.

Con esa idea, las membranas suelen perder rendimiento muy pronto.

La ultrafiltración debe considerarse una barrera de separación y no un sustituto de procesos como:

- coagulación;
- floculación;
- sedimentación;
- filtración granular.

Recomendación

Proyectar el pretratamiento de modo que baje la carga de sólidos y de materia orgánica antes de llegar a la membrana.

Error 3. No considerar la variabilidad estacional del agua

El agua superficial cambia mucho a lo largo del año por las lluvias, las sequías, el crecimiento de algas y la actividad humana.

Diseñar utilizando únicamente un análisis puntual puede conducir a graves problemas operacionales.

Recomendación

Utilizar campañas de muestreo representativas que incluyan condiciones de máxima y mínima contaminación.

Error 4. Diseñar recuperaciones excesivamente elevadas

El incremento de la recuperación reduce inicialmente el consumo de agua.

Sin embargo, también incrementa:

- la concentración de contaminantes;
- el riesgo de incrustaciones;
- la polarización por concentración;
- el fouling.

Recomendación

Optimizar la recuperación, equilibrando el consumo de agua con la estabilidad operacional.

Error 5. Subdimensionar el sistema CIP

Con frecuencia el sistema de limpieza se diseña únicamente como un equipo auxiliar.

Como consecuencia:

- aumenta el tiempo de mantenimiento;
- disminuye la eficacia de las limpiezas;
- se incrementa el consumo de reactivos;
- disminuye la disponibilidad de la planta.

Recomendación

Diseñar el sistema CIP desde la ingeniería conceptual como parte integrante del proceso.

Error 6. No prever capacidad de expansión

Muchas plantas requieren aumentar su capacidad pocos años después de entrar en operación.

Cuando esta posibilidad no fue considerada durante el diseño, la ampliación resulta costosa y técnicamente compleja.

Recomendación

Reservar espacio para:

- nuevos trenes;
- ampliación de colectores;
- incremento de capacidad eléctrica;
- ampliación del sistema CIP.

Error 7. Distribución hidráulica deficiente

Una distribución desigual del caudal provoca que algunos módulos trabajen sobrecargados mientras otros permanecen subutilizados.

Las consecuencias son:

- fouling localizado;
- diferencias de presión;

- envejecimiento desigual;
- disminución del rendimiento global.

Recomendación

Realizar balances hidráulicos detallados y diseñar colectores simétricos.

Error 8. Seleccionar bombas fuera del punto de máxima eficiencia

En ocasiones las bombas se seleccionan únicamente considerando el caudal nominal.

Operar lejos del punto de máxima eficiencia produce:

- incremento del consumo eléctrico;
- vibraciones;
- cavitación;
- mayor costo de mantenimiento.

Recomendación

Seleccionar bombas cuyo punto normal de operación se encuentre próximo al **Best Efficiency Point (BEP)**.

Error 9. Automatización insuficiente

En plantas modernas resulta prácticamente imposible mantener una operación estable mediante control manual.

La ausencia de automatización produce:

- mayor variabilidad operacional;
- incremento de errores humanos;
- dificultad para implementar mantenimiento predictivo;
- aumento del consumo de agua y energía.

Recomendación

Incorporar desde el diseño sistemas PLC, SCADA, registro histórico de datos y alarmas automáticas.

Error 10. Evaluar únicamente el costo de inversión

El menor precio de adquisición no garantiza la mejor alternativa.

En numerosos proyectos el costo de operación durante veinte años supera varias veces la inversión inicial.

Recomendación

Contrastar cada alternativa con el Life Cycle Cost (LCC), es decir, el costo a lo largo del ciclo de vida, que incluya inversión, energía, mantenimiento, reposición de membranas y manejo de residuos.

Tabla 5.23

Errores frecuentes al diseñar plantas de ultrafiltración y cómo prevenirlos

Error frecuente	Consecuencia principal	Recomendación
Diseñar con el flujo máximo del fabricante	Fouling acelerado	Utilizar flujo de diseño basado en pruebas piloto
Pretratamiento insuficiente	Ensuciamiento prematuro	Optimizar las etapas previas al sistema de membranas
Ignorar la variabilidad del agua	Inestabilidad operacional	Diseñar considerando condiciones estacionales
Recuperación excesiva	Incremento de incrustaciones y fouling	Optimizar la recuperación
Sistema CIP subdimensionado	Limpieza ineficiente	Diseñar el CIP desde la ingeniería conceptual
Distribución hidráulica deficiente	Desbalance entre módulos	Diseñar colectores simétricos
Bombas mal seleccionadas	Alto consumo energético	Operar cerca del BEP
Automatización insuficiente	Mayor intervención del operador	Implementar PLC y SCADA
Evaluar solo el CAPEX	Mayores costos durante la operación	Analizar el costo del ciclo de vida

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

La práctica enseña que casi todo lo que falla en plantas de ultrafiltración se pudo evitar en el diseño con una buena caracterización del agua, pruebas piloto y criterios técnicos aplicados con rigor. El éxito de un proyecto no depende solo de la tecnología escogida. Depende de que el ingeniero prevea la operación real y decida con fundamentos técnicos, económicos y ambientales.

Figura 5.17

Vínculo entre decisiones de diseño y errores que perjudican el funcionamiento de una planta de ultrafiltración.



Nota. Elaboración propia.

5.12 LECCIONES APRENDIDAS

El estudio de la ultrafiltración revela que una planta de membranas no triunfa solo por el módulo escogido ni por el rendimiento de cierta membrana. El resultado global sale de la interacción de pretratamiento, diseño hidráulico, agua de entrada, estrategia de limpieza, automatización y operación sostenida.

La experiencia de las últimas décadas deja una serie de lecciones, que son buenas prácticas para diseñar y operar plantas industriales.

5.12.1 LA MEMBRANA NO CORRIGE UN DISEÑO DEFICIENTE

Uno de los errores más frecuentes consiste en asumir que una membrana de alto desempeño compensará deficiencias del pretratamiento o del diseño hidráulico.

La experiencia demuestra que incluso las membranas más avanzadas presentan pérdidas importantes de rendimiento cuando reciben aguas con elevadas concentraciones de sólidos, coloides o materia orgánica sin un acondicionamiento adecuado.

El mejor desempeño se obtiene cuando la membrana trabaja como parte de un sistema integral de tratamiento y no como la única barrera frente a la contaminación.

5.12.2 EL PRETRATAMIENTO DETERMINA LA VIDA ÚTIL DE LA MEMBRANA

Más que ningún otro factor, la calidad del agua que ingresa determina cada cuánto hay que limpiar, qué tanto avanza el fouling y cuántos años rinden las membranas.

Invertir en un pretratamiento eficiente suele producir mayores beneficios económicos que intentar resolver posteriormente los problemas mediante limpiezas químicas frecuentes.

Se ha comprobado en plantas de agua potable, de reúso de aguas residuales, en industrias de alimentos y en procesos farmacéuticos.

5.12.3 DISEÑAR PARA OPERAR, NO SOLAMENTE PARA CONSTRUIR

Diseñar no es solo obtener cuántos módulos hacen falta o qué diámetro llevan las tuberías.

Una planta correctamente diseñada debe facilitar:

- la operación diaria;
- el mantenimiento preventivo;
- las ampliaciones futuras;
- la sustitución de equipos;
- la automatización del proceso;
- la seguridad del personal.

La experiencia demuestra que una planta fácil de operar presenta menores costos durante toda su vida útil.

5.12.4 EL FLUJO MÁXIMO NO REPRESENTA EL MEJOR PUNTO DE OPERACIÓN

Desde una óptica académica, trabajar con el flujo más alto posible podría parecer lo más atractivo.

La práctica industrial, sin embargo, enseña que trabajar próximo al flujo máximo acentúa la polarización por concentración, apura el fouling y encarece la energía.

Las plantas mejor diseñadas funcionan dentro de una zona estable y con márgenes de seguridad que absorben los cambios en la calidad del agua.

5.12.5 LA AUTOMATIZACIÓN MEJORA LA CONFIABILIDAD

Los sistemas PLC, SCADA y el monitoreo permanente permiten notar a tiempo si la planta se desvía de su comportamiento normal.

La automatización disminuye la intervención manual, hace más repetibles las operaciones y facilita aplicar programas de mantenimiento predictivo.

En plantas modernas, el análisis continuo de datos constituye una herramienta tan importante como el propio diseño hidráulico.

5.12.6 EL COSTO DEL CICLO DE VIDA ES MÁS IMPORTANTE QUE EL COSTO INICIAL

Las decisiones adoptadas durante la ingeniería conceptual influyen directamente sobre los costos de operación durante las siguientes décadas.

Una alternativa con mayor inversión inicial puede ser bastante más rentable si gasta menos energía, hace durar más las membranas y exige limpiezas menos frecuentes.

Por eso la evaluación económica debe abarcar todo el horizonte del proyecto, no solo el presupuesto de compra.

5.12.7 LA SOSTENIBILIDAD DEBE INCORPORARSE DESDE EL DISEÑO

Las plantas actuales se diseñan atendiendo no solo a lo técnico y lo económico, sino también a lo ambiental.

Entre ellos destacan:

- reducción del consumo específico de energía;
- disminución del consumo de agua para retrolavado;
- optimización del uso de reactivos químicos;
- minimización de residuos líquidos;
- facilidad para reutilizar el agua recuperada.

La sostenibilidad no se agrega al final del proyecto; atraviesa todas las etapas, desde escoger la tecnología hasta operar la planta.

Tabla 5.24

Lecciones aprendidas al diseñar y operar plantas de UF

Lección aprendida	Aplicación práctica
La membrana no sustituye al pretratamiento	Diseñar un acondicionamiento adecuado del agua
El flujo máximo no es el flujo óptimo	Operar por debajo del flujo crítico
La hidráulica determina el desempeño	Diseñar colectores equilibrados y bajas pérdidas de carga
El fouling debe prevenirse	Incorporar monitoreo continuo y programas de limpieza
El mantenimiento comienza en el diseño	Integrar el sistema CIP y facilitar el acceso a los equipos
La automatización incrementa la confiabilidad	Implementar PLC, SCADA y mantenimiento predictivo
El costo del ciclo de vida guía la selección tecnológica	Evaluar conjuntamente CAPEX y OPEX
La sostenibilidad forma parte del diseño	Optimizar agua, energía y productos químicos

Nota. Elaboración propia.

Figura 5.18

Lecciones aprendidas en ultrafiltración, mostrando la interacción entre caracterización del agua, pretratamiento, selección de membranas, diseño hidráulico, operación, mantenimiento, automatización y sostenibilidad.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión final del capítulo

Dentro de la ingeniería actual del agua, la ultrafiltración es de las tecnologías más afianzadas. Entrega agua de alta calidad, opera en forma automática y protege los

procesos ubicados después, sean de nanofiltración u ósmosis inversa. Por eso aparece como componente esencial en muchas plantas industriales y municipales.

Aun así, lo que decide el rendimiento de un sistema de ultrafiltración es el criterio del ingeniero, más que la membrana en sí. Que el proyecto triunfe o fracase depende de caracterizar bien el agua, fijar el flujo de diseño, controlar el fouling, automatizar el proceso y evaluar el costo del ciclo de vida.

En consecuencia, el diseño de plantas de ultrafiltración debe abordarse desde una perspectiva integral, donde los principios científicos, la experiencia operacional y los criterios de sostenibilidad converjan para desarrollar soluciones técnicamente robustas, económicamente viables y ambientalmente responsables.

CAPÍTULO 6

NANOFILTRACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN

Durante las tres últimas décadas, la nanofiltración (NF) figura entre las tecnologías de membranas que más han crecido. Logra separar compuestos disueltos que escapan a la ultrafiltración, sin requerir por fuerza el elevado gasto energético de la ósmosis inversa.

La nanofiltración queda a medio camino, en la ingeniería del agua, entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa. La ultrafiltración detiene sobre todo coloides, macromoléculas, virus y sólidos suspendidos. La nanofiltración logra eso y algo más: elimina sales multivalentes, pesticidas, colorantes, dureza, orgánicos de poco peso molecular y gran parte de la materia orgánica natural que está disuelta.

Gracias a esta capacidad de separación, resulta muy atractiva cuando se busca una desmineralización parcial del agua sin pagar el alto gasto energético de la ósmosis inversa.

Con la ultrafiltración predomina el tamaño del poro en la separación. La nanofiltración suma a eso la carga eléctrica que tiene la membrana y la atracción o repulsión electrostática con los iones de la solución.

Como consecuencia, dos especies químicas con tamaños moleculares similares pueden presentar rechazos completamente diferentes dependiendo de su carga eléctrica, valencia y movilidad iónica.

Este rasgo marca una de las diferencias de fondo respecto a los procesos de capítulos anteriores.

Desde una perspectiva industrial, la nanofiltración se utiliza ampliamente en:

- ablandamiento de aguas subterráneas;
- remoción de color en aguas superficiales;
- eliminación de pesticidas;
- reducción de materia orgánica natural;

- producción de agua para la industria alimentaria;
- recuperación de productos de alto valor agregado;
- concentración de antibióticos;
- tratamiento de efluentes industriales;
- reutilización de aguas residuales;
- producción de agua de alimentación para ósmosis inversa.

En los últimos años se desarrollaron las membranas TFC (Thin Film Composite, de película delgada compuesta). Con ellas la selectividad mejoró de manera marcada, el gasto energético bajó y la tecnología llegó a más aplicaciones.

Es hoy una de las alternativas más eficientes si se busca agua de calidad intermedia: deja en el agua algo de su mineralización natural y, al mismo tiempo, baja ciertos contaminantes puntuales.

Desde el punto de vista económico, esta tecnología ofrece una ventaja importante frente a la ósmosis inversa cuando el objetivo consiste únicamente en eliminar dureza, materia orgánica o sales multivalentes, ya que opera con presiones considerablemente menores.

Por eso, para decidir si conviene la ultrafiltración, la nanofiltración o la ósmosis inversa, se evalúan juntos el objetivo que se persigue, la química del agua, la energía que se consume y el Life Cycle Cost del sistema.

Los temas de este capítulo son la base científica de la nanofiltración, cómo se rechazan los iones, qué membranas hay en el mercado, cómo se diseña, cuál es su hidráulica y dónde se aplica en la industria. Al final se resuelve un caso de ingeniería completo, parecido al del capítulo anterior.

Finalmente, el estudiante estará en capacidad de seleccionar una membrana de nanofiltración, desarrollar el diseño conceptual de una planta y evaluar técnica y económicamente diferentes alternativas de tratamiento.

6.2 FUNDAMENTOS DE LA NANOFILTRACIÓN

En la nanofiltración, la presión empuja el agua a través de una membrana semipermeable; mientras tanto, mecanismos físicos y electroquímicos actúan en conjunto y retienen buena parte de los solutos disueltos.

Cuando se filtra por ultrafiltración, predomina la exclusión por tamaño. En la nanofiltración pesan además la carga que lleva la membrana y las propiedades electrostáticas de los iones en la solución.

En consecuencia, el rechazo de un determinado compuesto depende simultáneamente de:

- tamaño molecular;
- radio hidratado;
- carga eléctrica;
- valencia;
- movilidad iónica;
- afinidad química con la membrana.

Esta interacción convierte a la nanofiltración en un proceso considerablemente más complejo que la ultrafiltración y explica por qué dos iones de tamaño similar pueden presentar porcentajes de rechazo completamente diferentes.

Son membranas con una capa activa finísima, de unas decenas hasta cientos de nanómetros, montada sobre una estructura microporosa que le aporta resistencia mecánica.

La separación ocurre prácticamente en esta capa superficial, donde el transporte de agua y solutos está gobernado por gradientes de presión, gradientes de concentración e interacciones electrostáticas.

Interpretación ingenieril

Mientras que en ultrafiltración el ingeniero selecciona una membrana principalmente a partir del **MWCO**, en nanofiltración resulta indispensable considerar además la composición iónica del agua y la carga superficial de la membrana. Este cambio de enfoque marca el inicio de los procesos avanzados de separación por membranas y constituye la base para comprender posteriormente la ósmosis inversa.

6.2.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA NANOFILTRACIÓN

La aparición de la nanofiltración fue un paso notable para las membranas de tratamiento de agua. Se necesitaba un proceso que retirara parcialmente las sales disueltas

y los orgánicos de poco peso molecular sin recurrir a la energía que consume la ósmosis inversa.

Al principio, las membranas se aplicaron a la microfiltración y después a la ultrafiltración, orientadas a remover sólidos suspendidos, coloides y macromoléculas. Esas tecnologías no bastaban para eliminar la dureza, los pesticidas, los colorantes y otros compuestos disueltos en concentraciones relativamente bajas.

Durante la década de 1970 comenzaron a desarrollarse membranas de película delgada capaces de operar con presiones intermedias y proporcionar rechazos elevados para iones divalentes y compuestos orgánicos de pequeño tamaño. Inicialmente estas membranas fueron denominadas "membranas de baja presión para ósmosis inversa". Posteriormente, debido a sus características particulares de separación, recibieron el nombre de membranas de nanofiltración.

El verdadero crecimiento industrial de esta tecnología ocurrió durante las décadas de 1980 y 1990 gracias al desarrollo de membranas compuestas de poliamida obtenidas mediante polimerización interfacial. Estas membranas ofrecían una combinación muy favorable de permeabilidad, selectividad y resistencia química, permitiendo su aplicación en procesos industriales y municipales.

Hoy se trata de una tecnología madura, usada en miles de plantas del mundo para obtener agua potable, de proceso, de uso farmacéutico y de alimentación a sistemas de ósmosis inversa.

El desarrollo reciente de nuevos materiales, técnicas de modificación superficial y nanotecnología ha permitido fabricar membranas con mayor permeabilidad, mejor resistencia al fouling y mayor estabilidad frente a agentes oxidantes, ampliando continuamente su campo de aplicación.

Para la ingeniería del agua, se distinguen cuatro etapas principales en la evolución de la nanofiltración.

Primera etapa (1960–1975): desarrollo de membranas de ultrafiltración y primeras investigaciones sobre membranas parcialmente selectivas para sales.

Segunda etapa (1975–1990): aparición de membranas compuestas de baja presión y primeras aplicaciones industriales.

Tercera etapa (1990–2010): expansión comercial de la nanofiltración en tratamiento de agua potable, industrias alimentarias y reutilización de aguas.

Cuarta etapa (2010–actualidad): desarrollo de membranas de alta selectividad, integración con inteligencia artificial, monitoreo en línea y procesos híbridos de tratamiento.

Esta evolución refleja el creciente interés por tecnologías capaces de producir agua de alta calidad con menores requerimientos energéticos y mayor sostenibilidad ambiental.

Figura 6.1

Recorrido histórico de las membranas (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa), con las innovaciones de cada fase.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011) y Crittenden et al. (2012).

6.2.2 PRINCIPIOS DE SEPARACIÓN

La nanofiltración se distingue de las tecnologías de los capítulos anteriores en que la separación ya no depende únicamente del tamaño de partículas o moléculas. Participan a la vez la exclusión estérica, las interacciones electrostáticas, la hidratación iónica y el transporte por una capa activa extremadamente delgada.

Así, qué tan bien se separa un soluto depende de la membrana y de la fisicoquímica propia de cada soluto presente en el agua.

Para fines de diseño, los mecanismos que más explican el rechazo son:

- exclusión por tamaño;
- exclusión electrostática;
- diferencias en el radio hidratado de los iones;
- interacciones entre la membrana y los solutos;
- difusión y convección simultáneas.

Estos mecanismos actúan de manera conjunta y explican por qué la nanofiltración presenta un comportamiento mucho más complejo que la ultrafiltración.

Por ejemplo, un ion calcio (Ca^{2+}) y un ion sodio (Na^{+}) poseen radios iónicos relativamente cercanos; sin embargo, el calcio suele presentar porcentajes de rechazo considerablemente mayores debido a su mayor valencia y a la intensidad de sus interacciones electrostáticas con la membrana.

Con las moléculas orgánicas ocurre algo similar: si dos de ellas pesan casi lo mismo pero tienen distinta polaridad, estructura o afinidad química con la membrana, el rechazo que sufren puede ser diferente.

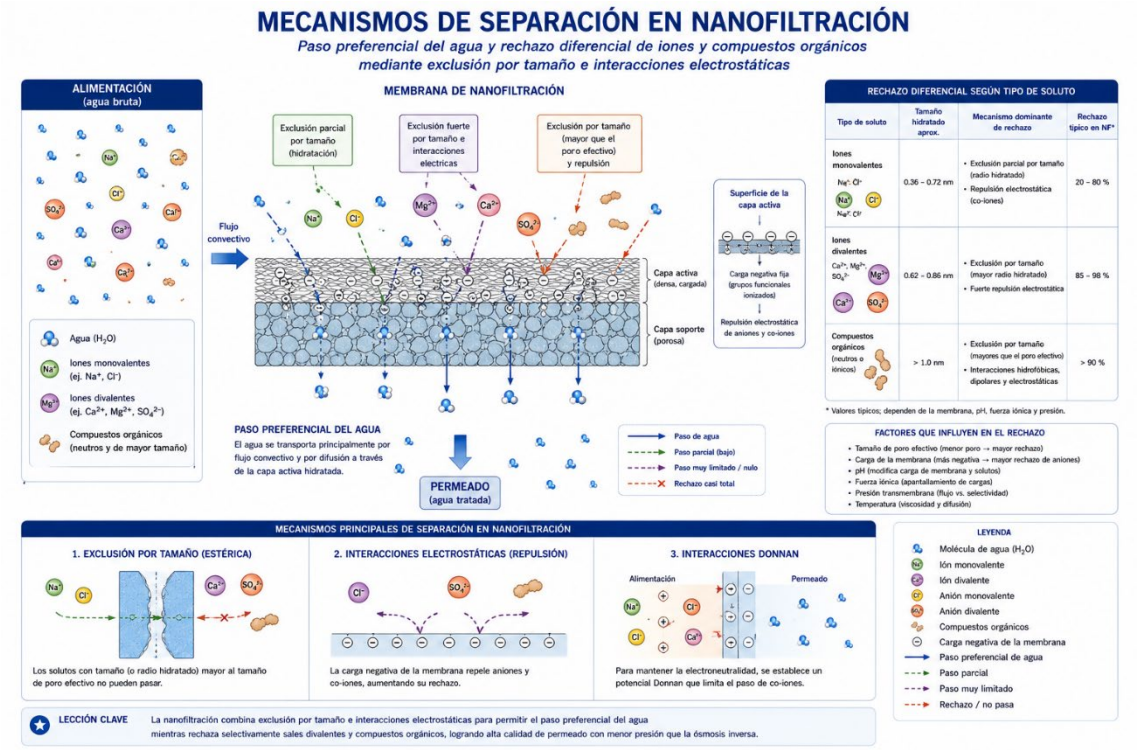
Esta característica convierte a la nanofiltración en una tecnología altamente selectiva y particularmente adecuada para aplicaciones donde no se desea una desmineralización completa del agua.

Quien diseña debe asumir que el tamaño de poro o el MWCO no bastan para anticipar cómo responderá una membrana de nanofiltración. Hay que estudiar la composición química del agua, cómo se distribuyen las especies iónicas y en qué condiciones se opera.

La Figura 6.2 resume los mecanismos fundamentales de separación en nanofiltración, mostrando cómo el agua atraviesa la membrana mientras diferentes especies son retenidas en distinta proporción dependiendo de su tamaño, carga eléctrica y radio hidratado.

Figura 6.2

Mecanismos de separación en nanofiltración, paso del agua y el rechazo de iones y orgánicos por exclusión de tamaño e interacciones electrostáticas.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Schäfer, Fane y Waite (2005) y Strathmann (2011).

Interpretación ingenieril

Una diferencia central entre ultrafiltración y nanofiltración es que esta última no se analiza solo desde la hidráulica. Su diseño incorpora electroquímica, transporte de masa y termodinámica de soluciones. Esa mezcla la convierte en el paso intermedio hacia las membranas densas de ósmosis inversa, y la vuelve uno de los procesos con más usos en la ingeniería del agua actual.

6.2.3 TRANSPORTE DE AGUA Y SOLUTOS

El agua y los solutos pasan por una membrana de nanofiltración mediante un proceso complejo, en el que se combinan diferencias de presión, diferencias de concentración y efectos electrostáticos. Las membranas porosas son las de microfiltración y ultrafiltración. En nanofiltración, en cambio, la capa activa es densa en extremo y las especies químicas se desplazan por difusión y partición molecular.

La ingeniería química interpreta el transporte como la suma de dos procesos que ocurren a la vez. Uno es el desplazamiento del agua, provocado por la presión transmembrana. El otro es la migración de los solutos, condicionada por convección, difusión y fuerzas electrostáticas.

En consecuencia, el agua y los solutos no siguen necesariamente el mismo comportamiento durante el proceso de separación.

La diferencia de presión que se aplica hace que el agua pase de preferencia por la membrana. A iones y moléculas orgánicas, por el contrario, la membrana los rechaza más o menos según su tamaño, su carga y cuánta afinidad tengan con su superficie.

Este comportamiento explica por qué la nanofiltración permite eliminar eficientemente calcio, magnesio y sulfatos, mientras que el rechazo de sodio y cloruros suele ser considerablemente menor.

Flujo de agua

El flujo de agua puede representarse mediante una expresión simplificada derivada de la teoría de solución-difusión.

$$Jw = A\ (\Delta P - \Delta \pi)$$

donde

Jw = flujo de agua

A = permeabilidad hidráulica de la membrana

ΔP = presión transmembrana

$\Delta \pi$ = diferencia de presión osmótica

Según esta ecuación, el flujo de agua responde a la resta entre lo que se aplica de presión y lo que generan en presión osmótica los solutos disueltos.

Interpretación ingenieril

En ultrafiltración la presión osmótica suele ser despreciable.

En nanofiltración comienza a adquirir importancia.

En la ósmosis inversa pasa a ser una de las variables esenciales del diseño.

Por esta razón, la nanofiltración representa una transición natural entre ambas tecnologías.

Transporte de solutos

El transporte de los solutos es considerablemente más complejo.

Los iones pueden atravesar parcialmente la membrana mediante difusión molecular cuando existe un gradiente de concentración suficientemente elevado.

A la vez, el flujo convectivo del agua arrastra una parte de los solutos.

Finalmente, la carga superficial de la membrana ejerce fuerzas de atracción o repulsión que modifican la movilidad de cada especie química.

Como consecuencia, el rechazo final observado experimentalmente corresponde a la combinación de estos tres mecanismos.

Factores que afectan el transporte

Entre las variables más importantes destacan:

- presión transmembrana;
- concentración de alimentación;
- temperatura;
- pH;
- fuerza iónica;
- carga superficial de la membrana;
- velocidad tangencial.

Estas variables serán utilizadas posteriormente durante el dimensionamiento de plantas de nanofiltración.

6.2.4 MEMBRANAS DE NANOFILTRACIÓN

Casi todas las membranas comerciales de nanofiltración tienen la estructura TFC (Thin Film Composite). Reúnen una capa activa finísima que realiza la separación y un soporte microporoso que le da sostén mecánico.

La capa activa suele fabricarse mediante polimerización interfacial utilizando poliamidas aromáticas de alta selectividad.

Su espesor normalmente varía entre **100 y 300 nanómetros**, mientras que el soporte posee un espesor considerablemente mayor para proporcionar resistencia mecánica durante la operación.

Esta configuración permite obtener simultáneamente:

- elevada permeabilidad al agua;
- buen rechazo de sales multivalentes;
- adecuada resistencia mecánica;
- estabilidad química frente a una amplia variedad de soluciones.

Estructura multicapa

Una membrana moderna de nanofiltración está constituida generalmente por tres capas.

Capa activa

Es la responsable del proceso de separación.

Controla el transporte de agua y solutos.

Su espesor es extremadamente pequeño.

Capa intermedia

Actúa como soporte de la capa activa.

Favorece la distribución uniforme del flujo.

Contribuye a la resistencia mecánica.

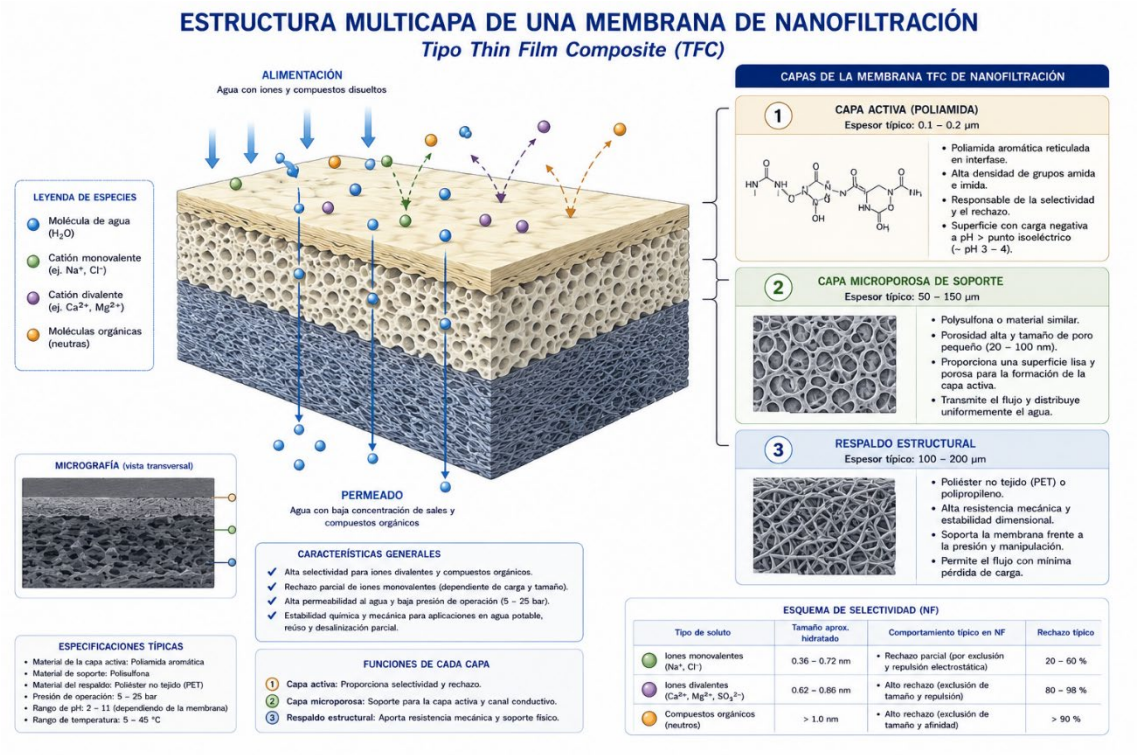
Soporte estructural

Proporciona rigidez al conjunto.

Permite soportar las presiones de operación sin deformaciones importantes.

Figura 6.3

Estructura multicapa de una membrana de nanofiltración tipo Thin Film Composite (TFC), mostrando la capa activa de poliamida, la capa microporosa de soporte y el respaldo estructural.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Schäfer, Fane y Waite (2005).

6.2.5 VARIABLES DE OPERACIÓN

El rendimiento de una membrana de nanofiltración resulta de tres factores a la vez: lo que ella es, la química del agua y las condiciones hidráulicas con que se opera.

Las principales variables de diseño son las siguientes.

Presión transmembrana

La presión constituye la fuerza impulsora del proceso.

El aumento de la presión incrementa inicialmente el flujo de agua.

Pero si los solutos se concentran junto a la membrana, la presión osmótica crece y la ventaja se va reduciendo.

Por eso el diseño debe apuntar a una presión óptima y no a la presión más alta que se pueda aplicar.

Concentración de alimentación

El incremento de la concentración produce dos efectos simultáneos.

Por una parte, aumenta la presión osmótica.

Además, favorece la polarización por concentración y hace avanzar el fouling.

En consecuencia, aguas altamente mineralizadas requieren diseños más conservadores y programas de limpieza más exigentes.

Temperatura

La temperatura altera la viscosidad del agua y la facilidad de movimiento de los iones.

En términos generales:

- aumenta el flujo de agua;
- incrementa la difusión de los solutos;
- modifica el porcentaje de rechazo.

Para comparar ensayos distintos, conviene que el diseño corrija los datos experimentales hasta una temperatura de referencia.

pH

La carga superficial de muchas membranas de nanofiltración depende del pH.

Como consecuencia, pequeñas variaciones del pH pueden modificar significativamente el rechazo de determinados iones.

Este fenómeno adquiere especial importancia durante el tratamiento de aguas con elevada alcalinidad o en procesos industriales donde el pH presenta amplias variaciones.

Fuerza iónica

Si hay sales en alta concentración, se alteran las interacciones electrostáticas entre los iones y la membrana.

En soluciones muy concentradas el efecto de exclusión electrostática se debilita en parte, y algunos solutos se rechazan menos.

Este comportamiento explica por qué los resultados obtenidos con soluciones diluidas no siempre pueden extrapolarse directamente a aplicaciones industriales.

Tabla 6.1

Cómo influyen las variables operacionales principales en el rendimiento de una membrana de nanofiltración

Variable	Influencia principal
Presión transmembrana	Incrementa el flujo de agua hasta un límite condicionado por la presión osmótica

Variable	Influencia principal
Concentración de alimentación	Incrementa la presión osmótica y la polarización por concentración
Temperatura	Aumenta la permeabilidad y modifica el rechazo
pH	Modifica la carga superficial de la membrana
Fuerza iónica	Reduce parcialmente la exclusión electrostática
Velocidad tangencial	Disminuye la polarización por concentración

Nota. Elaboración propia.

Interpretación ingenieril

Mientras que en ultrafiltración las variables hidráulicas dominan el comportamiento del proceso, en nanofiltración las propiedades fisicoquímicas del agua adquieren un papel igualmente importante. Por ello, el diseño de una planta requiere integrar conocimientos de mecánica de fluidos, transporte de masa, equilibrio iónico y electroquímica. Esta integración constituye la base para comprender el siguiente apartado (**6.3 Mecanismos de rechazo**), donde se analizarán con detalle la exclusión por tamaño, el efecto Donnan y la exclusión dieléctrica, fenómenos que diferencian claramente la nanofiltración de todas las tecnologías estudiadas hasta ahora.

6.3 MECANISMOS DE RECHAZO

Lo que distingue a la nanofiltración de los procesos vistos en capítulos previos es el tipo de mecanismo que produce la separación. Microfiltración y ultrafiltración excluyen por tamaño. En nanofiltración se juntan efectos físicos, químicos y electrostáticos, y por su acción las especies del agua se transportan de forma diferenciada.

Como consecuencia, el rechazo observado experimentalmente corresponde a la acción combinada de diversos mecanismos y no puede atribuirse únicamente al diámetro efectivo de la membrana.

Los mecanismos de mayor importancia, desde la ingeniería, son los siguientes:

- exclusión por tamaño (efecto estérico);
- exclusión electrostática (efecto Donnan);
- exclusión dieléctrica;
- transporte convectivo;
- transporte difusivo.

Cuánto contribuye cada uno depende de qué contiene el agua, de la carga de la superficie de la membrana y de cómo se opere.

6.3.1 EXCLUSIÓN POR TAMAÑO (EFECTO ESTÉRICO)

El mecanismo de exclusión por tamaño continúa siendo importante en nanofiltración, aunque ya no constituye el único fenómeno responsable del rechazo.

Cuando un ion hidratado o una molécula tiene un tamaño efectivo mayor que los espacios libres de la capa activa, la membrana le restringe el paso.

Este fenómeno recibe el nombre de **exclusión estérica**.

En términos generales:

- moléculas grandes presentan elevados porcentajes de rechazo;
- moléculas pequeñas atraviesan la membrana con mayor facilidad.

Aun así, a diferencia de lo que ocurre en ultrafiltración, el tamaño geométrico no basta para explicar por completo cómo se comporta el sistema.

Por ejemplo, dos compuestos orgánicos con pesos moleculares semejantes pueden presentar rechazos distintos debido a diferencias en su estructura tridimensional, flexibilidad molecular o polaridad.

Asimismo, los iones disueltos no deben analizarse únicamente mediante su radio iónico, sino considerando su **radio hidratado**, es decir, el tamaño efectivo del ion rodeado por las moléculas de agua que lo acompañan durante el transporte.

Entender este concepto es clave para explicar cómo se comportan las sales en la nanofiltración.

Interpretación ingenieril

En aplicaciones industriales hay que usar el radio hidratado y no el radio iónico, pues es esa magnitud la que de verdad condiciona el paso de los iones por la membrana.

6.3.2 EXCLUSIÓN ELECTROSTÁTICA (EFECTO DONNAN)

La exclusión electrostática constituye el mecanismo que diferencia claramente la nanofiltración de la ultrafiltración.

Numerosas membranas comerciales tienen grupos funcionales ionizables, que se cargan eléctricamente al contacto con el agua.

Según el pH y la química del medio, la membrana puede quedar con carga superficial positiva o negativa.

Cuando un ion de la misma carga se aproxima a la membrana, aparece una fuerza de repulsión electrostática que dificulta su paso.

Por el contrario, los iones de carga opuesta experimentan fuerzas de atracción.

Este comportamiento se conoce como **efecto Donnan** y constituye uno de los principales responsables del elevado rechazo observado para numerosos iones multivalentes.

Como consecuencia:

- los iones divalentes suelen presentar rechazos superiores;
- los iones monovalentes atraviesan con mayor facilidad la membrana.

Por ejemplo:

- calcio (Ca^{2+});
- magnesio (Mg^{2+});
- sulfato (SO_4^{2-})

presentan generalmente porcentajes de rechazo considerablemente mayores que:

- sodio (Na^{+});
- potasio (K^{+});
- cloruro (Cl^{-}).

Esta característica explica el amplio empleo de la nanofiltración para el ablandamiento de aguas.

Fundamento físico

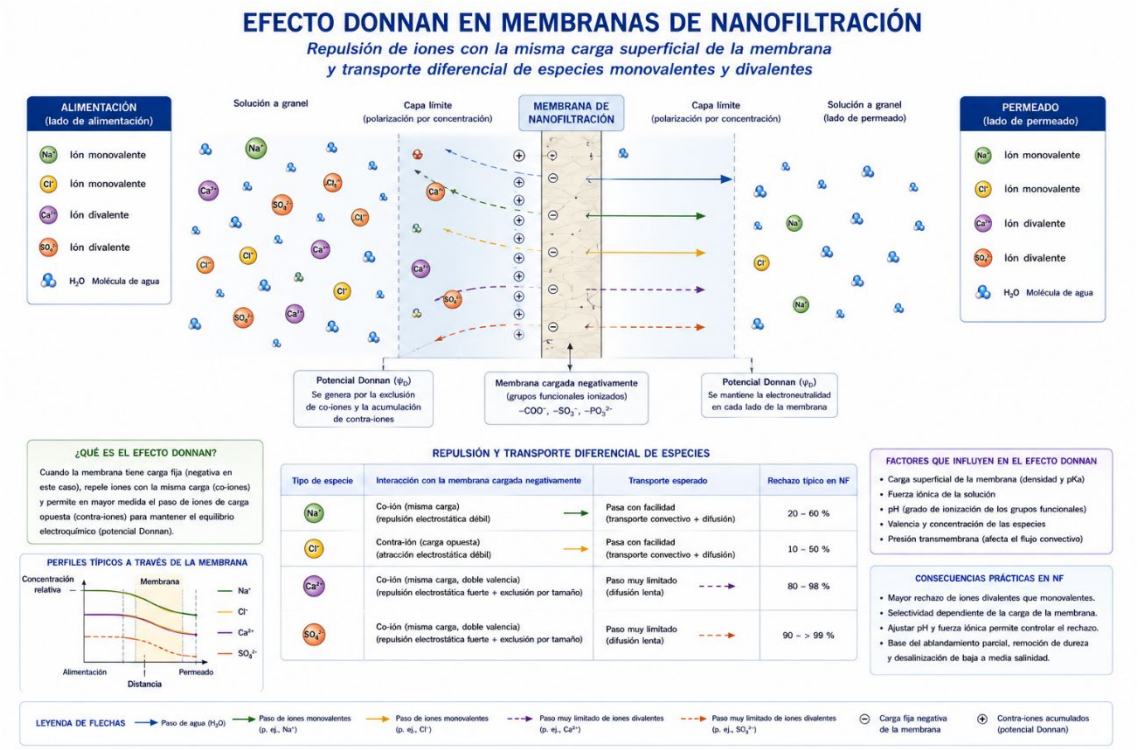
Los iones repartidos a ambos lados de la membrana tienen que cumplir al mismo tiempo el equilibrio químico y la electroneutralidad.

Por eso, las cargas fijas de la membrana cambian las concentraciones de equilibrio de cada ion.

Este fenómeno no existe en microfiltración y tiene una importancia limitada en ultrafiltración.

Figura 6.4

Esquema del efecto Donnan en una membrana NF: se repelen los iones del mismo signo que la carga superficial, y los iones monovalentes y divalentes se transportan de modo distinto.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Schäfer, Fane y Waite (2005) y Strathmann (2011).

Interpretación ingenieril

El efecto Donnan explica por qué la nanofiltración elimina eficientemente la dureza sin producir una desmineralización completa del agua.

Eso es una ventaja de peso respecto a la ósmosis inversa cuando conviene mantener algo de la mineralización natural.

6.3.3 EXCLUSIÓN DIELÉCTRICA

Además de los efectos estéricos y electrostáticos, la nanofiltración presenta un tercer mecanismo de separación conocido como **exclusión dieléctrica**.

El origen está en la diferencia entre las constantes dieléctricas del agua y de la membrana.

Un ion que trata de ingresar en la capa activa experimenta un cambio de energía, pues pasa de un medio a otro.

En determinadas condiciones, esta variación energética dificulta el ingreso de algunos iones, incrementando el rechazo observado experimentalmente.

Aunque este mecanismo resulta más difícil de visualizar que la exclusión por tamaño, numerosos estudios han demostrado su importancia durante la separación de soluciones concentradas.

En aplicaciones industriales suele actuar simultáneamente con el efecto Donnan.

Interpretación ingenieril

Casi nunca se calcula este mecanismo de manera explícita en el diseño de ingeniería conceptual.

No obstante, sus efectos ya vienen en los datos experimentales de los fabricantes y en los ensayos piloto previos al diseño definitivo.

6.3.4 TRANSPORTE CONVECTIVO Y DIFUSIVO

El rechazo final de una membrana también depende del equilibrio entre los mecanismos de transporte.

El movimiento del agua impulsa a los solutos hacia la membrana mediante transporte convectivo.

Al mismo tiempo, el gradiente de concentración genera un transporte difusivo en sentido contrario.

De cómo interactúen ambos procesos resulta la concentración de solutos en la superficie, y de ella depende cuán intensa sea la polarización por concentración.

Este fenómeno adquiere mayor importancia cuando aumenta la recuperación del sistema o cuando la solución presenta elevadas concentraciones salinas.

Quien diseña debe controlar la presión transmembrana y la velocidad tangencial, con el fin de limitar que los solutos se acumulen sobre la membrana.

Tabla 6.2

Comparación de los mecanismos de rechazo en nanofiltración

Mecanismo	Variable predominante	Solutos principalmente afectados
Exclusión por tamaño	Radio hidratado	Moléculas orgánicas y macromoléculas pequeñas
Exclusión electrostática	Carga eléctrica	Iones mono y divalentes
Exclusión dieléctrica	Energía de hidratación	Iones en soluciones concentradas
Transporte convectivo	Presión transmembrana	Agua y solutos parcialmente retenidos

Mecanismo	Variable predominante	Solutos principalmente afectados
Transporte difusivo	Gradiente de concentración	Solutos disueltos

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

La nanofiltración constituye el primer proceso de membranas donde la composición química del agua adquiere una importancia equivalente a la hidráulica del sistema. El ingeniero ya no puede seleccionar una membrana únicamente por su permeabilidad o por su área efectiva; debe comprender cómo interactúan el tamaño molecular, el radio hidratado, la carga eléctrica y las condiciones de operación para predecir el comportamiento del proceso. Esta visión integrada será indispensable en el siguiente capítulo dedicado a la **ósmosis inversa**, donde la presión osmótica y la termodinámica de soluciones dominarán el diseño de las instalaciones.

6.4 MODELOS DE TRANSPORTE Y RECHAZO EN NANOFILTRACIÓN

El diseño de sistemas de nanofiltración requiere modelos que predigan a la vez el flujo de agua y el rechazo de cada soluto. En microfiltración y ultrafiltración la Ley de Darcy describe bien el comportamiento. En nanofiltración hay que añadir la presión osmótica, las interacciones electrostáticas y la difusión molecular.

Ningún modelo reproduce con exactitud absoluta todo lo que ocurre cuando el agua transita por la membrana. Por eso se usan modelos simples en la etapa conceptual, y las simulaciones más sofisticadas se dejan para el detalle del proyecto o para investigar.

Los modelos más utilizados son:

- modelo de solución-difusión;
- modelo de solución-difusión con exclusión estérica;
- modelo de Nernst-Planck extendido;
- modelo de espacio de carga (Space Charge Model, DSPM);
- modelos empíricos basados en pruebas piloto.

Cada uno presenta ventajas y limitaciones dependiendo del grado de detalle requerido.

6.4.1 MODELO DE SOLUCIÓN-DIFUSIÓN

El modelo de solución-difusión es la base conceptual con la que se describe el transporte en membranas densas.

Este modelo supone que el proceso ocurre en tres etapas sucesivas:

- disolución del soluto en la superficie de la membrana;
- difusión a través de la capa activa;
- desorción hacia el lado del permeado.

Agua y solutos cruzan la membrana cada uno por su cuenta, a la velocidad de difusión que le corresponde.

Este comportamiento explica por qué distintas especies químicas presentan porcentajes de rechazo diferentes aun cuando poseen tamaños moleculares similares.

Flujo de agua

El flujo de agua puede expresarse mediante:

$$Jw = A\,(\Delta P - \Delta\pi)$$

donde

Jw = flujo de agua ($L/m^2 \cdot h$ o m/s)

A = coeficiente de permeabilidad hidráulica

ΔP = presión transmembrana

$\Delta\pi$ = diferencia de presión osmótica

Esta ecuación muestra que la presión osmótica actúa en sentido opuesto a la presión aplicada.

Conforme crece la concentración salina, sube la presión osmótica y el flujo neto de agua baja.

Flujo de solutos

El flujo de un soluto puede representarse mediante:

$$Js = B\,(Cf - Cp)$$

donde

Js = flujo del soluto

B = coeficiente de permeabilidad del soluto

Cf = concentración en la alimentación

Cp = concentración en el permeado

Con este modelo se entiende fácilmente cómo se comportan, en general, las membranas de nanofiltración y de ósmosis inversa.

Interpretación ingenieril

El coeficiente **A** representa la facilidad con la que el agua atraviesa la membrana, mientras que el coeficiente **B** expresa la facilidad con la que lo hacen los solutos. Una membrana de alta calidad presenta un valor elevado de **A** y un valor reducido de **B**, permitiendo obtener altos caudales de agua con un elevado rechazo de contaminantes.

6.4.2 POLARIZACIÓN POR CONCENTRACIÓN

Como los solutos se rechazan en forma parcial, durante la operación se amontonan junto a la superficie de la membrana.

Así, junto a la membrana la concentración resulta mayor que la del seno de la corriente.

Este fenómeno recibe el nombre de **polarización por concentración**.

Aunque al comienzo es reversible, la polarización facilita el fouling y sube la presión osmótica local, con lo que el flujo de permeado cae poco a poco.

La concentración superficial puede expresarse mediante:

$$Cm = Cb \times \exp (Jw / k)$$

donde

Cm = concentración en la superficie de la membrana

Cb = concentración en la corriente principal

Jw = flujo de agua

k = coeficiente de transferencia de masa

La ecuación pone en evidencia que la polarización depende tanto del flujo de permeado como de qué tan intenso sea el transporte de masa.

Interpretación ingenieril

El incremento de la velocidad tangencial aumenta el coeficiente de transferencia de masa (**k**) y disminuye la polarización por concentración. Por esta razón, las plantas de nanofiltración se diseñan procurando mantener velocidades suficientes para limitar la acumulación de solutos sobre la superficie de la membrana.

6.4.3 RECHAZO DE SOLUTOS

Lo habitual es expresar con un porcentaje de rechazo el rendimiento de la membrana.

La ecuación utilizada es:

$$R\ (\%) = [(Cf - Cp) / Cf] \times 100$$

donde

R = rechazo porcentual

Cf = concentración de alimentación

Cp = concentración del permeado

Es uno de los parámetros que más pesan cuando se eligen membranas comerciales.

Debe recordarse que el rechazo depende de:

- presión de operación;
- temperatura;
- composición química del agua;
- recuperación del sistema;
- tipo de ion;
- pH.

Por eso, los valores de los fabricantes se deben leer teniendo presentes las condiciones específicas en que se determinaron.

6.4.4 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

La permeabilidad representa la capacidad de una membrana para transportar agua.

Puede calcularse mediante:

$$A = Jw / (\Delta P - \Delta \pi)$$

donde

A = permeabilidad hidráulica

Jw = flujo de agua

ΔP = presión transmembrana

$\Delta \pi$ = presión osmótica

Como indicador del estado de la membrana en operación, la permeabilidad es muy útil.

Una disminución progresiva de este parámetro suele indicar el desarrollo de fouling o incrustaciones.

Tabla 6.3

Principales ecuaciones utilizadas en el modelado de la nanofiltración

Parámetro	Expresión
Flujo de agua	$Jw = A\ (\Delta P - \Delta\pi)$
Flujo de solutos	$Js = B\ (Cf - Cp)$
Rechazo	$R = [(Cf - Cp) / Cf] \times 100$
Polarización por concentración	$Cm = Cb \times \exp\ (Jw / k)$
Permeabilidad	$A = Jw / (\Delta P - \Delta\pi)$

Nota. Elaboración propia.

6.4.5 LIMITACIONES DE LOS MODELOS SIMPLIFICADOS

Aunque los modelos anteriores describen adecuadamente el comportamiento general de una membrana de nanofiltración, presentan algunas limitaciones importantes.

Entre ellas destacan:

- no describen explícitamente la estructura nanométrica de la membrana;
- simplifican las interacciones entre diferentes especies iónicas;
- no consideran completamente los efectos de la fuerza iónica;
- requieren parámetros experimentales para cada tipo de membrana;
- presentan menor precisión en soluciones altamente concentradas.

Por tal motivo, al investigar y crear membranas nuevas se aplican modelos más sofisticados: el de Nernst-Planck extendido y el de espacio de carga, llamado Donnan Steric Pore Model (DSPM). Ambos incluyen a la vez la difusión, la convección, la migración eléctrica y la exclusión estérica.

Reflexión ingenieril

En la práctica profesional, el éxito del diseño no depende de utilizar el modelo matemático más complejo, sino de seleccionar el nivel de modelado adecuado para cada etapa del proyecto. Durante la ingeniería conceptual suelen emplearse modelos simplificados complementados con pruebas piloto, mientras que la ingeniería de detalle puede requerir simulaciones más sofisticadas para optimizar el desempeño hidráulico y la selectividad de la membrana. Esta filosofía permite obtener diseños técnicamente

confiables sin introducir una complejidad innecesaria en las etapas preliminares del proyecto.

6.5 MATERIALES Y CONFIGURACIONES DE MEMBRANAS DE NANOFILTRACIÓN

Al proyectar un sistema de nanofiltración, pocas decisiones pesan tanto como el material de la membrana. De su naturaleza química y estructural dependen la permeabilidad al agua, la selectividad, la tendencia al fouling, la resistencia mecánica y la estabilidad química.

Hoy casi todas las membranas comerciales para agua se fabrican como película delgada compuesta, o TFC (Thin Film Composite). Han ido reemplazando a las asimétricas de antes porque permean más, retienen mejor las sales y duran más estables en operación.

Para la ingeniería, el material no solo tiene que cumplir con la separación. También debe responder a cómo se operará, a la química del agua, a los procedimientos de limpieza y a los años de servicio que se esperan del sistema.

6.5.1 MATERIALES UTILIZADOS EN MEMBRANAS DE NANOFILTRACIÓN

Los materiales empleados actualmente pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- membranas poliméricas;
- membranas cerámicas;
- membranas compuestas de nueva generación.

Cada grupo presenta ventajas y limitaciones que condicionan su aplicación industrial.

Membranas poliméricas

El mercado mundial de nanofiltración es en más del noventa por ciento de membranas poliméricas, que equilibran bien permeabilidad, selectividad y costo.

Los materiales más utilizados son:

- poliamida aromática;
- polisulfona;
- polietersulfona;

- poliacrilonitrilo;
- acetato de celulosa, en aplicaciones específicas.

Entre ellos, la poliamida aromática es el material que más se usa para la capa activa, por su alta capacidad de rechazo y su buena permeabilidad.

Las membranas basadas en poliamida presentan generalmente:

- elevado rechazo de sales divalentes;
- buena permeabilidad al agua;
- alta resistencia mecánica;
- amplio rango de aplicaciones.

Su principal limitación corresponde a la sensibilidad frente a agentes oxidantes, especialmente al cloro libre, por lo que deben respetarse estrictamente las recomendaciones del fabricante durante la operación y la limpieza.

Membranas cerámicas

Las membranas cerámicas poseen una elevada resistencia térmica, química y mecánica.

Normalmente se fabrican utilizando materiales como:

- alúmina;
- zirconia;
- dióxido de titanio;
- carburo de silicio.

Aunque su aplicación en nanofiltración es todavía más limitada que en microfiltración o ultrafiltración, presentan ventajas importantes cuando el proceso involucra:

- altas temperaturas;
- solventes orgánicos;
- medios altamente corrosivos;
- limpiezas químicas agresivas.

Su principal inconveniente continúa siendo el elevado costo de fabricación.

Membranas de nueva generación

En los últimos años se han creado materiales nuevos con el fin de elevar la permeabilidad y reducir el fouling.

Entre ellos destacan:

- membranas modificadas con nanopartículas;
- membranas híbridas polímero-cerámica;
- membranas con óxido de grafeno;
- membranas reforzadas con nanotubos de carbono;
- membranas biomiméticas con acuaporinas.

Varias de estas tecnologías todavía están en etapa de desarrollo o se aplican poco. Aun así, figuran entre las líneas de investigación más promisorias en tratamiento avanzado de agua.

Tabla 6.4

Comparación de los principales materiales utilizados en nanofiltración

Material	Ventajas	Limitaciones
Poliamida	Alto rechazo y elevada permeabilidad	Sensible al cloro libre
Polisulfona	Buena resistencia mecánica	Menor selectividad
Polietersulfona	Buena estabilidad química	Requiere capa activa adicional
Cerámica	Excelente resistencia térmica y química	Alto costo
Materiales híbridos	Alta selectividad y menor fouling	Tecnología emergente

Nota. Elaboración propia.

6.5.2 MEMBRANAS DE PELÍCULA DELGADA (THIN FILM COMPOSITE)

Las membranas de película delgada constituyen actualmente el estándar tecnológico de la nanofiltración industrial.

Su estructura está formada por tres capas funcionales.

La primera corresponde a una capa activa de poliamida extremadamente delgada donde ocurre el proceso de separación.

La segunda es una capa microporosa de polisulfona que proporciona soporte estructural.

Por último, un tejido de poliéster sin trama aporta resistencia mecánica y estabilidad dimensional.

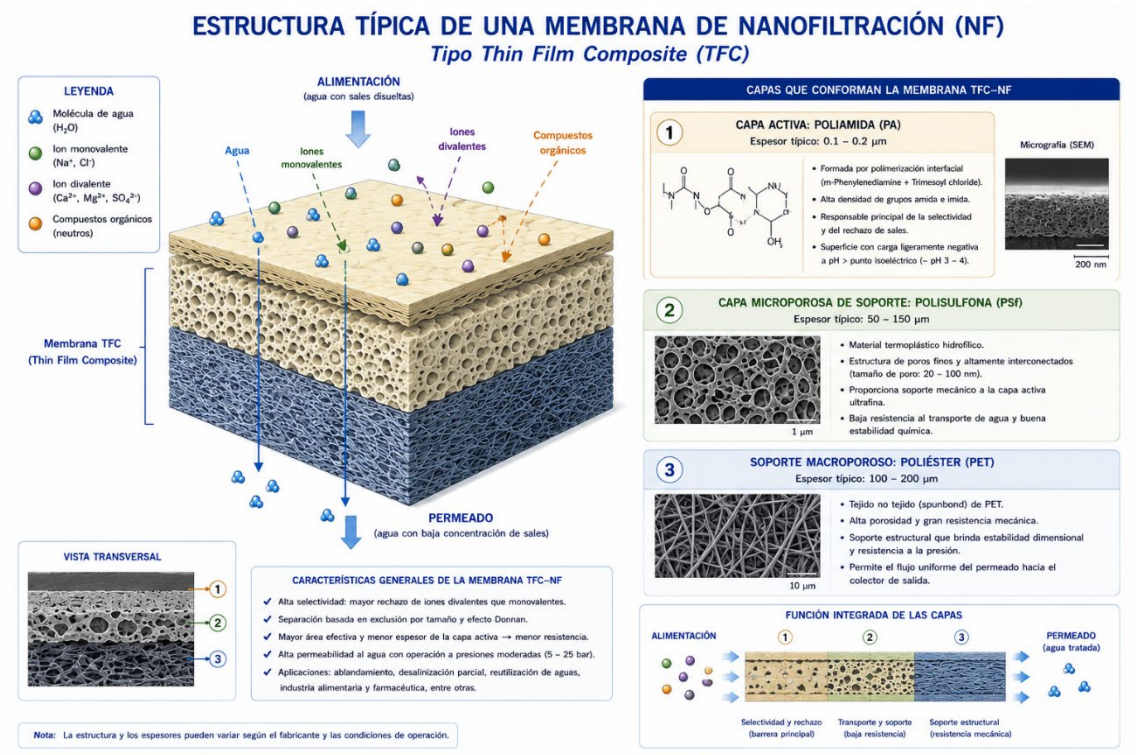
Esta configuración permite combinar:

- elevada permeabilidad;
- excelente rechazo de sales;
- buena resistencia mecánica;
- bajo espesor hidráulico.

La capa activa es donde en la práctica se produce la separación, y mide entre cien y trescientos nanómetros de espesor.

Figura 6.5

Estructura característica de una membrana de nanofiltración Thin Film Composite (TFC), con capa activa de poliamida, capa microporosa de polisulfona y soporte de poliéster.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Schäfer, Fane y Waite (2005).

6.5.3 CONFIGURACIONES COMERCIALES DE MEMBRANAS

Además de definir el material, hay que escoger la forma física de la membrana.

Las configuraciones disponibles son:

- espiral enrollada (Spiral Wound);
- fibra hueca;

- tubular;
- placas y marcos.

Cada una responde a necesidades específicas de operación.

Módulos espiral enrollada

La configuración espiral enrollada constituye la más utilizada en nanofiltración.

Las membranas planas se enrollan en torno a un tubo colector de permeado y forman un módulo compacto, con una gran relación entre el área de membrana y el volumen que ocupa.

Sus principales ventajas son:

- elevada densidad de empaquetamiento;
- reducido costo;
- amplia disponibilidad comercial;
- facilidad de reemplazo.

Como limitación, requieren un pretratamiento adecuado debido a su mayor sensibilidad frente al fouling.

Módulos de fibra hueca

Los módulos de fibra hueca ofrecen una elevada superficie específica y permiten construir equipos compactos.

Aun así, en nanofiltración se emplea menos que en ultrafiltración, porque las presiones de operación son mayores.

Módulos tubulares

Los módulos tubulares presentan canales de mayor diámetro que facilitan el tratamiento de corrientes con elevada carga de sólidos.

Se utilizan principalmente cuando el riesgo de obstrucción resulta elevado.

Su mayor desventaja es doble: ofrecen menos área de membrana por cada unidad de volumen y gastan más energía, debido a las velocidades de circulación que requieren.

Módulos de placas y marcos

Estas configuraciones permiten un acceso sencillo para inspección y limpieza, siendo utilizadas principalmente en procesos industriales específicos y en instalaciones piloto.

Tabla 6.5

Comparación de las configuraciones de membranas de nanofiltración

Configuración	Ventajas	Aplicaciones principales
Espiral enrollada	Alta densidad de empaquetamiento	Agua potable, agua industrial, desalación parcial
Fibra hueca	Gran superficie específica	Aplicaciones especiales
Tubular	Alta resistencia al fouling	Efluentes industriales
Placas y marcos	Fácil mantenimiento	Plantas piloto y procesos especiales

Nota. Elaboración propia.

6.5.4 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA MEMBRANA

Al elegir una membrana hay que ponderar a la vez los aspectos siguientes:

- composición química del agua;
- concentración de sales;
- dureza;
- presencia de materia orgánica;
- temperatura de operación;
- rango de pH;
- compatibilidad química con los reactivos de limpieza;
- presión de operación;
- recuperación prevista;
- vida útil esperada;
- costo del ciclo de vida.

En ingeniería no hay una membrana mejor en todos los casos. Conviene la que a la vez cumpla las exigencias técnicas, económicas y ambientales del proyecto.

6.5.5 TENDENCIAS EN EL DESARROLLO DE MEMBRANAS

La investigación actual busca desarrollar membranas capaces de incrementar simultáneamente la permeabilidad y la selectividad, reduciendo el consumo energético y la susceptibilidad al fouling.

Las principales líneas de desarrollo incluyen:

- modificación superficial para aumentar la hidrofilicidad;
- incorporación de nanopartículas antimicrobianas;
- membranas biomiméticas inspiradas en acuaporinas;
- materiales bidimensionales como el óxido de grafeno;
- membranas inteligentes capaces de responder a cambios de pH, temperatura o fuerza iónica.

Estas innovaciones buscan mejorar el desempeño sin incrementar significativamente los costos de fabricación.

Reflexión ingenieril

Los avances en materiales han impulsado de forma notoria la nanofiltración. Con todo, la experiencia indica que una planta funciona bien si se elige correctamente el material y además se lo integra al diseño hidráulico, al pretratamiento y a la estrategia de operación. Aun la membrana más moderna rinde por debajo de su capacidad si la hidráulica es inadecuada o si el fouling no se controla bien.

6.6 MODELADO HIDRÁULICO DE SISTEMAS DE NANOFILTRACIÓN

La herramienta esencial para diseñar plantas de nanofiltración es el modelado hidráulico. Sirve para hallar las condiciones de operación con las que se logra la producción deseada gastando la menor energía posible, conservando altos porcentajes de rechazo y estabilidad a lo largo de la vida útil de la planta.

En términos generales, el diseño hidráulico busca responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué presión de operación debe utilizarse?
- ¿Cuál será el flujo de permeado?
- ¿Qué área de membranas será necesaria?
- ¿Cuántos módulos deberán instalarse?
- ¿Cuál será la recuperación óptima?
- ¿Qué potencia de bombeo se requiere?
- ¿Cuál será el consumo específico de energía?

Responder adecuadamente estas preguntas exige integrar conceptos de mecánica de fluidos, transferencia de masa y termodinámica de soluciones.

6.6.1 PRESIÓN TRANSMEMBRANA EFECTIVA

La presión aplicada en nanofiltración no se traduce íntegra en fuerza impulsora del agua. Parte se consume en contrarrestar la presión osmótica que generan las sales disueltas.

La fuerza impulsora efectiva puede expresarse mediante:

$$\Delta Pe = \Delta P - \Delta \pi$$

donde

ΔPe = presión efectiva de filtración

ΔP = presión transmembrana aplicada

$\Delta \pi$ = diferencia de presión osmótica

De la ecuación se desprende que, si la concentración salina aumenta, también lo hace la presión osmótica, y queda menos presión para empujar el flujo de agua.

Interpretación ingenieril

Este fenómeno explica por qué dos plantas operando a la misma presión pueden producir caudales muy diferentes cuando tratan aguas con distinta salinidad.

6.6.2 FLUJO DE PERMEADO

El flujo de agua se calcula mediante la expresión:

$$J = A\,(\Delta P - \Delta \pi)$$

donde

J = flujo de permeado

A = permeabilidad hidráulica

ΔP = presión aplicada

$\Delta \pi$ = presión osmótica

Esta ecuación es la base sobre la cual se dimensionan hidráulicamente las plantas de nanofiltración.

Puede observarse que:

- el flujo aumenta cuando aumenta la presión aplicada;
- el flujo disminuye cuando aumenta la presión osmótica;

- el fouling reduce progresivamente la permeabilidad hidráulica.

En consecuencia, durante el diseño debe incorporarse un margen de seguridad que permita mantener la producción aun cuando la membrana experimente un deterioro gradual.

6.6.3 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN OSMÓTICA

La presión osmótica depende directamente de la concentración de solutos disueltos.

Conforme el agua pasa a través de la membrana, los solutos se quedan atrás y aumenta su concentración en la superficie.

Este fenómeno produce:

- incremento de la presión osmótica local;
- disminución del flujo;
- aumento de la polarización por concentración;
- mayor probabilidad de incrustaciones.

Por ello, durante el diseño debe evitarse trabajar con recuperaciones excesivamente elevadas.

Interpretación ingenieril

Mientras que en ultrafiltración el diseñador se preocupa principalmente por controlar el fouling, en nanofiltración debe controlar simultáneamente el fouling y el incremento de la presión osmótica.

6.6.4 CÁLCULO DEL ÁREA DE MEMBRANAS

Con el flujo de diseño ya definido, el área de membranas necesaria se calcula así:

$$A = Qp / J$$

Donde

$$A = \text{área efectiva de membranas } (m^2)$$

$$Qp = \text{caudal de permeado } (m^3/h)$$

$$J = \text{flujo de diseño } (m^3/m^2 \cdot h)$$

Este cálculo proporciona el área mínima necesaria para satisfacer la producción especificada.

No obstante, en la ingeniería conceptual conviene sumar un factor de seguridad de entre 10 % y 25 %, que se elige según:

- calidad del agua;
- incertidumbre del proyecto;
- variabilidad estacional;
- frecuencia prevista de limpieza.

Ejemplo conceptual

Producción requerida:

$$Qp = 150\ m^3/h$$

Flujo de diseño:

$$J = 20\ L/m^2 \cdot h$$

$$J = 0{,}020\ m^3/m^2 \cdot h$$

Entonces:

$$A = 150 / 0{,}020$$

$$A = 7500\ m^2$$

Considerando un factor de seguridad del 15 %:

```
Área instalada
=7500 ×1,15
=8625 m²
```

Este valor será utilizado posteriormente para determinar el número de módulos.

6.6.5 SELECCIÓN DEL NÚMERO DE MÓDULOS

El número de módulos depende del área efectiva instalada y del área útil proporcionada por cada elemento comercial.

La ecuación utilizada es:

$$Nm = A / Am$$

donde

$$Nm = \text{número de módulos}$$

$$A = \text{área total instalada}$$

$$Am = \text{área efectiva por módulo}$$

El resultado siempre debe aproximarse al entero superior.

En proyectos industriales se recomienda incorporar módulos adicionales de reserva para facilitar las actividades de mantenimiento.

6.6.6 RECUPERACIÓN DEL SISTEMA

La recuperación representa la fracción del agua alimentada que se transforma en permeado.

Se calcula mediante:

```
Recuperación = Qp / Qa
```

donde

Qp = caudal de permeado

Qa = caudal de alimentación

A diferencia de la ultrafiltración, en nanofiltración la recuperación ejerce una influencia mucho mayor sobre:

- presión osmótica;
- polarización por concentración;
- incrustaciones;
- consumo energético.

Si se exige demasiada recuperación, pueden precipitar el carbonato de calcio, el sulfato de calcio, la sílice y otras sales de escasa solubilidad.

Por ello, el valor óptimo debe establecerse mediante simulaciones o pruebas piloto.

6.6.7 BALANCE HIDRÁULICO

El balance hidráulico del sistema mantiene la misma estructura general utilizada en ultrafiltración.

$$Qa = Qp + Qc$$

donde

Qa = caudal de alimentación

Qp = caudal de permeado

Qc = caudal de concentrado

Este balance constituye la base para el dimensionamiento de:

- bombas;

- colectores;
- válvulas;
- tuberías;
- tanques de almacenamiento.

Tabla 6.6

Variables fundamentales para el diseño hidráulico de plantas de nanofiltración

Variable	Influencia sobre el diseño
Presión transmembrana	Determina la fuerza impulsora del proceso
Presión osmótica	Reduce la presión efectiva disponible
Flujo de permeado	Define la productividad del sistema
Área de membranas	Determina el número de módulos
Recuperación	Influye sobre la concentración de sales y el consumo de agua
Caudal de concentrado	Condiciona el balance hidráulico
Temperatura	Modifica la permeabilidad y la viscosidad
Polarización por concentración	Influye sobre el fouling y el rechazo

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

El diseño hidráulico de una planta de nanofiltración representa un cambio conceptual respecto a la ultrafiltración. La presión aplicada deja de ser el único parámetro determinante y debe analizarse conjuntamente con la presión osmótica, la composición química del agua y el rechazo de los diferentes solutos. El ingeniero debe buscar un equilibrio entre productividad, selectividad, consumo energético y estabilidad operacional, evitando condiciones que favorezcan la polarización por concentración o la precipitación de sales. Este enfoque integral constituye la base del diseño moderno de sistemas de nanofiltración y será aún más relevante en el capítulo dedicado a la ósmosis inversa, donde la presión osmótica dominará completamente el comportamiento del proceso.

6.7 FOULING E INCRUSTACIONES EN NANOFILTRACIÓN

Al fouling se debe la principal limitación operacional de la nanofiltración. Es una de las razones por las que el consumo de energía aumenta, el flujo de permeado disminuye y las membranas duran menos.

A diferencia de la ultrafiltración, donde predominan los depósitos de naturaleza coloidal y biológica, en nanofiltración adquieren especial importancia las incrustaciones

minerales (**scaling**), debido al aumento progresivo de la concentración de sales sobre la superficie de la membrana.

Como los solutos se rechazan solo en parte, la concentración de ciertas especies químicas puede pasar su límite de solubilidad; entonces precipitan sales poco solubles y se forman depósitos compactos, difíciles de quitar.

En la práctica industrial, el fouling raramente corresponde a un único mecanismo. Lo más frecuente es que coexistan simultáneamente depósitos orgánicos, incrustaciones minerales, biofouling y acumulación de partículas coloidales, cada uno con diferente influencia sobre el desempeño del sistema.

6.7.1 CLASIFICACIÓN DEL FOULING EN NANOFILTRACIÓN

En la operación, el fouling se clasifica en cuatro categorías principales:

- fouling orgánico;
- incrustaciones minerales (scaling);
- biofouling;
- fouling coloidal.

Cada uno presenta mecanismos de formación, velocidad de desarrollo y estrategias de control diferentes.

Fouling orgánico

El fouling orgánico se origina cuando compuestos orgánicos quedan adsorbidos en la superficie de la membrana.

Los principales responsables son:

- ácidos húmicos;
- ácidos fúlvicos;
- proteínas;
- polisacáridos;
- compuestos orgánicos naturales (Natural Organic Matter, NOM);
- aceites y grasas.

Estos materiales forman una película superficial que incrementa la resistencia hidráulica y favorece la acumulación de otros contaminantes.

En aguas superficiales, el fouling orgánico suele desarrollarse simultáneamente con el fouling biológico.

Scaling o incrustaciones minerales

El scaling constituye el mecanismo más característico de la nanofiltración.

Sucede cuando ciertos iones alcanzan una concentración mayor que su producto de solubilidad, y las sales empiezan a precipitar en la superficie de la membrana.

Las incrustaciones más frecuentes corresponden a:

- carbonato de calcio ($CaCO_3$);
- sulfato de calcio ($CaSO_4$);
- sulfato de bario ($BaSO_4$);
- sulfato de estroncio ($SrSO_4$);
- sílice (SiO_2);
- hidróxido férrico [$Fe(OH)_3$].

La velocidad de formación depende de:

- recuperación del sistema;
- temperatura;
- pH;
- fuerza iónica;
- concentración de calcio;
- concentración de sulfatos;
- concentración de bicarbonatos.

Para el diseño, el scaling es el factor que más limita la recuperación máxima que se puede alcanzar.

Biofouling

El biofouling es el desarrollo de microorganismos adheridos a la superficie de la membrana.

Las bacterias inicialmente se adhieren formando una monocapa.

Posteriormente producen sustancias poliméricas extracelulares (EPS), generando una biopelícula altamente resistente.

Esta biopelícula:

- incrementa la pérdida de carga;
- reduce el flujo de permeado;
- dificulta la limpieza química;
- favorece la acumulación de partículas minerales.

Con frecuencia, en las instalaciones, el biofouling abre paso a otros tipos de fouling.

Fouling coloidal

Las partículas coloidales presentan tamaños suficientemente pequeños para permanecer suspendidas durante largos periodos.

Entre ellas destacan:

- arcillas;
- sílice coloidal;
- óxidos metálicos;
- hidróxidos de aluminio;
- coloides orgánicos.

Estas partículas forman depósitos relativamente compactos que incrementan progresivamente la resistencia hidráulica.

Tabla 6.7

Clasificación de los mecanismos de fouling en nanofiltración

Tipo de fouling	Origen principal	Consecuencia predominante	Estrategia de control
Orgánico	Materia orgánica natural	Disminución del flujo	Limpieza alcalina
Scaling	Sales poco solubles	Incrustaciones minerales	Control químico y antiincrustantes
Biológico	Microorganismos	Formación de biopelículas	Desinfección y limpieza química
Coloidal	Arcillas, sílice y óxidos	Obstrucción superficial	Optimización del pretratamiento

Nota. Elaboración propia.

6.7.2 FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES MINERALES

Cuando una sal supera su límite de saturación, empieza a formarse scaling.

Inicialmente se produce un estado de sobresaturación.

Posteriormente aparecen pequeños núcleos cristalinos.

Finalmente los cristales siguen creciendo hasta quedar pegados a la membrana.

Este proceso comprende cuatro etapas principales:

- sobresaturación;
- nucleación;
- crecimiento cristalino;
- deposición sobre la membrana.

Cada etapa avanza a una velocidad que obedece a la química del agua y a las condiciones hidráulicas del sistema.

Interpretación ingenieril

El diseñador no debe esperar a que aparezcan incrustaciones para intervenir. El objetivo consiste en evitar que la solución alcance condiciones de sobresaturación mediante una adecuada selección de la recuperación, el uso de antiincrustantes y el control del pH.

6.7.3 ÍNDICES DE INCRUSTACIÓN

En la ingeniería conceptual es indispensable valorar el riesgo de que las sales precipiten.

Entre los índices más utilizados destacan:

- Índice de Saturación de Langelier (LSI);
- Índice de Estabilidad de Ryznar (RSI);
- Índice de Saturación de Stiff-Davis (S&DSI);
- Saturation Index para sulfato de calcio;
- Saturation Index para sílice.

Estos índices ayudan a prever si el agua tenderá a formar depósitos antes de establecer la recuperación máxima del diseño.

Índice de Saturación de Langelier

El Índice de Saturación de Langelier puede expresarse mediante:

$$LSI = pH - pHs$$

donde:

LSI = índice de saturación de Langelier

pH = pH medido del agua

pHs = pH de saturación del carbonato de calcio

La interpretación general es:

- LSI > 0: tendencia a formar incrustaciones.
- LSI = 0: equilibrio químico.
- LSI < 0: tendencia a disolver carbonato de calcio.

Aunque originalmente fue desarrollado para sistemas de distribución de agua, continúa siendo ampliamente utilizado como herramienta preliminar para evaluar el riesgo de incrustación.

6.7.4 FACTORES QUE FAVORECEN EL SCALING

Diversos factores incrementan la probabilidad de formación de incrustaciones.

Entre los más importantes destacan:

Elevada recuperación

Cuando la recuperación sube, el volumen de concentrado se reduce y las sales quedan más concentradas.

Altas concentraciones de calcio y bicarbonatos

Favorecen la precipitación de carbonato de calcio.

Altas concentraciones de sulfatos

Incrementan el riesgo de precipitación de sulfato de calcio, bario y estroncio.

Incremento del pH

Facilita que se forme carbonato de calcio, porque desplaza el equilibrio carbonato-bicarbonato.

Temperatura

Dependiendo del sistema químico, puede aumentar o disminuir la solubilidad de determinadas sales.

Velocidades tangenciales insuficientes

Favorecen la acumulación de cristales sobre la superficie de la membrana.

Tabla 6.8.

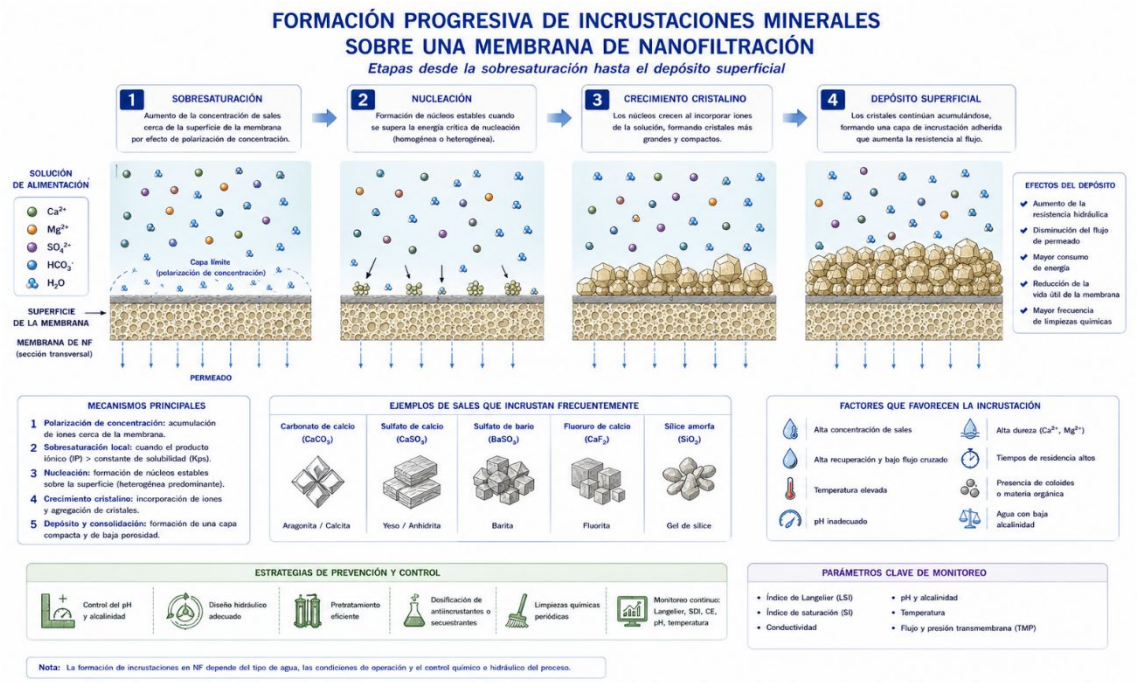
Variables que influyen en la formación de incrustaciones en nanofiltración

Variable	Influencia sobre el scaling
Recuperación	Incrementa la sobresaturación
pH	Favorece la precipitación de carbonatos
Temperatura	Modifica la solubilidad
Concentración de calcio	Incrementa el riesgo de incrustación
Concentración de sulfatos	Favorece precipitación de sulfatos
Velocidad tangencial	Disminuye la deposición superficial cuando aumenta

Nota. **Elaboración propia.**

Figura 6.6

Formación progresiva de incrustaciones minerales sobre una membrana de nanofiltración, mostrando las etapas de sobresaturación, nucleación, crecimiento cristalino y depósito superficial.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Mulder (1996) y Schäfer, Fane y Waite (2005).

Reflexión ingenieril

La experiencia industrial demuestra que el control del **scaling** comienza durante el diseño de la planta y no durante su operación. Una adecuada caracterización del agua, el cálculo de los índices de saturación, la selección de una recuperación apropiada y el

empleo de antiincrustantes permiten evitar gran parte de los problemas operacionales asociados a las incrustaciones. En este sentido, el ingeniero debe considerar el scaling como un fenómeno predecible y controlable, incorporando medidas preventivas desde la ingeniería conceptual.

6.7.5 PREVENCIÓN, LIMPIEZA Y RECUPERACIÓN DE MEMBRANAS DE NANOFILTRACIÓN

La prevención del fouling constituye la estrategia más eficaz para garantizar un funcionamiento estable de los sistemas de nanofiltración. Aunque las limpiezas físicas y químicas permiten recuperar parcialmente el desempeño de las membranas, ninguna de ellas consigue restituir completamente las condiciones originales cuando el ensuciamiento ha evolucionado hacia formas irreversibles.

Por eso, el diseño actual de plantas de nanofiltración incluye medidas de prevención desde la ingeniería conceptual, con lo que baja la probabilidad de incrustaciones y las membranas duran más.

Las estrategias de prevención comprenden:

- optimización del pretratamiento;
- control de la recuperación;
- dosificación de antiincrustantes;
- ajuste del pH;
- automatización de los programas de limpieza;
- monitoreo continuo de las variables operacionales.

Estas medidas deben considerarse como parte integrante del proceso y no como operaciones auxiliares.

6.7.6 CONTROL DEL SCALING MEDIANTE ANTIINCRUSTANTES

Los antiincrustantes son productos químicos creados para retardar o evitar que precipiten las sales poco solubles.

Su acción puede darse por uno o varios de estos procesos:

- inhibición de la nucleación;
- interferencia en el crecimiento cristalino;
- dispersión de partículas;

- modificación de la morfología de los cristales.

Como consecuencia, las sales permanecen en solución aun cuando el sistema opere cerca de condiciones de sobresaturación.

Los antiincrustantes más utilizados pertenecen a las siguientes familias:

- fosfonatos;
- polímeros acrílicos;
- copolímeros orgánicos;
- polímeros modificados de nueva generación.

El producto se escoge con base en la química del agua y en simulaciones o pruebas específicas.

Interpretación ingenieril

El antiincrustante no elimina las sales presentes en el agua; únicamente modifica su comportamiento cinético, retrasando la formación de cristales. Por ello, su dosificación no reemplaza un diseño adecuado de la recuperación ni una correcta caracterización química del agua.

6.7.7 AJUSTE DEL PH

Entre las estrategias que mejor evitan la precipitación del carbonato de calcio está el control del pH.

Si el agua tiene alta alcalinidad, al acidificarla el equilibrio carbonato-bicarbonato se desplaza hacia el dióxido de carbono disuelto, y la precipitación se hace menos probable.

Los ácidos más utilizados son:

- ácido sulfúrico;
- ácido clorhídrico;
- dióxido de carbono, en aplicaciones específicas.

La selección depende de:

- composición química del agua;
- compatibilidad con el proceso;
- costo operativo;

- requisitos ambientales.

El ajuste del pH debe realizarse cuidadosamente para evitar fenómenos de corrosión o alteraciones en la calidad del permeado.

6.7.8 LIMPIEZA FÍSICA

Las limpiezas físicas permiten remover depósitos poco adheridos antes de que evolucionen hacia formas irreversibles.

Las operaciones más frecuentes incluyen:

- enjuague hidráulico;
- incremento temporal de la velocidad tangencial;
- desplazamiento con agua permeada;
- purgas periódicas del concentrado.

Aunque estas operaciones presentan una eficacia limitada frente al scaling, contribuyen significativamente a reducir la acumulación inicial de sólidos y coloides.

Por la naturaleza de los contaminantes que retiene la nanofiltración, las limpiezas físicas casi siempre se refuerzan con procedimientos químicos.

6.7.9 LIMPIEZA QUÍMICA (CIP)

Cuando el flujo de permeado disminuye de manera significativa o la presión transmembrana aumenta por encima de los valores de diseño, resulta necesario realizar una limpieza química mediante un sistema **Cleaning in Place (CIP)**.

El sistema CIP permite recircular soluciones químicas sin desmontar los módulos de membranas, reduciendo el tiempo de mantenimiento y el riesgo de daños mecánicos.

Los principales componentes del sistema son:

- tanque de preparación de soluciones;
- bomba de recirculación;
- calentador, cuando se requiere controlar la temperatura;
- filtros de protección;
- instrumentación de presión, temperatura, caudal y pH;
- válvulas de aislamiento.

Durante el diseño debe garantizarse que la velocidad de circulación sea suficiente para mantener un flujo turbulento que favorezca la eliminación de los depósitos.

Tabla 6.9

Reactivos utilizados en la limpieza de membranas de nanofiltración

Tipo de depósito	Reactivo recomendado	Objetivo principal
Materia orgánica	Hidróxido de sodio (NaOH)	Solubilizar compuestos orgánicos
Carbonato de calcio	Ácido cítrico	Disolver incrustaciones
Sulfatos metálicos	Ácidos minerales diluidos*	Remover precipitados minerales
Biofouling	Peróxido de hidrógeno**	Control microbiológico
Óxidos metálicos	EDTA u otros agentes quelantes	Solubilizar depósitos metálicos

Nota. Elaboración propia.

*El ácido se elige según lo que recomiende el fabricante de la membrana. **Usar agentes oxidantes depende de si el material de la membrana tolera químicamente esos productos.

6.7.10 EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LA LIMPIEZA

Después de cada procedimiento de limpieza debe verificarse la recuperación del desempeño hidráulico.

La recuperación del flujo puede calcularse mediante:

```
Recuperación (%) = (JL / J0) × 100
```

donde:

JL = flujo después de la limpieza

```
J0 = flujo de una membrana limpia
```

La interpretación práctica es:

- recuperación superior al 95 %: limpieza altamente eficaz;
- recuperación entre 85 % y 95 %: desempeño satisfactorio;
- recuperación inferior al 85 %: posible fouling irreversible o deterioro permanente de la membrana.

Además del flujo, deben evaluarse:

- presión transmembrana;
- permeabilidad hidráulica;
- rechazo de sales;

- calidad del permeado;
- pérdida de carga.

Si se analizan estos indicadores en conjunto, se obtiene una idea más completa de cómo se encuentra la membrana.

6.7.11 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Las plantas modernas incorporan estrategias de mantenimiento predictivo basadas en el análisis continuo de datos operacionales.

Entre las variables más utilizadas destacan:

- flujo normalizado;
- presión transmembrana;
- permeabilidad hidráulica;
- conductividad del permeado;
- consumo específico de energía;
- frecuencia de limpiezas.

Los sistemas SCADA permiten representar gráficamente la evolución temporal de estas variables e identificar tendencias antes de que se produzca una pérdida significativa del desempeño.

En instalaciones de gran capacidad, el análisis predictivo se complementa con modelos de inteligencia artificial capaces de estimar la evolución del fouling y recomendar el momento óptimo para efectuar la limpieza.

Tabla 6.10

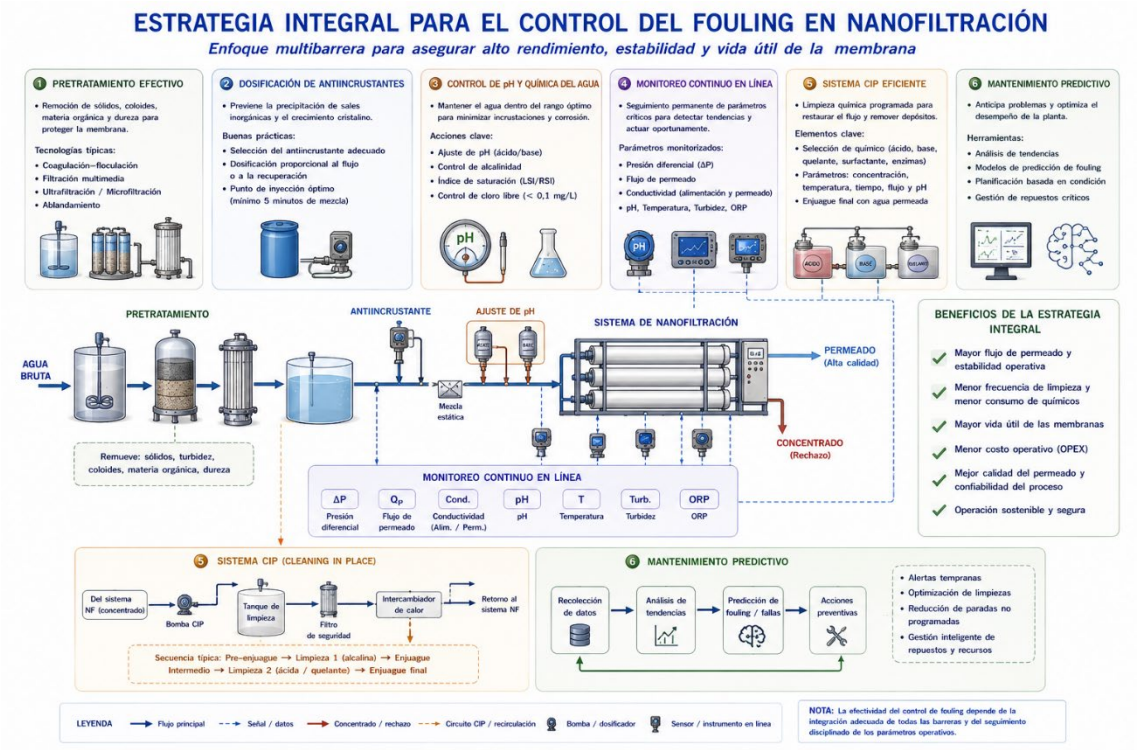
Indicadores para el monitoreo del estado de una membrana de nanofiltración

Indicador	Tendencia de alarma	Posible causa
Flujo normalizado	Disminuye	Fouling o scaling
Presión transmembrana	Aumenta	Incremento de la resistencia hidráulica
Rechazo de sales	Disminuye	Deterioro de la membrana
Conductividad del permeado	Aumenta	Pérdida de selectividad
Consumo específico de energía	Aumenta	Ensuciamiento progresivo
Frecuencia de limpieza	Aumenta	Diseño u operación inadecuados

Nota. Elaboración propia.

Figura 6.7.

Estrategia integral para el control del fouling en nanofiltración,



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Schäfer, Fane y Waite (2005) y Crittenden et al. (2012).

Reflexión ingenieril

Los casos de plantas industriales enseñan que dominar el fouling y el scaling exige varias estrategias combinadas, tanto en diseño como en operación, y no una sola acción preventiva. Si se conoce bien el agua, se aplican modelos de saturación, se escoge la recuperación óptima, se dosifican antiincrustantes y se instala un monitoreo predictivo, los costos operativos bajan de forma notable y las membranas duran más. Así, prevenir es parte esencial del diseño y va más allá de las labores de mantenimiento.

6.8 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE PLANTAS DE NANOFILTRACIÓN

Un diseño de nanofiltración se va afinando por iteraciones, pues hay que cumplir a un tiempo con requisitos hidráulicos, químicos, energéticos y económicos. En ultrafiltración la meta principal es quitar sólidos suspendidos y macromoléculas. En nanofiltración se persigue separar con selectividad sales multivalentes y orgánicos de bajo peso molecular, con buena productividad y gasto moderado de energía.

Ya en la práctica profesional, se empieza por caracterizar el agua de alimentación en lo físico y lo químico. Después vienen la elección de la membrana, el

dimensionamiento hidráulico, la estimación del gasto de energía y, para cerrar, la evaluación económica del proyecto.

El procedimiento desarrollado en esta sección corresponde a la metodología utilizada durante la ingeniería conceptual de plantas industriales y municipales.

6.8.1 INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL DISEÑO

Antes que nada, un proyecto de nanofiltración requiere datos representativos sobre el agua que se alimentará y sobre lo que el proceso necesita.

Los parámetros mínimos que deben conocerse son los siguientes.

Características hidráulicas

- caudal promedio;
- caudal máximo;
- variaciones estacionales;
- presión disponible.

Características fisicoquímicas

- pH;
- temperatura;
- conductividad;
- sólidos disueltos totales;
- alcalinidad;
- dureza total;
- calcio;
- magnesio;
- sodio;
- potasio;
- cloruros;
- sulfatos;
- bicarbonatos;
- sílice;

- hierro y manganeso;
- carbono orgánico total.

Características microbiológicas

- bacterias heterotróficas;
- coliformes;
- microorganismos potencialmente formadores de biofilm.

Condiciones de operación

- producción requerida;
- porcentaje de recuperación;
- calidad deseada del permeado;
- horas de operación;
- vida útil del proyecto.

La calidad de esta información condicionará directamente la confiabilidad del diseño.

6.8.2 SELECCIÓN DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN

La presión es, de todas las variables del diseño hidráulico en una planta de nanofiltración, la de mayor peso.

Una presión insuficiente produce bajos caudales de permeado.

Por el contrario, una presión excesiva incrementa:

- el consumo energético;
- la compactación de la membrana;
- la polarización por concentración;
- el riesgo de incrustaciones.

Por eso se busca escoger la presión que dé el flujo exigido con el menor gasto específico de energía.

Esta presión debe establecerse mediante:

- pruebas piloto;
- datos del fabricante;

- simulaciones hidráulicas;
- experiencia previa en proyectos similares.

Interpretación ingenieril

La presión de diseño nunca debe seleccionarse únicamente a partir del límite máximo permitido por el fabricante. Debe corresponder al punto donde la productividad adicional obtenida justifique el incremento del consumo energético.

6.8.3 SELECCIÓN DEL FLUJO DE DISEÑO

El flujo de diseño es el caudal de permeado que se genera por cada unidad de superficie de membrana.

Su selección constituye uno de los aspectos más importantes del proyecto.

Flujos excesivamente elevados producen:

- mayor polarización por concentración;
- incremento del fouling;
- aumento del scaling;
- limpiezas más frecuentes;
- reducción de la vida útil.

Flujos demasiado bajos incrementan innecesariamente el área de membranas y la inversión inicial.

Para fijar el flujo hay que ponderar juntas tres aspectos: cuánto se produce, qué tan estable es la operación y cuánto cuesta el ciclo de vida.

Recomendaciones generales

Cuando no existan pruebas piloto, resulta recomendable adoptar valores conservadores sugeridos por el fabricante y posteriormente ajustarlos durante la puesta en marcha.

6.8.4 CÁLCULO DEL ÁREA DE MEMBRANAS

Fijado el flujo de diseño, con la siguiente expresión se calcula el área efectiva de membranas.

$$A = Qp / J$$

donde

A = área efectiva de membranas (m^2)

Qp = caudal de permeado (m^3/h)

J = flujo de diseño ($m^3/m^2 \cdot h$)

Esta ecuación proporciona el área mínima necesaria para satisfacer la producción requerida.

Durante la ingeniería conceptual debe incorporarse un margen de seguridad para compensar:

- ensuciamiento progresivo;
- envejecimiento de las membranas;
- variaciones en la calidad del agua;
- incertidumbre del proyecto.

Generalmente este margen oscila entre **10 % y 25 %**, dependiendo del nivel de información disponible.

Ejemplo conceptual

Producción requerida:

$$Qp = 200\ m^3/h$$

Flujo de diseño:

$$J = 18\ L/m^2 \cdot h$$

$$J = 0{,}018\ m^3/m^2 \cdot h$$

Área requerida:

$$A = 200 / 0{,}018$$

$$A = 11\ 111\ m^2$$

Considerando un margen del 15 %:

```
Área instalada
= 11 111 × 1,15
= 12 778 m²
```

Para efectos de diseño se adopta:

```
Área instalada = 12 800 m²
```

6.8.5 SELECCIÓN DEL NÚMERO DE MÓDULOS

Conocida el área instalada, el número de módulos se determina mediante:

$$Nm = A / Am$$

donde

Nm = número de módulos

A = área instalada

Am = área efectiva por módulo

El número obtenido debe redondearse al entero superior.

En plantas industriales se recomienda incorporar módulos de reserva o diseñar la instalación con una configuración **N + 1**, permitiendo mantener la producción durante las actividades de mantenimiento.

Distribución entre trenes

Una vez definido el número total de módulos, éstos deben distribuirse entre varios trenes hidráulicamente independientes.

Las ventajas de esta configuración incluyen:

- mayor confiabilidad operacional;
- facilidad de mantenimiento;
- posibilidad de ampliación futura;
- mejor balance hidráulico;
- reducción del impacto ante fallas individuales.

6.8.6 RECUPERACIÓN DEL SISTEMA

La recuperación representa la fracción del agua alimentada que se convierte en permeado.

Se calcula mediante:

```
Recuperación = Qp / Qa
```

donde

Qp = caudal de permeado

Qa = caudal de alimentación

La recuperación influye directamente sobre:

- consumo de agua;
- concentración de sales;

- presión osmótica;
- probabilidad de scaling;
- consumo energético.

Al elegirla, entonces, se deben revisar también los índices de saturación junto con los modelos de equilibrio químico.

Interpretación ingenieril

Subir la recuperación disminuye el volumen de rechazo, pero hace más probable que se formen incrustaciones minerales. El punto óptimo es, por tanto, el que baja al mínimo el costo total del proceso y mantiene estable la operación.

6.8.7 BALANCE HIDRÁULICO DEL SISTEMA

El balance hidráulico constituye la base para el dimensionamiento de tuberías, bombas, válvulas y tanques.

La expresión general es:

$$Qa = Qp + Qc$$

donde

Qa = caudal de alimentación

Qp = caudal de permeado

Qc = caudal de concentrado

Este balance se comprueba en cada tren de membranas y también en toda la planta.

Durante la ingeniería básica también deben incorporarse los caudales correspondientes a:

- retrolavados (cuando existan);
- limpiezas CIP;
- purgas;
- recirculaciones;
- drenajes.

6.8.8 DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DEL SISTEMA DE BOMBEO

Las bombas deben dar suficiente presión y caudal para superar lo siguiente:

- la presión osmótica;

- la presión transmembrana;
- las pérdidas de carga en tuberías;
- las pérdidas de carga en accesorios;
- las pérdidas en módulos de membranas.

La potencia hidráulica puede estimarse mediante:

$$P = (Q \times \Delta P) / \eta$$

donde

P = potencia de bombeo

Q = caudal

ΔP = presión total requerida

η = rendimiento global del sistema de bombeo

Durante la ingeniería de detalle deberán incorporarse factores adicionales como variaciones de carga, eficiencia del motor, variadores de frecuencia y márgenes de operación.

Tabla 6.11

Variables fundamentales para el dimensionamiento de una planta de nanofiltración

Variable	Influencia sobre el diseño
Presión de operación	Determina la fuerza impulsora disponible
Flujo de diseño	Define el área de membranas
Área instalada	Determina el número de módulos
Recuperación	Controla el consumo de agua y el riesgo de scaling
Presión osmótica	Reduce la presión efectiva de filtración
Número de trenes	Determina la flexibilidad operacional
Potencia de bombeo	Determina el consumo energético
Factor de seguridad	Incrementa la confiabilidad del diseño

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Diseñar una planta de nanofiltración obliga a conjugar aspectos hidráulicos, químicos y energéticos. En ultrafiltración, la productividad responde sobre todo al flujo y al fouling; aquí, en cambio, pesan mucho la presión osmótica, los iones presentes en el agua y el peligro de incrustaciones, y estos factores condicionan los valores de diseño. Quien proyecta debe afinar a la vez la recuperación, la energía consumida, el rechazo de

sales y la estabilidad operacional; solo así el sistema responderá con confiabilidad en toda su vida útil.

6.8.9 DISEÑO HIDRÁULICO DE LOS TRENES DE NANOFILTRACIÓN

Teniendo ya la cantidad total de módulos, se pasa a definir cómo se organiza hidráulicamente la planta. Lo que se persigue es que el caudal alimentado llegue por igual a cada tren de membranas, de forma que todos los módulos trabajen con presión, caudal y recuperación semejantes.

En ingeniería, repartir el flujo hidráulicamente de manera uniforme es indispensable para que el rechazo de sales sea homogéneo, para evitar incrustaciones localizadas y para que las membranas duren más.

Las plantas industriales de nanofiltración se diseñan normalmente con varios trenes operando en paralelo. Cada tren constituye una unidad independiente que puede ponerse fuera de servicio para realizar labores de mantenimiento sin afectar significativamente la producción total.

Las principales ventajas de esta configuración son:

- mayor disponibilidad operacional;
- facilidad para ejecutar programas de mantenimiento preventivo;
- posibilidad de ampliar la capacidad instalada;
- menor impacto ante fallas individuales;
- mejor flexibilidad para adaptarse a variaciones de la demanda.

En proyectos de gran capacidad suele adoptarse una configuración **N + 1**, donde uno de los trenes permanece en reserva y puede entrar en operación cuando alguno de los trenes principales requiera mantenimiento.

Distribución del caudal entre trenes

Si cada tren cuenta con los mismos módulos y su comportamiento hidráulico es equivalente, la expresión siguiente reparte el caudal en partes iguales:

$$Qt = Qa / Nt$$

donde

Qt = caudal de alimentación por tren

Qa = caudal total de alimentación

Nt = número de trenes

Esta distribución simplifica el control automático del proceso y facilita el balance hidráulico de la instalación.

Distribución de módulos

Conocido el número total de módulos, éstos deben distribuirse procurando mantener la misma superficie de membrana en cada tren.

Cuando el número total no sea exactamente divisible, los módulos adicionales pueden instalarse en el tren de reserva o distribuirse procurando minimizar las diferencias de carga hidráulica.

Interpretación ingenieril

La distribución uniforme de módulos reduce las diferencias de presión entre trenes y facilita la operación estable de la planta. Las diferencias importantes de superficie instalada pueden provocar recuperaciones distintas y acelerar el desarrollo de fouling en determinados trenes.

6.8.10 DISEÑO DE COLECTORES HIDRÁULICOS

Los colectores principales constituyen la red de tuberías encargada de distribuir el agua de alimentación hacia los diferentes trenes y de recoger posteriormente el permeado y el concentrado.

Su diseño debe garantizar que todos los módulos reciban condiciones hidráulicas similares.

Los principales objetivos son:

- minimizar pérdidas de carga;
- evitar zonas de estancamiento;
- facilitar el drenaje completo;
- permitir el aislamiento individual de cada tren;
- reducir diferencias de presión entre módulos.

En plantas industriales se recomienda emplear configuraciones simétricas que proporcionen recorridos hidráulicos semejantes para todos los trenes.

Si eso no se puede lograr, se calculan las pérdidas de carga para comprobar que las diferencias de presión no excedan los límites fijados en el diseño.

Tabla 6.12

Velocidades de referencia para el diseño hidráulico de colectores en plantas de nanofiltración.

Como criterio preliminar pueden adoptarse los siguientes intervalos de velocidad.

Servicio	Velocidad recomendada
Agua de alimentación	1,0–2,0 m/s
Permeado	0,8–1,5 m/s
Concentrado	1,5–2,5 m/s
Soluciones CIP	1,5–3,0 m/s

Nota. Elaboración propia.

Estas velocidades constituyen valores orientativos y deberán verificarse mediante cálculos hidráulicos detallados durante la ingeniería básica.

6.8.11 SELECCIÓN DE BOMBAS DE ALTA PRESIÓN

Una planta de nanofiltración depende en gran medida de sus bombas: ellas entregan la energía que hace falta para superar tanto las pérdidas de carga como la presión osmótica del sistema.

Durante la selección deben considerarse:

- caudal máximo de operación;
- presión diferencial requerida;
- eficiencia hidráulica;
- disponibilidad operacional;
- posibilidad de ampliación futura;
- facilidad de mantenimiento.

Siempre que sea posible, las bombas deberán seleccionarse para operar cerca de su **Punto de Máxima Eficiencia (Best Efficiency Point, BEP)**.

Operar alejados de este punto produce:

- incremento del consumo de energía;
- vibraciones;
- desgaste prematuro;

- reducción de la confiabilidad.

En instalaciones modernas resulta recomendable utilizar variadores de frecuencia para adaptar la velocidad de las bombas a las variaciones del caudal de producción.

Configuración de bombeo

Las configuraciones más frecuentes son:

- una bomba en operación y una en reserva;
- dos bombas en operación y una en reserva;
- varias bombas en paralelo con velocidad variable.

La selección dependerá del caudal requerido y del nivel de disponibilidad especificado para el proyecto.

6.8.12 INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA

La automatización de una planta de nanofiltración requiere la instalación de instrumentos capaces de medir continuamente las variables críticas del proceso.

Como mínimo deben incorporarse:

Tabla 6.13

Instrumentación mínima recomendada para una planta de nanofiltración.

Variable	Instrumento recomendado
Caudal de alimentación	Caudalímetro electromagnético
Caudal de permeado	Caudalímetro electromagnético
Caudal de concentrado	Caudalímetro electromagnético
Presión de alimentación	Transmisor de presión
Presión del concentrado	Transmisor de presión
Presión del permeado	Transmisor de presión
Conductividad	Conductivímetro en línea
pH	Analizador de pH
Temperatura	Sensor Pt-100
Nivel de tanques	Transmisor ultrasónico

Nota. Elaboración propia.

A partir de estas mediciones pueden calcularse automáticamente variables derivadas como:

- presión transmembrana;
- recuperación;

- rechazo de sales;
- consumo específico de energía;
- flujo normalizado;
- permeabilidad hidráulica.

6.8.13 AUTOMATIZACIÓN Y ESTRATEGIA DE CONTROL

Las plantas modernas de nanofiltración operan mediante sistemas PLC o DCS integrados con plataformas SCADA.

El sistema de control debe ejecutar automáticamente:

- arranque secuencial de bombas;
- regulación de la presión de operación;
- control del caudal de alimentación;
- monitoreo del rechazo de sales;
- secuencias de limpieza química (CIP);
- generación de alarmas;
- almacenamiento histórico de datos.

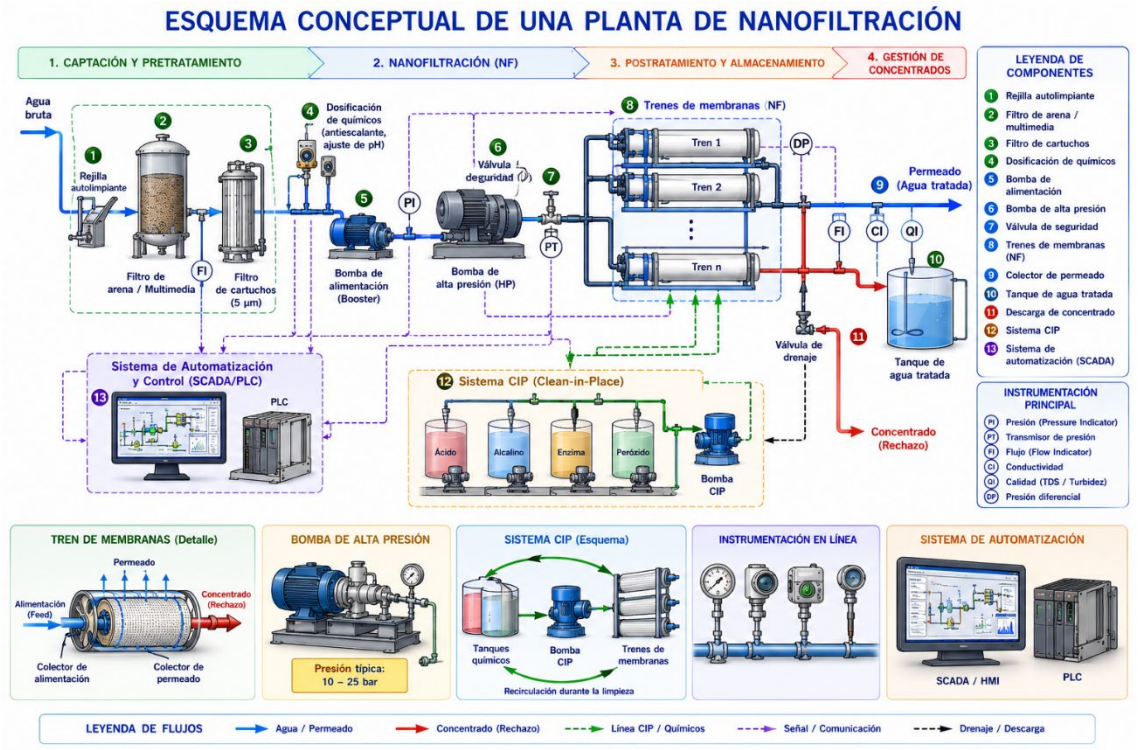
Asimismo, debe incorporar protecciones automáticas frente a condiciones como:

- presión excesiva;
- bajo caudal;
- alta conductividad del permeado;
- falla de bombas;
- niveles bajos en tanques;
- interrupciones del suministro eléctrico.

La incorporación de estas funciones incrementa la confiabilidad y reduce la intervención manual del operador.

Figura 6.8

Esquema conceptual de una planta de nanofiltración mostrando los trenes de membranas, colectores principales, bombas de alta presión, sistema CIP, instrumentación y sistema de automatización.



Nota. Elaboración propia.

6.8.14 FILOSOFÍA DE DISEÑO DE PLANTAS DE NANOFILTRACIÓN

El diseño moderno de plantas de nanofiltración debe orientarse a maximizar la confiabilidad, minimizar el consumo energético y facilitar la operación durante toda la vida útil del proyecto.

Para ello, el ingeniero debe integrar criterios de hidráulica, equilibrio químico, selección de materiales, instrumentación y automatización, evitando optimizar únicamente una variable de diseño.

Una planta correctamente concebida debe permitir:

- operar con estabilidad frente a variaciones de la calidad del agua;
- mantener elevados porcentajes de rechazo;
- minimizar el riesgo de incrustaciones;
- facilitar las operaciones de limpieza;
- reducir los costos del ciclo de vida.

Reflexión ingenieril

La experiencia acumulada en plantas industriales demuestra que el éxito de un sistema de nanofiltración depende mucho más de la integración entre sus componentes

que del desempeño individual de una membrana. El diseñador debe considerar la planta como un sistema completo, donde el pretratamiento, la hidráulica, las membranas, el sistema de bombeo, la instrumentación y la automatización actúan de manera coordinada. Este enfoque sistémico constituye la base de la ingeniería moderna de membranas y prepara al estudiante para abordar el diseño de sistemas de **ósmosis inversa**, donde la optimización hidráulica y energética adquiere una importancia aún mayor.

6.9 CASO INTEGRAL DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE NANOFILTRACIÓN

Este caso de estudio junta lo aprendido en el capítulo sobre fundamentos científicos y criterios de ingeniería, y lo hace diseñando, a nivel conceptual, una planta de nanofiltración que ablanda y acondiciona agua subterránea para uso industrial.

El procedimiento presentado reproduce la metodología empleada durante la ingeniería conceptual de proyectos reales y constituye la base para el posterior desarrollo de la ingeniería básica y de detalle.

6.9.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Una empresa fabricante de bebidas necesita una planta nueva que produzca el agua de proceso con la que elaborará sus productos alimenticios.

El agua proviene de un acuífero profundo y presenta elevada dureza, así como concentraciones importantes de sulfatos y materia orgánica natural.

La empresa desea reducir significativamente estos componentes sin eliminar completamente las sales disueltas, con el propósito de conservar una mineralización adecuada para el proceso productivo.

Se espera que la planta marche todo el día, de forma continua, durante veinticuatro horas.

La Tabla 6.14 recoge las propiedades del agua que alimentará la planta.

Tabla 6.14

Características del agua de alimentación

Parámetro	**Valor**
Producción requerida	4 800 m³/día
Caudal horario	200 m³/h
pH	7,6
Temperatura	24 °C

Parámetro	Valor
Conductividad	1 550 µS/cm
Sólidos disueltos totales	980 mg/L
Dureza total	420 mg/L como $CaCO_3$
Calcio	145 mg/L
Magnesio	42 mg/L
Sulfatos	315 mg/L
Cloruros	165 mg/L
Sílice	18 mg/L
Carbono orgánico total	4,8 mg/L

Nota. Elaboración propia.

6.9.2 OBJETIVOS DE DISEÑO

El sistema deberá cumplir simultáneamente los siguientes requisitos:

- producir 4 800 m^3/día de agua tratada;
- remover al menos el 90 % de la dureza;
- reducir significativamente la concentración de sulfatos;
- disminuir la materia orgánica natural;
- mantener una recuperación superior al 80 %;
- minimizar el consumo específico de energía;
- garantizar una disponibilidad operacional superior al 95 %.

6.9.3 SELECCIÓN DEL PROCESO

Después de evaluar diferentes alternativas tecnológicas, se selecciona la nanofiltración debido a que:

- elimina eficientemente calcio y magnesio;
- reduce los sulfatos;
- disminuye la materia orgánica natural;
- conserva parte de las sales monovalentes;
- requiere menor presión que la ósmosis inversa;
- presenta menores costos de operación para este tipo de aplicación.

El tren de tratamiento seleccionado será:

```
Captación
↓
```

```
Oxidación
↓
Filtración multimedia
↓
Filtros de cartucho (5 µm)
↓
Dosificación de antiincrustante
↓
Nanofiltración
↓
Tanque de permeado
↓
Distribución
```

Este esquema proporciona una adecuada protección a las membranas y reduce significativamente el riesgo de fouling y scaling.

6.9.4 SELECCIÓN DE LA MEMBRANA

Considerando la calidad del agua y los objetivos del proyecto, se selecciona una membrana comercial de nanofiltración tipo Thin Film Composite (TFC).

Las características principales son:

- rechazo de calcio superior al 95 %;
- rechazo de sulfatos superior al 98 %;
- rechazo parcial de sodio y cloruros;
- elevada permeabilidad hidráulica;
- presión máxima de operación de 41 bar;
- compatibilidad con programas CIP.

Pesa más el costo durante todo el ciclo de vida que lo que cuesta comprar el equipo, y es lo que decide la selección.

6.9.5 SELECCIÓN DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN

Las pruebas piloto muestran que la presión óptima se encuentra alrededor de:

```
12 bar
```

Este valor proporciona:

- elevado flujo de permeado;
- buena eficiencia energética;
- bajo riesgo de compactación;
- adecuado rechazo de sales.

Por tanto, se adopta:

```
Presión de diseño = 12 bar
```

6.9.6 SELECCIÓN DEL FLUJO DE DISEÑO

El fabricante recomienda flujos comprendidos entre:

```
18–28 L/m²·h
```

Con el propósito de incrementar la estabilidad operacional se selecciona:

```
20 L/m²·h
```

Conversión:

$$J = 0{,}020\ m^3/m^2 \cdot h$$

Interpretación ingenieril

Se adopta un flujo moderado que reduce la velocidad de formación del fouling y permite ampliar los intervalos entre limpiezas químicas.

6.9.7 CÁLCULO DEL ÁREA DE MEMBRANAS

Producción requerida:

$$Q = 200\ m^3/h$$

Aplicando:

$$A = Q / J$$

Sustituyendo:

$$A = 200 / 0{,}020$$

$$A = 10\ 000\ m^2$$

Se incorpora un margen del 15 %.

```
Área instalada
=10 000 ×1,15
=11 500 m²
```

Se adopta:

Área instalada =11 500 m²

6.9.8 SELECCIÓN DEL NÚMERO DE MÓDULOS

Se seleccionan módulos comerciales con un área efectiva de:

40 m² por módulo

Entonces:

$$Nm = 11\,500 / 40$$

$$Nm = 287{,}5$$

Se redondea:

288 módulos

Distribución propuesta:

- seis trenes;
- cuarenta y ocho módulos por tren;
- cinco trenes en operación;
- un tren de reserva.

Esta configuración permite mantener la producción durante las actividades de mantenimiento preventivo.

6.9.9 BALANCE HIDRÁULICO

Se adopta una recuperación de diseño de:

82 %

Entonces:

$$Qa = 4800 / 0{,}82$$

$$Qa = 5854\ m^3/día$$

El caudal de concentrado será:

Qc

=5854−4800

=1054 m³/día

Este caudal deberá enviarse al sistema de disposición o reutilización definido para el proyecto.

6.9.10 ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA DE BOMBEO

Considerando:

- caudal = 200 m³/h;
- presión = 12 bar;
- eficiencia global = 82 %.

Aplicando la ecuación simplificada:

$$P = (Q \times \Delta P) / \eta$$

se obtiene una potencia aproximada de:

$$P \approx 81 \text{ kW}$$

Este valor corresponde a la potencia hidráulica requerida para la bomba principal y deberá ajustarse durante la ingeniería de detalle considerando pérdidas de carga adicionales y márgenes operacionales.

6.9.11 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

El consumo específico puede estimarse mediante:

$$CEE = P/Q$$

Sustituyendo:

$$CEE = 81/200 = 0{,}41 \text{ kWh/m}^3$$

Este valor resulta representativo para una planta de nanofiltración destinada al ablandamiento parcial de agua subterránea y confirma la ventaja energética de esta tecnología frente a la ósmosis inversa cuando no se requiere una desmineralización completa.

Tabla 6.15

Resumen del diseño conceptual

Parámetro	**Valor**
Producción	4 800 m³/día
Presión de operación	12 bar
Flujo de diseño	20 L/m²·h
Área instalada	11 500 m²
Número de módulos	288
Número de trenes	6
Recuperación	82 %
Caudal de concentrado	1 054 m³/día

Parámetro	Valor
Potencia estimada	81 kW
Consumo específico de energía	0,41 kWh/m³

Nota. Elaboración propia.

6.9.12 EVALUACIÓN TÉCNICA DEL DISEÑO

Con este diseño se cumplen la producción y la calidad de agua requeridas, con un consumo de energía moderado y un amplio margen de confiabilidad operacional.

La presión elegida equilibra bien la productividad con la eficiencia energética, y como el flujo de diseño es conservador, el fouling se forma más lentamente y las membranas duran más.

Un tren de reserva hace posible cumplir los programas de mantenimiento con el servicio funcionando sin pausa. Por otro lado, con 82 % de recuperación se aprovecha bien el agua y se controla el peligro de incrustaciones.

Si se mira el aspecto económico, en este caso la ósmosis inversa queda por detrás de la nanofiltración, que alcanza las metas de calidad del agua con presiones de trabajo menores y con menos energía por unidad producida.

Reflexión ingenieril

El caso deja una enseñanza: para proyectar una planta de nanofiltración se combinan hidráulica, química del agua, transferencia de masa y evaluación económica. Al elegir la presión de operación, la recuperación, el área de membranas y la configuración hidráulica, queda definido cómo rendirá todo el sistema. El éxito, sin embargo, no se agota en calcular equipos; el ingeniero debe lograr un balance entre productividad, selectividad, eficiencia energética y confiabilidad operacional. Estas bases sostendrán más adelante el diseño de plantas de ósmosis inversa, que traen aún mayor demanda hidráulica y energética.

6.10 EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE PLANTAS DE NANOFILTRACIÓN

Medir un proyecto de nanofiltración con criterios técnicos y económicos es un paso clave, porque deja ver cuál opción combina mejor el desempeño hidráulico, la calidad del agua producida, la energía que consume y su costo en el ciclo de vida.

Desde la perspectiva de la ingeniería, una planta no debe evaluarse únicamente por su capacidad para remover contaminantes, sino también por su confiabilidad

operacional, facilidad de mantenimiento, flexibilidad para futuras ampliaciones y sostenibilidad ambiental.

Todo el horizonte operativo debe entrar en el análisis económico: no solo la inversión inicial, sino también lo que cuesta explotar la instalación.

6.10.1 INVERSIÓN INICIAL (CAPEX)

La inversión inicial comprende todos los costos necesarios para construir, instalar y poner en operación la planta de nanofiltración.

Entre los principales componentes se incluyen:

- obras civiles;
- captación y almacenamiento;
- sistema de pretratamiento;
- bombas de alta presión;
- módulos de nanofiltración;
- tuberías y colectores;
- sistema de limpieza química (CIP);
- instrumentación;
- sistema de automatización;
- instalaciones eléctricas;
- montaje electromecánico;
- ingeniería;
- supervisión;
- puesta en marcha.

En plantas de nanofiltración, los módulos de membranas y el sistema de bombeo representan normalmente una proporción importante del costo de inversión.

Tabla 6.16

Distribución referencial del CAPEX en plantas de nanofiltración

Concepto	Participación aproximada (%)
Obras civiles	12–20
Pretratamiento	15–20

Concepto	Participación aproximada (%)
Bombas de alta presión	10–15
Membranas y recipientes de presión	20–30
Sistema CIP	4–8
Instrumentación y automatización	8–12
Instalaciones eléctricas	5–8
Ingeniería y montaje	12–18

Nota. Elaboración propia.

6.10.2 COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX)

Los costos de operación son los recursos que hacen falta para mantener la planta en marcha durante toda su vida útil.

Los principales componentes son:

- consumo de energía eléctrica;
- reposición de membranas;
- antiincrustantes;
- productos químicos para limpieza;
- mantenimiento preventivo;
- mantenimiento correctivo;
- mano de obra;
- análisis de laboratorio;
- disposición del concentrado;
- consumo de agua auxiliar.

En una planta de nanofiltración, la electricidad suele ser de los rubros más pesados del costo operativo, aunque normalmente menor que en una planta de ósmosis inversa que trate aguas de características similares.

Interpretación ingenieril

Bajar el consumo de energía en un pequeño porcentaje puede significar grandes ahorros a lo largo de la vida del proyecto, sobre todo en instalaciones de gran capacidad.

6.10.3 COSTO ESPECÍFICO DEL AGUA TRATADA

Para contrastar tecnologías, uno de los indicadores de mayor uso es el costo específico de producir agua.

Puede expresarse como:

```
Costo específico = Costo anual total / Volumen anual producido
```

Este indicador integra simultáneamente:

- inversión anualizada;
- energía;
- reactivos;
- mantenimiento;
- reposición de membranas;
- personal;
- costos ambientales.

Su utilización permite comparar objetivamente diferentes tecnologías de tratamiento.

6.10.4 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

El consumo específico constituye uno de los principales indicadores de desempeño.

Se calcula mediante:

$$CEE = \text{Energía consumida} / \text{Agua producida}$$

$$CEE = E / V$$

Donde:

$$CEE = \text{consumo específico de energía } (kWh/m^3)$$

$$E = \text{energía eléctrica consumida } (kWh)$$

$$V = \text{volumen producido } (m^3)$$

En términos generales, la nanofiltración presenta consumos inferiores a la ósmosis inversa cuando el objetivo consiste en eliminar principalmente dureza y sales multivalentes.

Tabla 6.17

Consumos específicos típicos de tecnologías de membranas

Tecnología	Consumo específico aproximado (kWh/m³)
Microfiltración	0,05–0,20
Ultrafiltración	0,10–0,40

Tecnología	Consumo específico aproximado (kWh/m³)
Nanofiltración	0,30–1,20
Ósmosis inversa (agua salobre)	0,80–2,50
Ósmosis inversa (agua de mar)	3,00–6,00

Nota. Elaboración propia. Los valores dependen de la calidad del agua, la recuperación y las condiciones de operación.

Interpretación ingenieril

Con estas cifras queda claro que la nanofiltración se sitúa a medio camino entre ultrafiltración y ósmosis inversa, en energía requerida y en nivel de separación.

6.10.5 ANÁLISIS DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA

La decisión final no debe basarse únicamente en la inversión inicial.

El análisis del costo del ciclo de vida incorpora:

- inversión inicial;
- costos energéticos;
- mantenimiento;
- reemplazo de membranas;
- consumo de reactivos;
- ampliaciones futuras;
- valor residual de los equipos.

Este enfoque permite seleccionar la alternativa con menor costo total durante todo el horizonte del proyecto.

En plantas de tratamiento de agua es común adoptar un horizonte económico de veinte a treinta años.

6.10.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Todo proyecto está sujeto a incertidumbres técnicas y económicas.

Conviene, por eso, evaluar cómo influyen las principales variables en la rentabilidad del proyecto.

Las variables normalmente analizadas son:

- precio de la energía;
- costo de las membranas;

- vida útil de las membranas;
- recuperación del sistema;
- costo de los productos químicos;
- tasa de interés;
- producción anual.

Con el análisis de sensibilidad se identifican las variables que deben controlarse con mayor rigor durante la operación.

Tabla 6.18

Variables recomendadas para el análisis de sensibilidad

Variable	Intervalo sugerido
Precio de la energía	±20 %
Costo de membranas	±15 %
Vida útil de membranas	±20 %
Recuperación	±10 %
Precio de reactivos	±20 %
Producción anual	±10 %

Nota. Elaboración propia.

6.10.7 INDICADORES PARA LA TOMA DE DECISIONES

Durante la comparación entre alternativas deben analizarse simultáneamente indicadores técnicos, económicos y ambientales.

Los principales son:

- consumo específico de energía;
- costo específico del agua producida;
- recuperación del sistema;
- porcentaje de rechazo de sales;
- disponibilidad operacional;
- frecuencia de limpiezas;
- vida útil de las membranas;
- generación de concentrado;
- emisiones indirectas asociadas al consumo de energía.

La alternativa seleccionada debe corresponder al mejor equilibrio entre todos estos indicadores y no necesariamente a la de menor inversión inicial.

Figura 6.9

Gráfico conceptual para evaluar una planta de nanofiltración en lo técnico y lo económico.



Nota**.** Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

La evaluación técnico-económica demuestra que la selección de una tecnología de membranas no puede basarse únicamente en criterios hidráulicos o en el porcentaje de rechazo de contaminantes. El diseño óptimo es aquel que logra satisfacer los objetivos de calidad del agua con el menor costo del ciclo de vida, manteniendo elevados niveles de confiabilidad, eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. En proyectos modernos, el ingeniero debe integrar conocimientos de economía, hidráulica, química del agua y gestión de activos para garantizar instalaciones competitivas y resilientes.

6.11 CRITERIOS DE INGENIERÍA PARA EL DISEÑO DE PLANTAS DE NANOFILTRACIÓN

El diseño de una planta de nanofiltración requiere integrar conocimientos de ingeniería química, ingeniería hidráulica, ingeniería mecánica, automatización, química del agua y análisis económico. Aunque el proceso se basa en principios relativamente

sencillos de separación por membranas, el desempeño global depende de múltiples variables que interactúan entre sí.

La experiencia industrial demuestra que una planta correctamente diseñada presenta menores costos de operación, mayor disponibilidad, menor frecuencia de limpieza y una vida útil considerablemente más prolongada de las membranas.

Por este motivo, el ingeniero debe usar criterios de diseño conservadores, de modo que la planta opere con estabilidad aunque la calidad del agua cambie bastante.

6.11.1 CARACTERIZACIÓN COMPLETA DEL AGUA

El diseño parte de caracterizar bien el agua de alimentación.

Medir solo conductividad o sólidos disueltos totales es insuficiente.

Debe evaluarse, como mínimo:

- pH;
- temperatura;
- alcalinidad;
- dureza;
- calcio;
- magnesio;
- sodio;
- potasio;
- cloruros;
- sulfatos;
- nitratos;
- sílice;
- hierro;
- manganeso;
- carbono orgánico total;
- índice de ensuciamiento (SDI);
- turbidez;

- microorganismos.

También se recomienda muestrear en distintas épocas del año, para detectar variaciones estacionales.

Interpretación ingenieril

Una caracterización incompleta es una de las causas más frecuentes de sobredimensionamiento o de fallas tempranas en las plantas de nanofiltración.

6.11.2 SELECCIÓN ADECUADA DE LA MEMBRANA

La selección de la membrana debe realizarse considerando simultáneamente:

- rechazo requerido;
- permeabilidad hidráulica;
- presión máxima de operación;
- compatibilidad química;
- tolerancia al pH;
- resistencia al fouling;
- vida útil esperada;
- costo del ciclo de vida.

No siempre la membrana con mayor rechazo constituye la mejor alternativa.

En numerosos proyectos resulta más conveniente utilizar una membrana con ligeramente menor selectividad pero mayor permeabilidad, reduciendo considerablemente el consumo energético.

6.11.3 DISEÑO DEL PRETRATAMIENTO

En toda planta de nanofiltración, el pretratamiento es de los componentes más relevantes.

Debe diseñarse para:

- reducir sólidos suspendidos;
- disminuir turbidez;
- controlar materia orgánica;
- minimizar el biofouling;
- proteger las membranas.

Dependiendo de la calidad del agua podrán incorporarse:

- coagulación;
- floculación;
- sedimentación;
- filtración multimedia;
- carbón activado;
- filtros de cartucho;
- dosificación de antiincrustantes;
- ajuste de pH.

No conviene tratar el pretratamiento como un paso independiente; se define de forma integral.

6.11.4 SELECCIÓN DE LA RECUPERACIÓN

Es habitual equivocarse al fijar recuperaciones demasiado altas, pensando que así se recorta el volumen de concentrado.

Sin embargo, una recuperación elevada incrementa:

- presión osmótica;
- polarización por concentración;
- sobresaturación;
- scaling;
- frecuencia de limpieza.

Por ello, la recuperación debe seleccionarse mediante simulaciones hidráulicas y químicas que permitan mantener condiciones estables durante toda la operación.

Interpretación ingenieril

Una planta que trabaja con una recuperación algo menor puede ser bastante más rentable si con ello limpia con menos frecuencia y las membranas le duran más.

6.11.5 DISEÑO HIDRÁULICO

El sistema hidráulico tiene que repartir el caudal de forma pareja entre todos los módulos.

Para ello se recomienda:

- colectores simétricos;
- bajas pérdidas de carga;
- velocidades adecuadas;
- facilidad de drenaje;
- posibilidad de aislamiento de cada tren;
- incorporación de puntos de muestreo.

La uniformidad hidráulica reduce diferencias de presión entre módulos y mejora la estabilidad del rechazo de sales.

6.11.6 SELECCIÓN DE BOMBAS

Las bombas deben seleccionarse considerando:

- eficiencia hidráulica;
- rango de operación;
- presión requerida;
- facilidad de mantenimiento;
- disponibilidad de repuestos;
- posibilidad de operación mediante variadores de frecuencia.

Siempre que sea posible, las bombas deberán operar próximas al **Best Efficiency Point (BEP)**.

Este criterio reduce:

- consumo energético;
- vibraciones;
- cavitación;
- costos de mantenimiento.

6.11.7 AUTOMATIZACIÓN

Las plantas modernas de nanofiltración deben operar mediante sistemas automáticos capaces de supervisar continuamente las variables críticas.

Como mínimo deben monitorearse:

- presión de alimentación;

- presión del concentrado;
- presión del permeado;
- caudal de alimentación;
- caudal de permeado;
- conductividad;
- temperatura;
- pH;
- recuperación;
- consumo específico de energía.

El sistema de control debe ejecutar automáticamente:

- arranque;
- parada;
- secuencias CIP;
- generación de alarmas;
- registro histórico de datos.

6.11.8 DISEÑO DEL SISTEMA CIP

El sistema de limpieza química debe diseñarse desde la etapa de ingeniería conceptual.

No debe considerarse un equipo auxiliar.

Debe permitir:

- preparar soluciones químicas;
- controlar temperatura;
- controlar caudal;
- controlar pH;
- recircular soluciones;
- realizar enjuagues automáticos.

Asimismo, deberá facilitar futuras ampliaciones de la planta.

6.11.9 DISEÑO PARA MANTENIMIENTO

Cada planta se diseña pensando en el mantenimiento que recibirá durante las décadas siguientes.

Resulta recomendable incorporar:

- espacio suficiente para reemplazar membranas;
- accesos seguros;
- válvulas de aislamiento;
- puentes grúa cuando sea necesario;
- drenajes completos;
- plataformas de inspección.

El costo adicional asociado a estas medidas resulta muy inferior al costo de las dificultades operacionales generadas por un diseño inadecuado.

6.11.10 DISEÑO PARA EXPANSIÓN FUTURA

Las plantas industriales rara vez mantienen durante toda su vida útil la misma capacidad instalada.

Por ello, durante la ingeniería conceptual debe reservarse espacio para:

- nuevos trenes;
- bombas adicionales;
- ampliación del sistema CIP;
- nuevos tanques;
- ampliación del sistema eléctrico;
- incremento de capacidad del sistema SCADA.

Esta previsión reduce significativamente el costo de futuras ampliaciones.

Tabla 6.19

Criterios de ingeniería para diseñar plantas de nanofiltración: resumen

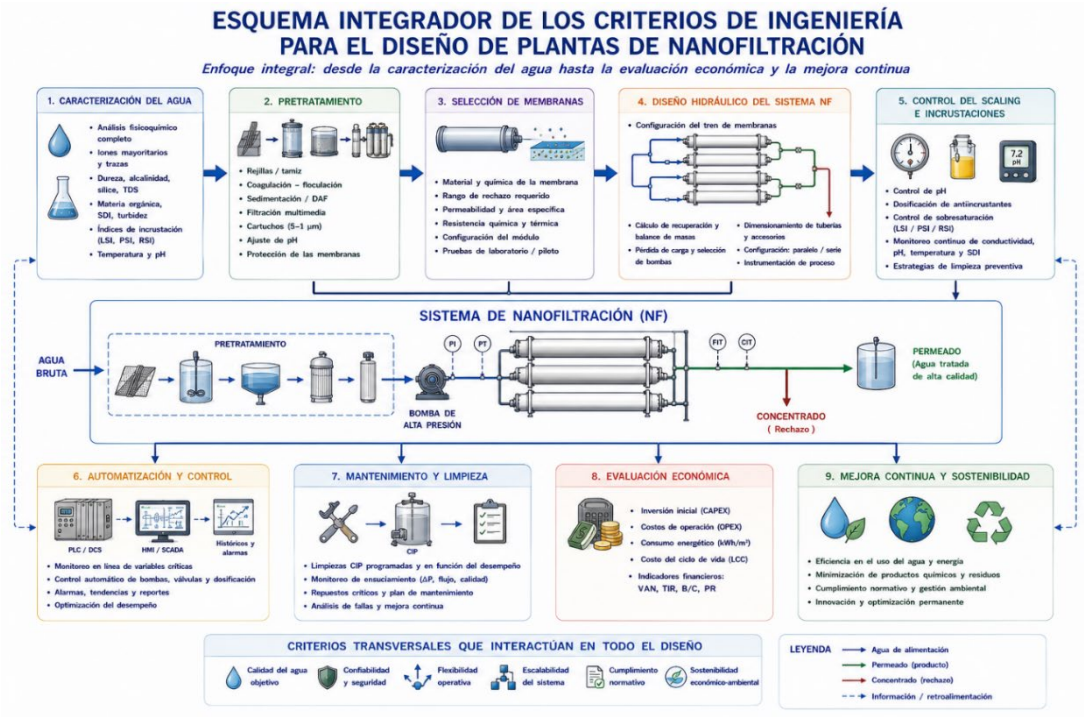
Aspecto	Recomendación principal
Caracterización del agua	Analizar composición química completa y variaciones estacionales
Selección de membranas	Basarse en permeabilidad, selectividad y costo del ciclo de vida
Pretratamiento	Diseñar para minimizar fouling y scaling
Recuperación	Optimizar mediante simulaciones hidráulicas y químicas

Aspecto	Recomendación principal
Sistema hidráulico	Garantizar distribución uniforme del caudal
Bombas	Operar próximas al BEP
Automatización	Integrar PLC, SCADA y monitoreo continuo
Sistema CIP	Diseñarlo desde la ingeniería conceptual
Mantenimiento	Facilitar acceso e intercambio de módulos
Expansión futura	Reservar espacio para ampliaciones

Nota. Elaboración propia.

Figura 6.10

Gráfico de síntesis donde se reúnen los criterios de ingeniería aplicables al diseño de plantas de nanofiltración.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

La ingeniería moderna de nanofiltración se fundamenta en un enfoque sistémico. La selección de una membrana adecuada constituye únicamente el punto de partida; el desempeño global depende de la interacción entre el pretratamiento, la hidráulica, la química del agua, el control del *scaling*, la automatización y el mantenimiento. Las plantas que alcanzan los mejores indicadores de disponibilidad y eficiencia energética son aquellas cuyo diseño considera estos aspectos de manera integrada desde las primeras etapas del proyecto.

6.11.11 ERRORES FRECUENTES EN EL DISEÑO DE PLANTAS DE NANOFILTRACIÓN

Quienes han diseñado, construido y operado plantas de nanofiltración saben que casi todas las fallas operacionales tienen su causa en lo que se decidió durante la ingeniería conceptual y básica, y no en las membranas.

En muchos proyectos, descuidos pequeños en el diseño acaban provocando más consumo de energía, pérdida de productividad, limpiezas más seguidas y una vida útil más corta de los equipos.

Por ello, resulta indispensable conocer los errores más frecuentes y adoptar criterios preventivos desde el inicio del proyecto.

Error 1. Caracterización insuficiente del agua

Uno de los errores más comunes consiste en diseñar la planta utilizando únicamente parámetros generales como conductividad o sólidos disueltos totales.

Este enfoque resulta insuficiente para predecir el comportamiento de la nanofiltración.

Una caracterización incompleta puede ocultar la presencia de:

- elevadas concentraciones de sílice;
- bario;
- estroncio;
- hierro;
- manganeso;
- materia orgánica natural;
- microorganismos.

Como consecuencia, aumenta el riesgo de scaling, biofouling y ensuciamiento irreversible.

Recomendación

Muestrear en distintas épocas del año y sumar análisis completos de composición iónica y de índices de saturación.

Error 2. Seleccionar la membrana únicamente por su porcentaje de rechazo

Es frecuente seleccionar una membrana únicamente porque ofrece el mayor rechazo de sales.

Sin embargo, esta decisión puede conducir a:

- mayor presión de operación;
- incremento del consumo energético;
- menor productividad;
- mayores costos operativos.

Recomendación

Seleccionar la membrana considerando simultáneamente:

- permeabilidad;
- rechazo;
- compatibilidad química;
- resistencia al fouling;
- costo del ciclo de vida.

Error 3. Diseñar recuperaciones excesivamente elevadas

Con frecuencia se intenta maximizar la recuperación para reducir el volumen del concentrado.

Sin embargo, esta práctica incrementa considerablemente:

- la presión osmótica;
- la polarización por concentración;
- el scaling;
- la frecuencia de limpieza.

Recomendación

Determinar la recuperación óptima mediante simulaciones químicas e hidráulicas, verificando siempre los índices de saturación.

Error 4. Subdimensionar el pretratamiento

Una membrana de nanofiltración no debe utilizarse para compensar un pretratamiento deficiente.

Cuando el agua llega con elevada turbidez, materia orgánica o microorganismos, las consecuencias son:

- incremento del fouling;
- disminución del flujo;
- mayor consumo de reactivos;
- reducción de la vida útil.

Recomendación

El pretratamiento debe responder al agua real y a sus cambios estacionales.

Error 5. Ignorar la influencia de la presión osmótica

Muchos diseños consideran únicamente la presión de bombeo.

Sin embargo, en nanofiltración la presión osmótica reduce significativamente la fuerza impulsora disponible.

Si este fenómeno no se considera en el diseño, la producción real termina siendo muy distinta de la calculada.

Recomendación

Para obtener la presión efectiva de operación, se descuenta siempre la presión osmótica que corresponde a la química del agua.

Error 6. Distribución hidráulica deficiente

Una distribución desigual del caudal provoca que algunos módulos trabajen sobrecargados mientras otros permanecen subutilizados.

Ello produce:

- diferencias de presión;
- variaciones del rechazo;
- fouling localizado;
- envejecimiento desigual de las membranas.

Recomendación

Diseñar colectores simétricos y verificar hidráulicamente el equilibrio entre trenes.

Error 7. Selección inadecuada de bombas

La selección de bombas únicamente por presión y caudal nominal suele conducir a equipos trabajando lejos de su punto de máxima eficiencia.

Las consecuencias incluyen:

- elevado consumo energético;
- cavitación;
- vibraciones;
- incremento del mantenimiento.

Recomendación

Seleccionar bombas cuyo punto normal de operación se ubique próximo al **Best Efficiency Point (BEP)**.

Error 8. Automatización insuficiente

El control manual dificulta mantener condiciones hidráulicas estables.

Las principales consecuencias son:

- variaciones de recuperación;
- incremento del fouling;
- errores durante las limpiezas;
- dificultad para detectar fallas.

Recomendación

Implementar sistemas PLC y SCADA con monitoreo continuo de presión, caudal, conductividad, temperatura y consumo energético.

Error 9. Sistema CIP subdimensionado

Con frecuencia el sistema CIP recibe poca atención durante la ingeniería conceptual.

Ello produce:

- limpiezas poco eficientes;
- tiempos prolongados de parada;
- mayor consumo de reactivos;

- recuperación incompleta del flujo.

Recomendación

Diseñar el sistema CIP con capacidad suficiente para limpiar todos los trenes de membranas y prever futuras ampliaciones.

Error 10. Evaluar únicamente el costo de inversión

Seleccionar la alternativa de menor inversión inicial puede conducir a costos operativos considerablemente mayores.

En muchos proyectos, a lo largo de la vida de la instalación los costos de energía, de reposición de membranas y de mantenimiento llegan a superar con holgura al CAPEX.

Recomendación

Comparar siempre las opciones con el costo del ciclo de vida (Life Cycle Cost, LCC) como método de análisis.

Error 11. No considerar la disposición del concentrado

El concentrado generado por la nanofiltración contiene mayores concentraciones de sales y otros contaminantes retenidos.

Ignorar su gestión durante el diseño puede originar problemas ambientales, regulatorios y económicos.

Recomendación

Analizar desde la ingeniería conceptual las alternativas de manejo del concentrado, tales como:

- descarga controlada conforme a la normativa vigente;
- reutilización en procesos industriales;
- recirculación parcial cuando sea técnicamente viable;
- concentración adicional mediante tecnologías complementarias;
- evaporación o cristalización en aplicaciones específicas.

Error 12. No diseñar para la expansión futura

Muchas instalaciones incrementan su producción pocos años después de entrar en operación.

Cuando la expansión no fue prevista inicialmente, las modificaciones posteriores resultan complejas y costosas.

Recomendación

Reservar espacio físico, capacidad hidráulica, infraestructura eléctrica y capacidad del sistema de automatización para futuras ampliaciones.

Tabla 6.20

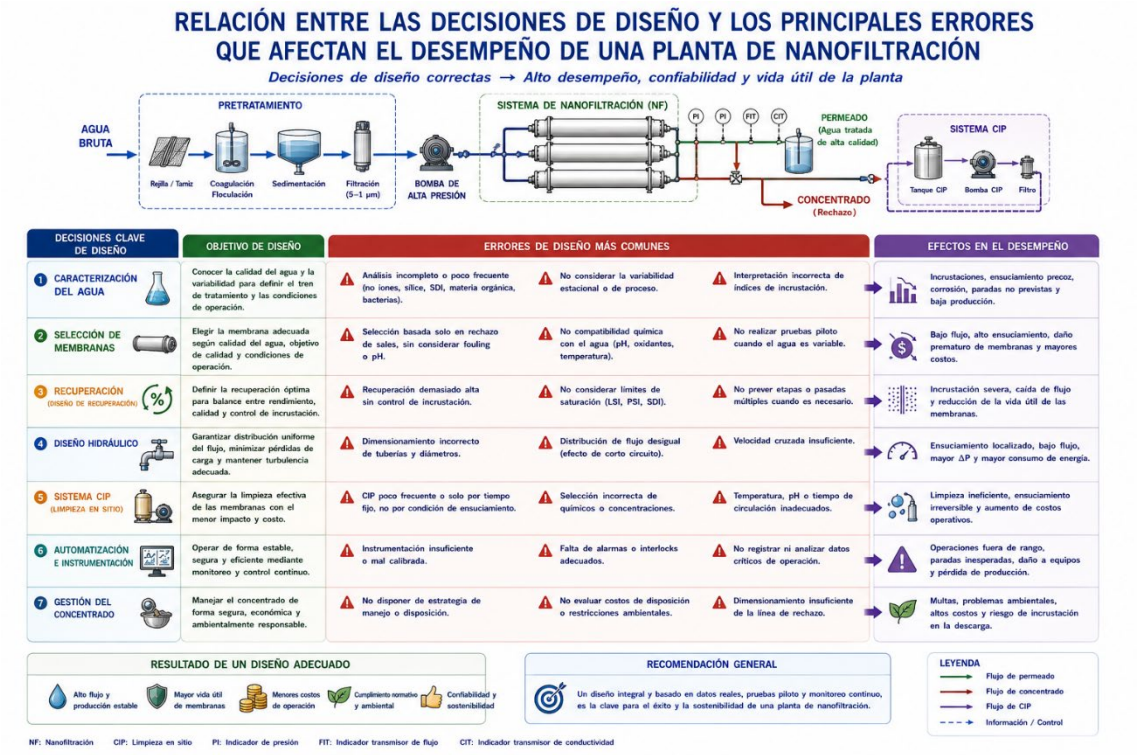
Prevención de los errores más comunes al diseñar plantas de nanofiltración

Error frecuente	Consecuencia principal	Recomendación
Caracterización incompleta del agua	Diseño inadecuado y mayor riesgo de fouling	Realizar caracterización fisicoquímica integral
Selección basada solo en el rechazo	Mayor consumo energético	Evaluar permeabilidad y costo del ciclo de vida
Recuperación excesiva	Scaling e incrustaciones	Optimizar mediante simulación química
Pretratamiento insuficiente	Ensuciamiento prematuro	Diseñar barreras adecuadas antes de la membrana
Ignorar la presión osmótica	Menor producción real	Incorporar presión osmótica en el dimensionamiento
Distribución hidráulica deficiente	Desbalance entre módulos	Diseñar colectores simétricos
Bombas fuera del BEP	Alto consumo energético	Seleccionar bombas de alta eficiencia
Automatización insuficiente	Operación inestable	Implementar PLC y SCADA
Sistema CIP subdimensionado	Limpiezas ineficientes	Dimensionar correctamente el sistema CIP
Evaluar solo el CAPEX	Elevado costo operativo	Aplicar análisis del costo del ciclo de vida
No planificar la gestión del concentrado	Problemas ambientales y regulatorios	Diseñar la estrategia de manejo del concentrado
No prever expansión	Elevado costo de ampliaciones	Reservar infraestructura para crecimiento

Nota. Elaboración propia.

Figura 6.11

Cómo las decisiones de diseño se conectan con los errores que más dañan el rendimiento de una planta de nanofiltración.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

El origen de casi todo lo que sale mal en la operación de una planta de nanofiltración está en las decisiones del arranque. Cuando el diseño se apoya en datos incompletos o solo en razones de costo, se encarecen la operación y la confiabilidad se resiente. Para reducir esos riesgos, ayudan los criterios de ingeniería aplicados con orden, la buena caracterización del agua, las pruebas piloto y el análisis del costo de ciclo de vida, con lo que se logran instalaciones robustas, eficientes y sostenibles.

6.12 LECCIONES APRENDIDAS

Lo estudiado deja ver que la nanofiltración es muy eficiente en el tratamiento avanzado de aguas, cuando se debe eliminar con selectividad sales multivalentes, materia orgánica natural y diversos contaminantes emergentes sin perder del todo la mineralización natural del agua.

A diferencia de la ultrafiltración, donde predomina la separación por tamaño, la nanofiltración incorpora fenómenos electroquímicos y termodinámicos que modifican significativamente el comportamiento del proceso. Como consecuencia, el diseño exige integrar conocimientos de hidráulica, química del agua, transporte de masa y evaluación económica.

Con la experiencia de las últimas décadas se pueden extraer varias lecciones, que son buenas prácticas para diseñar y operar plantas industriales.

6.12.1 LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DETERMINA LA CALIDAD DEL DISEÑO

El diseño de una planta de nanofiltración arranca con un análisis completo del agua de alimentación.

No basta con conocer la conductividad o los sólidos disueltos totales.

Es indispensable determinar:

- composición iónica;
- alcalinidad;
- dureza;
- sílice;
- materia orgánica;
- microorganismos;
- índices de saturación.

Un diseño nunca será mejor que la información con que se elaboró en la etapa de ingeniería.

6.12.2 LA PRESIÓN OSMÓTICA CONSTITUYE UNA VARIABLE DE DISEÑO

En nanofiltración, la presión que se aplica no equivale a toda la fuerza impulsora disponible.

Buena parte de ella se consume en contrarrestar la presión osmótica que generan las sales disueltas.

Por ello, el ingeniero debe considerar simultáneamente:

- presión hidráulica;
- presión osmótica;
- presión efectiva;
- recuperación del sistema.

Pasar por alto estos fenómenos hace que la planta se comporte distinto de lo diseñado.

6.12.3 EL CONTROL DEL SCALING COMIENZA DURANTE EL DISEÑO

Una de las mayores trabas operativas de la nanofiltración son las incrustaciones minerales.

Sin embargo, el scaling puede prevenirse mediante:

- adecuada selección de la recuperación;
- control del pH;
- utilización de antiincrustantes;
- simulaciones de equilibrio químico;
- diseño apropiado del pretratamiento.

Resulta mucho más barato evitar las incrustaciones que quitarlas una vez formadas.

6.12.4 EL FLUJO MÁXIMO NO CORRESPONDE AL PUNTO ÓPTIMO DE OPERACIÓN

Operar con el mayor flujo posible produce inicialmente una elevada productividad.

No obstante, también incrementa:

- polarización por concentración;
- fouling;
- scaling;
- consumo energético;
- frecuencia de limpieza.

Las plantas industriales mejor diseñadas trabajan con flujos moderados que proporcionan estabilidad operacional durante largos períodos.

6.12.5 LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEBE EVALUARSE DURANTE TODO EL CICLO DE VIDA

La energía es uno de los componentes principales del costo operativo.

Una pequeña mejora en la eficiencia hidráulica puede representar importantes ahorros económicos durante veinte o treinta años de operación.

Por ello, el diseño debe buscar simultáneamente:

- elevada productividad;
- bajo consumo energético;
- alta disponibilidad;
- mínima frecuencia de limpieza.

6.12.6 LA AUTOMATIZACIÓN INCREMENTA LA CONFIABILIDAD

Los sistemas modernos de nanofiltración requieren monitoreo continuo de las variables críticas.

La automatización permite:

- mantener condiciones hidráulicas estables;
- detectar desviaciones tempranas;
- optimizar las limpiezas;
- reducir errores operacionales;
- implementar mantenimiento predictivo.

En las instalaciones industriales grandes ya se acostumbra juntar PLC y SCADA con sistemas que analizan datos.

6.12.7 EL COSTO DEL CICLO DE VIDA CONSTITUYE EL PRINCIPAL CRITERIO ECONÓMICO

Se ha comprobado que la inversión inicial es solo una parte del costo total del proyecto.

Durante la vida útil de la planta adquieren mayor importancia:

- energía;
- reposición de membranas;
- productos químicos;
- mantenimiento;
- gestión del concentrado.

Por tanto, la tecnología se escoge mirando el costo del ciclo de vida más que el CAPEX por sí solo.

6.12.8 LA SOSTENIBILIDAD FORMA PARTE DEL DISEÑO

Las plantas modernas deben diseñarse considerando criterios ambientales desde la etapa conceptual.

Entre ellos destacan:

- reducción del consumo energético;
- disminución del consumo de productos químicos;
- optimización de la recuperación;
- reutilización del agua;
- gestión responsable del concentrado;
- reducción de emisiones indirectas de carbono.

En el diseño, hoy se pondera la sostenibilidad con igual peso que la eficiencia hidráulica y que la rentabilidad económica.

Tabla 6.21

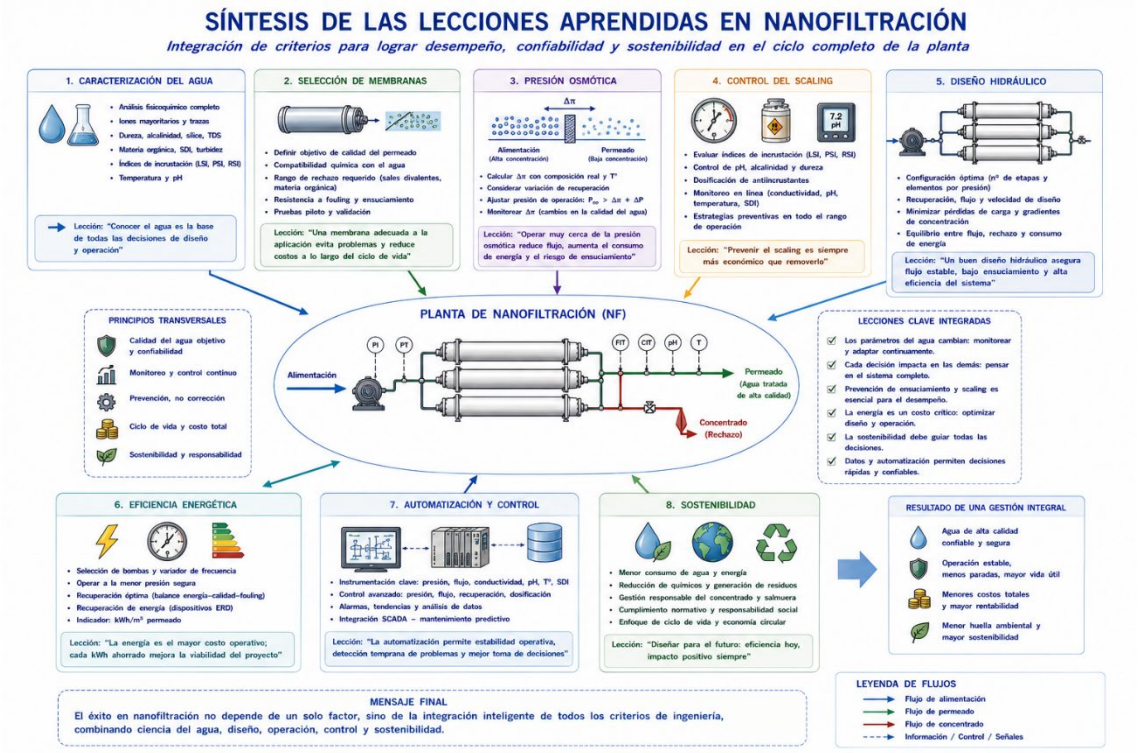
Lecciones aprendidas más importantes al diseñar y operar plantas de nanofiltración

Lección aprendida	Aplicación práctica
La caracterización del agua determina la calidad del diseño	Realizar análisis fisicoquímicos completos e identificar variaciones estacionales
La presión osmótica condiciona el desempeño	Incorporar la presión osmótica en el cálculo de la presión efectiva
El scaling debe prevenirse	Utilizar modelos de equilibrio químico, control de pH y antiincrustantes
El flujo máximo no es el flujo óptimo	Diseñar con criterios de estabilidad operacional
La eficiencia energética reduce el costo del ciclo de vida	Seleccionar bombas eficientes y optimizar la recuperación
La automatización incrementa la confiabilidad	Implementar PLC, SCADA y monitoreo continuo
El costo del ciclo de vida guía la selección tecnológica	Evaluar conjuntamente CAPEX y OPEX
La sostenibilidad es un criterio de diseño	Optimizar agua, energía, productos químicos y gestión del concentrado

Nota. Elaboración propia.

Figura 6.12

Síntesis de las lecciones aprendidas en nanofiltración.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión final del capítulo

Pocas tecnologías de la Ingeniería del Agua resultan tan versátiles como la nanofiltración, que remueve muy bien sales multivalentes y materia orgánica sin elevar demasiado el gasto energético. Al situarse entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa, permite plantear soluciones eficientes para acondicionar agua potable, tratar efluentes industriales, reutilizar aguas y cubrir muchos procesos de separación en la industria química y alimentaria.

Desde la perspectiva del diseño, la nanofiltración exige un enfoque multidisciplinario en el que convergen la hidráulica, la química del agua, la termodinámica de soluciones, la transferencia de masa, la automatización y la evaluación económica. El ingeniero debe comprender que el desempeño de una planta depende tanto de la membrana como de la adecuada integración entre el pretratamiento, el control del *scaling*, la distribución hidráulica, la estrategia de limpieza y la gestión energética.

Las tendencias actuales muestran una evolución hacia membranas de mayor permeabilidad, menor susceptibilidad al fouling, sistemas inteligentes de monitoreo y

herramientas de optimización basadas en inteligencia artificial. Estos avances permitirán diseñar plantas más eficientes, sostenibles y resilientes, capaces de responder a los crecientes desafíos asociados con la escasez de agua y la protección ambiental.

CAPÍTULO 7

ÓSMOSIS INVERSA

7.1 INTRODUCCIÓN

Ninguna otra tecnología de membranas pesa hoy tanto como la ósmosis inversa a la hora de producir agua de alta calidad y desalar aguas salobres y marinas. Gracias a ella, fuentes hídricas que se creían inservibles abastecen con confiabilidad a poblaciones, cultivos, fábricas y centrales de energía.

A lo largo de cinco décadas la ósmosis inversa cambió muchísimo, con nuevas membranas, materiales compuestos, recuperadores de energía y herramientas de automatización cada vez más avanzadas. El proceso consume ahora bastante menos energía, y por ello la desalación compite técnica y económicamente en muchas regiones del mundo.

Lo que distingue a la ósmosis inversa de sus parientes porosos (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración) son sus membranas densas, que frenan casi la totalidad de las sales presentes. Esa selectividad entrega agua de conductividad eléctrica muy baja, requisito indispensable en la industria farmacéutica, en alimentos y bebidas, en semiconductores, en calderas que generan vapor a alta presión y en el agua ultrapura de laboratorio.

Detrás de la ósmosis inversa hay termodinámica de soluciones. Sin intervención externa, el agua atraviesa sola una membrana semipermeable y va de la solución diluida a la concentrada: eso es la ósmosis. Si se presiona la solución concentrada por encima de la presión osmótica, el flujo se revierte, el agua pasa y casi todas las sales disueltas quedan atrás. Así funciona la ósmosis inversa.

Para el ingeniero, la presión osmótica figura entre las variables esenciales del diseño. Aunque cuenta en nanofiltración, en ósmosis inversa define de forma directa cuánta presión mínima se necesita para generar permeado, y de ella depende el consumo específico de energía.

Las principales aplicaciones industriales de la ósmosis inversa incluyen:

- desalación de agua de mar;

- tratamiento de aguas salobres;
- producción de agua potable;
- generación de agua ultrapura;
- industria farmacéutica;
- industria microelectrónica;
- industria alimentaria;
- reutilización de aguas residuales tratadas;
- producción de agua para calderas de alta presión;
- concentración de soluciones industriales.

Del total de plantas desalinizadoras que hay en el mundo, más del setenta por ciento usan ósmosis inversa. Pesan su eficiencia, su modularidad y el menor requerimiento energético que tiene frente a las tecnologías térmicas tradicionales.

Recuperadores de energía, membranas muy permeables y control inteligente han abaratado bastante el agua desalinizada. Por eso la ósmosis inversa es hoy una tecnología central para hacer frente a una escasez de agua que crece en todo el planeta, y se ha consolidado como una de las más relevantes.

Visto desde la sostenibilidad, esta tecnología tiene un papel estratégico en el logro del ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), es decir, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6. Suma fuentes de agua y mejora la seguridad hídrica allí donde escasean los recursos convencionales.

El capítulo parte por las bases científicas de la ósmosis y su inversión, y por cómo se transportan el agua y los solutos. Luego vienen las membranas comerciales, la hidráulica de diseño de plantas industriales y la recuperación de energía, con sus criterios de ingeniería, y se cierra con casos resueltos de agua salobre y de agua de mar.

Al terminar, el estudiante podrá plantear cómo sería, conceptualmente, una planta de ósmosis inversa; comparará alternativas de tecnología y estimará los indicadores técnicos, económicos y de energía que se usan para formular y evaluar proyectos de ingeniería.

7.2 FUNDAMENTOS DE LA ÓSMOSIS Y LA ÓSMOSIS INVERSA

Para entender la ósmosis inversa conviene revisar antes la ósmosis natural desde la termodinámica de soluciones. Los dos procesos responden a los mismos principios físicos y solo se distinguen en el sentido en que circula el agua y en que, en el segundo, una presión externa altera el equilibrio natural del sistema.

Las fuerzas impulsoras difieren. La microfiltración, la ultrafiltración y la nanofiltración se mueven principalmente por la presión hidráulica aplicada. La ósmosis inversa obliga a considerar a la vez la presión hidráulica y la osmótica, pues esta última es la resistencia termodinámica que se debe vencer para obtener permeado.

La presión osmótica no se debe confundir con pérdida de carga ni con resistencia mecánica. Nace de que el potencial químico del agua difiere entre una cara de la membrana y la otra, y por eso se la considera una propiedad termodinámica propia de las soluciones.

De ahí que solo se obtenga permeado cuando la presión aplicada supera la presión osmótica de la solución de alimentación.

Esta diferencia de concepto es clave en toda la ósmosis inversa y se tratará con detalle en las secciones que vienen.

Interpretación ingenieril

Entre quienes trabajan con membranas se repite que la nanofiltración funciona como puente entre los procesos porosos y la ósmosis inversa. Tiene sentido al notar que, en esta última, la presión osmótica ya no es secundaria: gobierna la hidráulica, el gasto de energía y si el proyecto es viable económicamente.

7.2.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ÓSMOSIS INVERSA

Pocas tecnologías muestran tan bien cómo un hallazgo científico acaba resolviendo un desafío enorme de la humanidad, el acceso al agua dulce, como la ósmosis inversa a lo largo de su historia.

El fenómeno de la ósmosis se observó hace siglos, pero usarlo en la industria solo fue posible cuando hubo membranas semipermeables muy selectivas y con la resistencia mecánica necesaria para soportar presiones altas.

Las primeras observaciones experimentales de la ósmosis datan del siglo XVIII. Varios investigadores comprobaron entonces que el agua podía pasar de manera espontánea a través de ciertas membranas naturales que separaban soluciones de distinta concentración.

Aun así, durante muchos años el fenómeno fue apenas una curiosidad científica, porque no existían materiales apropiados para llevarlo a la industria.

Todo arrancó hacia 1950 en UCLA, en Los Ángeles, que pertenece a la Universidad de California, y poco después en la de Florida, donde se empezó a investigar cómo sacar agua potable del agua de mar.

Las membranas de entonces eran muy selectivas, pero dejaban pasar tan poca agua que no servían para uso industrial.

En 1960 llegó el avance decisivo: Sidney Loeb y Srinivasa Sourirajan crearon la primera membrana asimétrica hecha con acetato de celulosa. Con ella se lograba un alto rechazo de sales y, a la vez, flujos de permeado utilizables en la práctica.

Este desarrollo marcó el nacimiento de la moderna tecnología de ósmosis inversa.

Durante las décadas siguientes se produjeron avances continuos en:

- materiales poliméricos;
- procesos de fabricación;
- diseño hidráulico de módulos;
- automatización;
- recuperación de energía.

En la década de 1980 aparecieron las membranas compuestas de película delgada (Thin Film Composite, TFC), fabricadas mediante polimerización interfacial.

Varias ventajas importantes hicieron que estas membranas fueran desplazando, poco a poco, al acetato de celulosa:

- mayor permeabilidad;
- mayor rechazo de sales;
- mayor estabilidad química;
- mejor resistencia mecánica;

- mayor vida útil.

Después llegaron los dispositivos de recuperación de energía, con los que las plantas desalinizadoras bajaron sensiblemente su consumo.

Hoy muchas instalaciones modernas trabajan con consumos específicos menores a la mitad de los que tenían las primeras plantas comerciales, levantadas en la década de 1970.

La evolución reciente se caracteriza por la incorporación de:

- membranas de alta permeabilidad;
- sistemas avanzados de automatización;
- inteligencia artificial aplicada al mantenimiento predictivo;
- monitoreo en línea;
- simulación computacional;
- optimización energética.

Con estos avances, la ósmosis inversa es hoy la tecnología dominante para desalar agua de mar y tratar aguas salobres.

Tabla 7.1

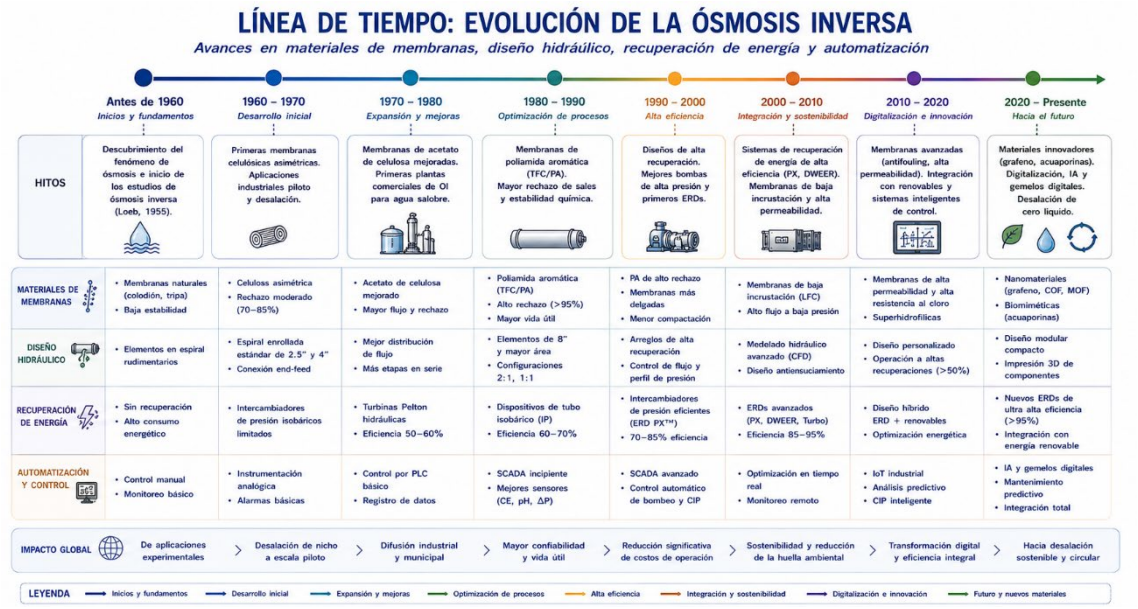
Evolución histórica de la tecnología de ósmosis inversa

Período	Desarrollo tecnológico
Siglo XVIII	Primeras observaciones del fenómeno de ósmosis
Década de 1950	Primeros estudios para desalación mediante membranas
1960	Desarrollo de la membrana asimétrica de Loeb y Sourirajan
Década de 1970	Primeras plantas comerciales de desalación
Década de 1980	Aparición de membranas Thin Film Composite (TFC)
Década de 1990	Automatización y expansión mundial de la tecnología
Siglo XXI	Recuperación de energía, digitalización e inteligencia artificial

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.1

Línea de tiempo de la evolución de la ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011), Greenlee et al. (2009) y Crittenden et al. (2012).

7.2.2 PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS

Para explicar la ósmosis inversa hay que ir a la termodinámica de soluciones y, en especial, al potencial químico.

Supongamos dos soluciones de distinta concentración con una membrana semipermeable ideal entre ambas. El agua pasa por sí sola de la menos concentrada a la más concentrada.

Ese movimiento sigue hasta llegar a un equilibrio, en el que el potencial químico del agua es el mismo a ambos lados de la membrana.

El flujo espontáneo de agua recibe el nombre de **ósmosis**.

Lo que provoca el fenómeno no es un diferencial de presión hidráulica; es un desnivel de energía libre ligado a cuántos solutos hay.

Por eso el agua siempre se desplaza hacia la solución de menor potencial químico.

Pero si sobre la solución concentrada se ejerce una presión externa mayor que la osmótica, el flujo natural cambia de dirección.

El agua entonces pasa por la membrana y deja casi todas las sales disueltas del otro lado.

Este proceso recibe el nombre de **ósmosis inversa**.

En términos de energía, la presión aplicada aporta el trabajo que se necesita para superar la resistencia termodinámica que impone la presión osmótica.

Potencial químico del agua

El potencial químico representa la energía libre molar disponible para realizar trabajo.

En soluciones acuosas, la presencia de solutos disminuye el potencial químico del agua.

Por ello:

- el agua pura posee un potencial químico mayor;
- las soluciones concentradas presentan un potencial químico menor.

La diferencia entre ambos potenciales constituye el origen del flujo osmótico.

Energía libre de Gibbs

Para interpretar hacia dónde se mueve espontáneamente el agua sirve la energía libre de Gibbs y su variación.

Todo proceso espontáneo ocurre en la dirección que produce una disminución de dicha energía.

Justamente la ósmosis es la vía por la cual el sistema desciende a un estado de energía libre menor.

Interpretación ingenieril

Al diseñar plantas industriales, la presión osmótica suele calcularse con ecuaciones simplificadas. Aun así, el proceso se explica por la tendencia al equilibrio termodinámico, y entenderlo ayuda a interpretar por qué el flujo de permeado disminuye con agua de alimentación más salina, por qué sube la presión que exige la operación y por qué vale la pena optimizar la recuperación.

7.2.3 CONCEPTO DE PRESIÓN OSMÓTICA

La presión osmótica, propiedad termodinámica de las soluciones, es la presión mínima que hay que ejercer para frenar el paso espontáneo de agua por una membrana semipermeable.

Dicho de otro modo, es la presión que mantiene en equilibrio a dos soluciones de concentración distinta.

Cuando la presión aplicada es inferior a la presión osmótica:

- no existe producción de permeado;
- el agua continúa desplazándose por ósmosis.

Cuando la presión aplicada es igual a la presión osmótica:

- el sistema alcanza el equilibrio;
- desaparece el flujo neto de agua.

Cuando la presión aplicada supera la presión osmótica:

- comienza el proceso de ósmosis inversa;
- se produce agua permeada;
- las sales permanecen mayoritariamente retenidas.

De este concepto parte el diseño hidráulico entero de una planta de ósmosis inversa. El apartado siguiente lo formula con matemáticas mediante la ecuación de Van't Hoff, y la aplica a aguas salobres y a agua marina. Así se verá por qué una planta marina opera a presiones mucho más altas que las de nanofiltración o aguas salobres, y el estudiante contará con las herramientas para entenderlo.

7.2.4 PRESIÓN OSMÓTICA Y ECUACIÓN DE VAN'T HOFF

Como propiedad coligativa, la presión osmótica depende sobre todo de cuántas partículas hay disueltas en el solvente. Para soluciones muy diluidas se calcula con la ecuación de Jacobus Henricus Van't Hoff, que establece una analogía entre las soluciones diluidas y los gases ideales.

Con esta ecuación se hace el diseño preliminar de los sistemas de ósmosis inversa, pues permite estimar la presión mínima con la que empieza a producirse permeado.

La expresión matemática es:

$$\pi = iCRT$$

donde

π = presión osmótica (Pa)

i = factor de Van't Hoff

C = concentración molar (mol/m³)

R = constante universal de los gases

(8,314 J/mol·K)

T = temperatura absoluta (K)

Esta ecuación indica que la presión osmótica aumenta cuando se incrementa:

- la concentración de solutos;
- la temperatura;
- el número de especies iónicas presentes.

Por lo tanto, mientras más salina sea el agua, más presión hidráulica hará falta para obtener permeado.

Significado físico del factor de Van't Hoff

El factor **i** representa el número de partículas en que se disocia un compuesto al disolverse en agua.

Por ejemplo:

Tabla 7.2

Valores aproximados del factor de Van't Hoff para algunos compuestos comunes.

Compuesto	Disociación	Factor i
Glucosa	No se disocia	1
NaCl	$Na^+ + Cl^-$	≈2
$CaCl_2$	$Ca^{2+} + 2Cl^-$	≈3
$MgSO_4$	$Mg^{2+} + SO_4^{2-}$	≈2

Nota. Elaboración propia.

Como se ve, las sales ejercen una presión osmótica mucho mayor que las moléculas orgánicas sin ionizar, ya que en la solución hay más partículas.

Ejemplo 7.1. Cálculo simplificado de la presión osmótica

Se desea estimar la presión osmótica aproximada de una solución de cloruro de sodio con concentración de 0,60 mol/L a una temperatura de 25 °C.

Datos

$$i = 2$$

$$C = 0{,}60 \text{ mol/L}$$

$$T = 25 \text{ °C} = 298 \text{ K}$$

$$R = 0{,}08314 \text{ L·bar/mol·K}$$

Aplicando la ecuación:

$$\pi = iCRT$$

Sustituyendo:

$$\pi = 2 \times 0{,}60 \times 0{,}08314 \times 298$$

$$\pi = 29{,}7 \text{ bar}$$

Por lo tanto,

$\pi \approx 30$ bar

Interpretación ingenieril

Este resultado indica que una presión de aproximadamente **30 bar** únicamente equilibraría el sistema. Para producir permeado será necesario aplicar una presión superior, ya que además deberán vencerse las pérdidas de carga hidráulicas y mantenerse una fuerza impulsora efectiva para el transporte del agua.

Este ejemplo permite comprender por qué las plantas de agua de mar operan normalmente con presiones comprendidas entre **55 y 70 bar**, mientras que las plantas destinadas al tratamiento de aguas salobres suelen operar entre **10 y 25 bar**.

7.2.5 LIMITACIONES DE LA ECUACIÓN DE VAN'T HOFF

Van't Hoff dejó una ecuación que sirve mucho para el análisis conceptual, aunque se queda corta cuando las soluciones están concentradas.

La principal hipótesis del modelo consiste en asumir un comportamiento ideal de la solución.

Sin embargo, las aguas naturales contienen mezclas complejas de:

- sodio;
- calcio;
- magnesio;
- potasio;
- cloruros;
- sulfatos;
- bicarbonatos;
- sílice;
- materia orgánica.

Dichas especies interaccionan y modifican la actividad química tanto del agua como de los iones.

En consecuencia, la presión osmótica verdadera puede diferir mucho del valor que arroja Van't Hoff.

Para la ingeniería de detalle, entonces, se aplican modelos termodinámicos más exigentes que se basan en:

- coeficientes de actividad;
- fuerza iónica;
- ecuaciones de Pitzer;
- modelos de Bromley;
- modelos implementados en software especializado.

En la industria suelen emplearse simuladores comerciales que obtienen automáticamente la presión osmótica, incluso con composiciones químicas complejas.

Interpretación ingenieril

Van't Hoff vale para entender el fenómeno y hacer cálculos preliminares. Cuando se diseñan plantas grandes, sin embargo, la presión osmótica debe obtenerse con modelos más precisos, en particular con agua de mar o salmueras de concentración alta.

7.2.6 DIFERENCIA ENTRE ÓSMOSIS Y ÓSMOSIS INVERSA

Visto desde la termodinámica, ósmosis y ósmosis inversa son un único fenómeno físico, y solo cambia hacia dónde fluye el agua.

Durante la ósmosis:

- el flujo ocurre espontáneamente;
- no se requiere aporte externo de energía;
- el agua se desplaza hacia la solución más concentrada.

Durante la ósmosis inversa:

- el flujo ocurre en sentido contrario;
- requiere aporte de energía mecánica mediante bombas;
- el agua atraviesa la membrana dejando retenidas las sales.

Tabla 7.3

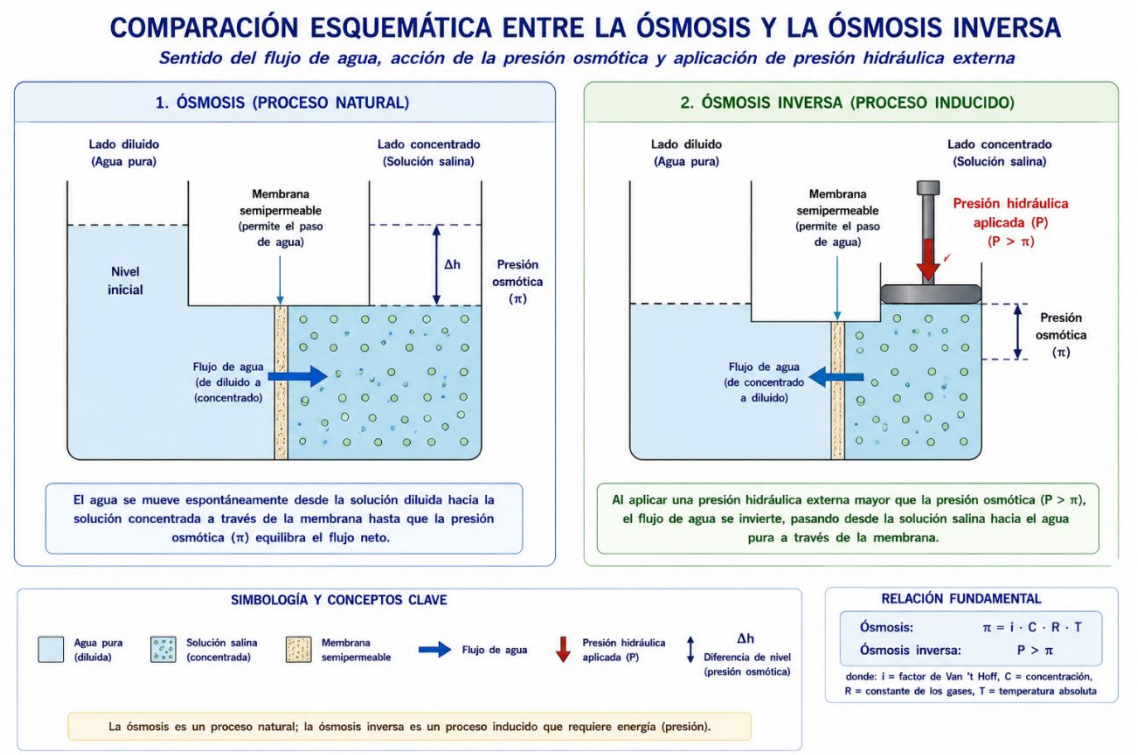
Comparación entre ósmosis y ósmosis inversa

Característica	Ósmosis	Ósmosis inversa
Dirección del flujo	Solución diluida → solución concentrada	Solución concentrada → solución diluida
Energía externa	No requiere	Requiere presión hidráulica
Fuerza impulsora	Diferencia de potencial químico	Presión superior a la presión osmótica
Estado del proceso	Espontáneo	No espontáneo
Aplicaciones	Fenómenos biológicos	Desalación y producción de agua ultrapura

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.2

Comparación esquemática entre la ósmosis y la ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011) y Crittenden et al. (2012).

Reflexión ingenieril

La presión osmótica marca la frontera entre dos mundos: el de la desalación y el de las membranas que trabajan a baja presión. En la microfiltración, la ultrafiltración y gran parte de la nanofiltración mandan la hidráulica y el transporte de masa; con la ósmosis inversa mandan principios termodinámicos. Quien diseña debe ver esta presión como una propiedad de la solución, no como energía perdida, y como el límite físico inferior para producir permeado.

7.2.7 TRANSPORTE DE AGUA Y SOLUTOS

Las membranas de microfiltración, ultrafiltración y en parte de nanofiltración transportan por poros bastante definidos. Las de ósmosis inversa son densísimas y casi carecen de poros continuos, de modo que ni el agua ni los solutos circulan libremente.

Como consecuencia, el mecanismo de transporte es completamente diferente.

Agua y solutos se disuelven primero en la capa activa y después difunden a través de ella, movidos por gradientes de potencial químico.

Este comportamiento se describe mediante el **modelo de solución-difusión**, actualmente aceptado como el modelo fundamental para explicar el funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa.

El proceso comprende tres etapas sucesivas:

- adsorción del agua sobre la superficie de la membrana;
- difusión a través de la capa activa;
- desorción hacia el lado del permeado.

Un proceso similar ocurre para los solutos, aunque con velocidades considerablemente menores.

Esa diferencia entre ambas velocidades es lo que explica el alto rechazo de sales de la ósmosis inversa.

7.2.7.1 Transporte del agua

El agua constituye la especie con mayor movilidad dentro de la membrana.

Su transporte depende principalmente de:

- presión hidráulica aplicada;
- presión osmótica;
- temperatura;
- permeabilidad de la membrana.

El flujo volumétrico de agua puede expresarse mediante:

$$Jw = A\ (\Delta P - \Delta \pi)$$

donde

$$Jw = \text{flujo de agua } (m^3/m^2 \cdot s)$$

A = coeficiente de permeabilidad hidráulica

ΔP = diferencia de presión hidráulica

$\Delta \pi$ = diferencia de presión osmótica

Es probable que ninguna otra ecuación pese tanto en la ingeniería de ósmosis inversa como esta.

Puede observarse que el flujo depende únicamente de la **presión efectiva**.

Cuando:

$$\Delta P = \Delta \pi$$

el flujo resulta:

$$Jw = 0$$

Es decir, no existe producción de permeado.

Únicamente cuando:

$\Delta P > \Delta \pi$

se inicia el proceso de ósmosis inversa.

Interpretación ingenieril

De aquí se entiende por qué las desalinizadoras necesitan bombas que operen a alta presión. Parte de lo que se aplica impulsa el agua, y otra parte se destina a superar la presión osmótica que originan las sales en solución.

7.2.7.2 Transporte de solutos

Los solutos también atraviesan parcialmente la membrana.

Su transporte se produce principalmente por difusión y puede describirse mediante:

$$Js = B\,(Cf - Cp)$$

donde

Js = flujo de soluto

B = coeficiente de permeabilidad del soluto

Cf = concentración en la alimentación

Cp = concentración del permeado

El coeficiente **B** representa la facilidad con la cual un determinado soluto atraviesa la membrana.

Las membranas de mayor calidad presentan:

- elevado valor de A;
- reducido valor de B.

Esta combinación permite obtener simultáneamente:

- altos caudales de producción;
- elevados porcentajes de rechazo.

Interpretación ingenieril

Para el diseño, la membrana ideal dejaría pasar el agua sin resistencia alguna y rechazaría por completo todos los solutos. Eso no se logra físicamente, pero el avance tecnológico se acerca cada vez más a ese comportamiento.

7.2.7.3 Flujo neto de permeado

Lo que realmente se mide como flujo en operación resulta de combinar el transporte de agua con el de solutos.

Cuando aumenta la concentración salina:

- aumenta la presión osmótica;
- disminuye la fuerza impulsora;
- disminuye el flujo de agua.

Esto aclara la diferencia que hay entre una planta de agua salobre y una de agua de mar.

Por ejemplo:

- una planta de agua salobre puede producir elevados caudales con presiones relativamente moderadas;
- para lograr un flujo igual, el agua de mar exige en la planta presiones mucho mayores.

La causa no está solo en la membrana: pesa sobre todo la presión osmótica propia de cada tipo de agua.

7.2.7.4 Rechazo de sales

El desempeño de una membrana se expresa normalmente mediante el porcentaje de rechazo.

La ecuación utilizada es:

$$R = [(Cf - Cp) / Cf] \times 100$$

donde

$$R = \text{rechazo (\%)}$$

$$Cf = \text{concentración de alimentación}$$

$$Cp = \text{concentración del permeado}$$

El rechazo depende de:

- tipo de membrana;
- presión de operación;
- temperatura;
- composición química;
- recuperación;
- estado de la membrana.

Por eso un mismo elemento puede mostrar porcentajes de rechazo distintos según las condiciones de operación.

Ejemplo 7.2. Cálculo del rechazo

Una planta trata agua con:

$$Cf = 35\,000 \text{ mg/L}$$

La concentración medida en el permeado es:

$$Cp = 250 \text{ mg/L}$$

Calcular el rechazo.

Aplicando:

$$R = [(35000 - 250)/35000] \times 100$$

se obtiene:

$$R = 99{,}29\ \%$$

Es el desempeño que se espera de una membrana moderna pensada para desalar agua de mar.

Interpretación ingenieril

Obsérvese cómo una variación mínima de concentración en el permeado mueve mucho el porcentaje de rechazo. Por eso en las plantas industriales se vigila de manera constante la conductividad del permeado, que indica de modo indirecto cómo están las membranas.

7.2.7.5 Influencia de la temperatura

La temperatura modifica significativamente el comportamiento hidráulico de las membranas.

Al aumentar la temperatura:

- disminuye la viscosidad del agua;
- aumenta la difusividad;
- aumenta la permeabilidad hidráulica;
- aumenta ligeramente el paso de sales.

Como consecuencia:

- aumenta el flujo de permeado;
- puede disminuir ligeramente el rechazo.

Por ello los fabricantes suelen entregar factores de corrección de temperatura, con los que se compara el desempeño de la planta en distintas condiciones ambientales.

Interpretación ingenieril

Durante la puesta en marcha de una planta, el ingeniero debe normalizar los caudales medidos a una temperatura de referencia, generalmente **25 °C**, para evitar interpretar erróneamente variaciones debidas únicamente a cambios térmicos.

Tabla 7.4

Variables que controlan el transporte a través de una membrana de ósmosis inversa

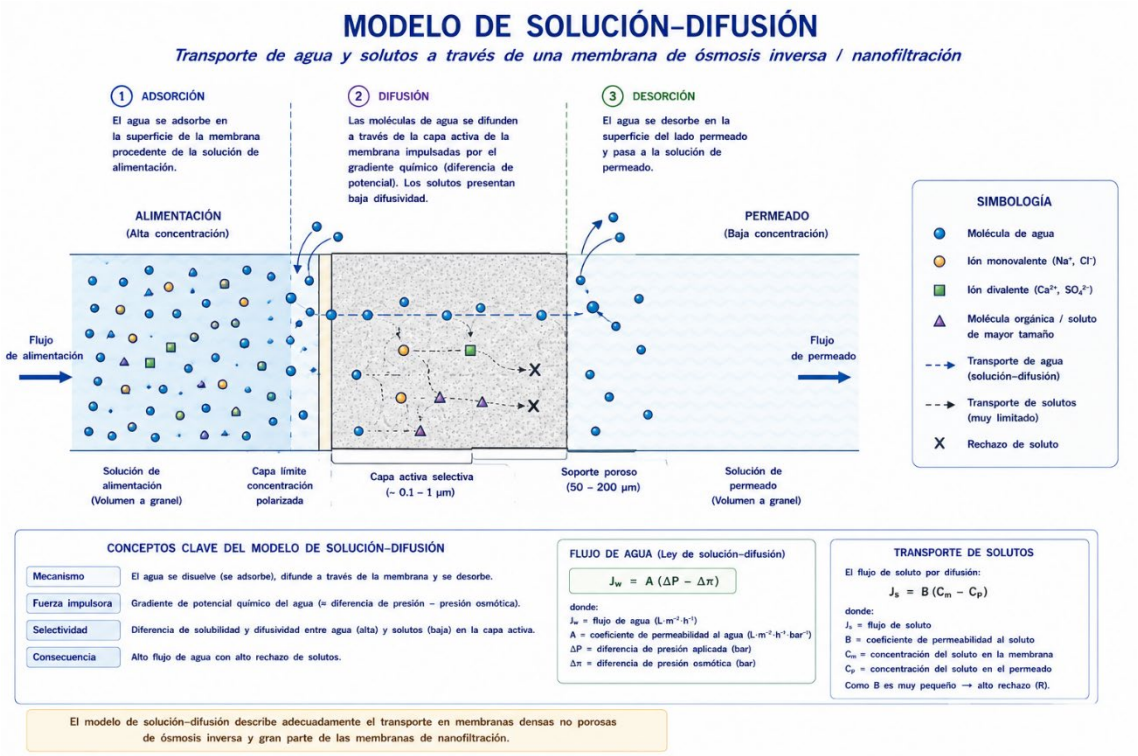
Variable	Influencia principal
Presión hidráulica	Incrementa el flujo de agua
Presión osmótica	Reduce la fuerza impulsora
Temperatura	Incrementa la permeabilidad hidráulica
Concentración salina	Incrementa la presión osmótica
Permeabilidad de la membrana (A)	Determina la productividad
Permeabilidad del soluto (B)	Determina el rechazo

Variable	Influencia principal
Estado de la membrana	Modifica simultáneamente flujo y rechazo

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.3

Representación esquemática del modelo de solución-difusión.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Strathmann (2011), Mulder (1996) y Crittenden et al. (2012).

Reflexión ingenieril

El modelo de solución-difusión sostiene a la ingeniería moderna de la ósmosis inversa, porque enlaza directamente lo que la membrana es con las variables de operación. Con él se ve cómo presión, temperatura, salinidad y permeabilidad definen a la vez cuánta agua sale y cuántas sales se rechazan. Más adelante, en los capítulos de diseño hidráulico, sus ecuaciones servirán para calcular el tamaño de las bombas de alta presión, estimar la superficie de membrana necesaria, evaluar la energía consumida y mejorar la recuperación de la planta.

7.2.8 POLARIZACIÓN POR CONCENTRACIÓN Y LIMITACIONES DEL TRANSPORTE

Durante la operación, el agua cruza la capa activa de la membrana de ósmosis inversa y casi todas las sales quedan sobre su superficie.

De ahí que, junto a la membrana, la concentración de sales vaya subiendo y supere poco a poco a la que existe en el seno del flujo de alimentación.

Este fenómeno recibe el nombre de **polarización por concentración** (*Concentration Polarization*).

En principio la polarización es reversible y se presenta con normalidad en cualquier sistema de ósmosis inversa. Si alcanza valores altos, sin embargo, impulsa el fouling y el scaling, y el rendimiento de la planta se deteriora poco a poco.

En ingeniería, la polarización por concentración es uno de los principales límites a la productividad de las membranas.

7.2.8.1 Formación de la capa límite

La corriente de alimentación circula paralelamente a la superficie de la membrana.

Por la viscosidad, el fluido se frena a medida que se acerca a la pared, y en la superficie de la membrana su velocidad es casi nula.

Como resultado se forma una región denominada **capa límite hidrodinámica**.

En esta región las sales se transportan sobre todo por difusión; fuera de ella domina el transporte convectivo.

Cuando el agua cruza la membrana, las sales que esta retiene se van acumulando en esa capa límite, y la concentración en la superficie termina por encima de la corriente principal.

La diferencia entre ambas concentraciones constituye el origen de la polarización por concentración.

Interpretación ingenieril

A mayor espesor de la capa límite, más sales se acumulan sobre la membrana y menos permeado se obtiene. Por eso uno de los objetivos centrales del diseño hidráulico es adelgazar esa capa con velocidades tangenciales adecuadas.

7.2.8.2 Balance de transporte de sales

La concentración superficial resulta del equilibrio entre dos mecanismos opuestos.

Por un lado, el flujo de agua lleva sales hacia la membrana de manera continua por convección.

Por otra, la difusión molecular tiende a devolver dichas sales hacia la corriente principal.

Cuando ambos mecanismos alcanzan el equilibrio dinámico, la concentración superficial permanece aproximadamente constante.

Este comportamiento puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$Cm = Cb \cdot \exp(Jw / k)$$

donde

Cm = concentración en la superficie de la membrana

Cb = concentración en la corriente principal

Jw = flujo de agua

k = coeficiente de transferencia de masa

Según la ecuación, la concentración en la superficie crece exponencialmente si sube el caudal de agua que atraviesa o si cae el valor del coeficiente de transferencia de masa.

Significado del coeficiente de transferencia de masa

El coeficiente **k** representa la capacidad del flujo para transportar las sales acumuladas desde la superficie de la membrana hacia el seno de la corriente.

Su valor depende principalmente de:

- velocidad tangencial;
- viscosidad;
- difusividad del soluto;
- geometría del canal;
- espaciadores hidráulicos.

Un mayor valor de **k** implica una menor polarización por concentración.

7.2.8.3 Consecuencias sobre la presión osmótica

Uno de los efectos principales de la polarización es que sube la presión osmótica local.

El diseño suele calcular la presión osmótica con la concentración promedio de alimentación; pero en la membrana actúa una presión osmótica más alta, dada la elevada concentración en su superficie.

Como consecuencia:

- disminuye la presión efectiva disponible;
- disminuye el flujo de permeado;
- aumenta el consumo energético;
- aumenta el riesgo de precipitación de sales.

Con esto se entiende que el desempeño real a menudo no coincida con el obtenido de cálculos simplificados.

Interpretación ingenieril

En el diseño de plantas industriales hay que diferenciar la concentración de alimentación de la que existe junto a la membrana. La bomba de alta presión tiene que vencer la presión osmótica determinada por esta última, no por la primera.

7.2.8.4 Influencia de la velocidad tangencial

Entre las variables operacionales, la velocidad tangencial es de las que más ayudan a controlar la polarización por concentración.

Cuando aumenta la velocidad del flujo:

- disminuye el espesor de la capa límite;
- aumenta el coeficiente de transferencia de masa;
- disminuye la concentración superficial;
- disminuye la presión osmótica local.

Sin embargo, velocidades excesivamente elevadas incrementan:

- pérdidas de carga;
- consumo energético;
- desgaste hidráulico de los espaciadores.

Por tanto, el diseño debe equilibrar el control de la polarización con la eficiencia energética.

7.2.8.5 Influencia de la recuperación

La recuperación del sistema también modifica significativamente la polarización por concentración.

A medida que aumenta la recuperación:

- disminuye el caudal de concentrado;
- aumenta la concentración de sales;
- aumenta la presión osmótica;
- aumenta el riesgo de incrustaciones.

Por esa causa, las instalaciones de agua marina trabajan con recuperaciones bastante menores que las dedicadas a aguas salobres.

Ejemplo comparativo

Una planta de agua salobre puede operar con recuperaciones superiores al 80 % debido a su menor contenido de sales.

En cambio, una planta de agua de mar generalmente trabaja con recuperaciones comprendidas entre el 40 % y el 50 %, evitando alcanzar condiciones de sobresaturación que favorezcan la precipitación de sales poco solubles.

Tabla 7.5

Variables que influyen sobre la polarización por concentración en OI

Variable	Efecto sobre la polarización
Flujo de permeado	Incrementa la polarización cuando aumenta
Velocidad tangencial	Disminuye la polarización cuando aumenta
Concentración salina	Incrementa la presión osmótica superficial
Temperatura	Modifica la difusión y la viscosidad
Recuperación	Incrementa la concentración superficial
Espaciadores hidráulicos	Favorecen la mezcla y reducen la capa límite

Nota. Elaboración propia.

7.2.8.6 Polarización y límite de flujo

Existe un flujo a partir del cual seguir aumentando la presión aplicada ya no incrementa apreciablemente el permeado que se produce.

Este comportamiento se conoce como **flujo límite** (*Limiting Flux*).

Cuando el sistema opera próximo a este límite:

- la concentración superficial aumenta rápidamente;
- la presión osmótica local crece de manera considerable;
- se acelera la formación de incrustaciones;
- disminuye la eficiencia energética.

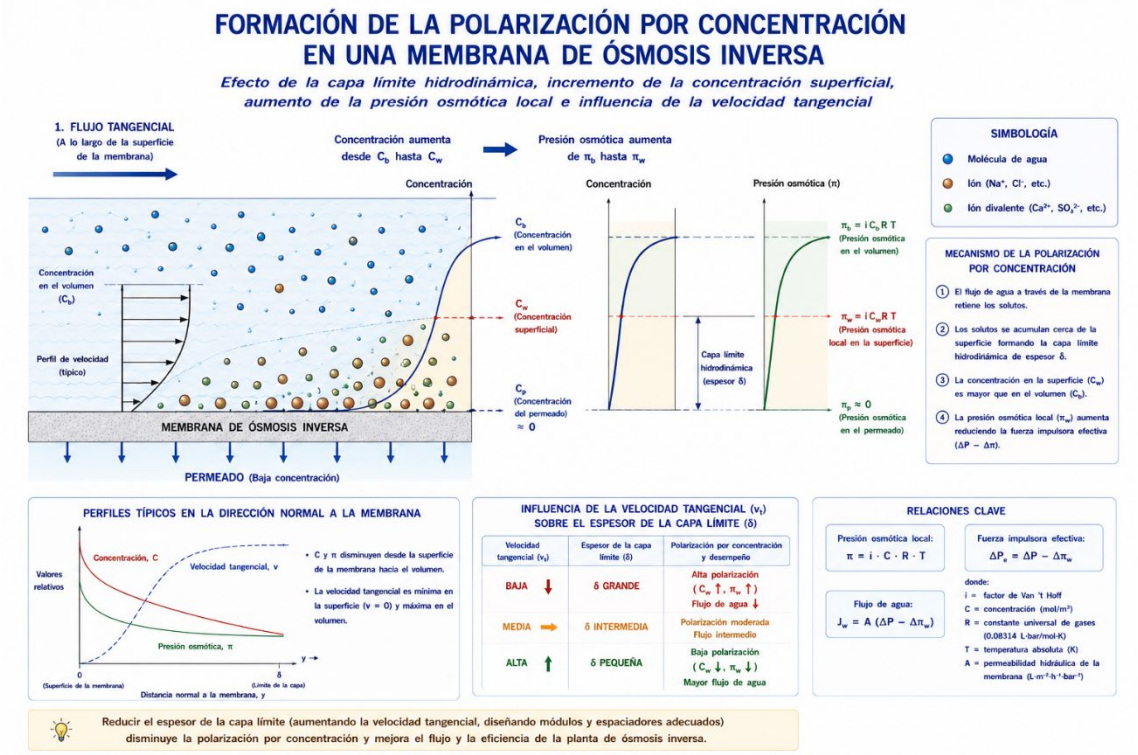
Por tal motivo, lo normal es diseñar las plantas para que trabajen debajo del flujo límite, dejando un margen de seguridad frente al riesgo de fouling y scaling.

Interpretación ingenieril

El flujo máximo que técnicamente se puede lograr rara vez es el más conveniente en términos económicos. Si la planta opera algo debajo del flujo límite, se limpia con menor frecuencia, las membranas duran más y el costo total durante el ciclo de vida del sistema se reduce.

Figura 7.4

Así se forma la polarización por concentración sobre una membrana de ósmosis inversa. El esquema muestra la capa límite hidrodinámica, el aumento gradual de la concentración en la superficie, el alza local de la presión osmótica y cómo la velocidad tangencial modifica el espesor de dicha capa.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011), Greenlee et al. (2009) y Crittenden et al. (2012).

Reflexión ingenieril

Hidráulica y química del agua se encuentran, en los sistemas de ósmosis inversa, en la polarización por concentración. Aunque sea reversible, de su control dependen en buena medida la producción de la planta, su gasto de energía y su estabilidad operacional. Quien diseña debe tener presente que lo óptimo no es subir la presión, sino impedir que

las sales se vayan acumulando sobre la membrana, combinando recuperación, velocidad tangencial, módulos bien configurados y una geometría hidráulica adecuada.

7.2.9 MODELO DE SOLUCIÓN-DIFUSIÓN Y ECUACIONES FUNDAMENTALES DE DISEÑO

El de solución-difusión es el modelo teórico que más se acepta para describir cómo se transportan el agua y los solutos en las membranas densas de ósmosis inversa.

Plantea que la membrana carece de poros abiertos por donde las especies químicas pasen libres. El agua y los solutos deben antes disolverse en la matriz polimérica y luego difundirse por ella, empujados por gradientes de potencial químico.

Con él se obtienen relaciones cuantitativas entre presión aplicada, presión osmótica, flujo de agua y rechazo de sales; por eso sirve de cimiento a los programas comerciales con que se simulan y diseñan plantas.

Los principales parámetros del modelo son:

- permeabilidad hidráulica (**A**);
- permeabilidad al soluto (**B**);
- presión transmembrana;
- presión osmótica;
- concentración de alimentación;
- concentración del permeado;
- concentración superficial de la membrana.

Si estos parámetros se determinan bien, se puede predecir cómo se comportará una membrana en distintas condiciones de operación.

7.2.9.1 Ecuación del flujo de agua

La ecuación fundamental del transporte de agua se expresa mediante:

$$Jw = A\ (\Delta P - \Delta \pi)$$

donde:

Jw = flujo de agua ($L/m^2 \cdot h$ o m/s)

A = coeficiente de permeabilidad hidráulica

ΔP = diferencia de presión hidráulica

$\Delta \pi$ = diferencia de presión osmótica

Esta expresión señala que el flujo de agua es directamente proporcional a la presión efectiva disponible.

Si la presión aplicada aumenta, el flujo también aumenta.

Al contrario, si la presión osmótica sube porque aumenta la salinidad, la fuerza impulsora baja y el flujo disminuye.

Significado del coeficiente A

El coeficiente **A** representa la facilidad con la cual el agua atraviesa la membrana.

Su valor depende de:

- material de la membrana;
- espesor de la capa activa;
- temperatura;
- grado de compactación;
- estado de limpieza.

Las membranas modernas buscan maximizar este parámetro sin comprometer el rechazo de sales.

Interpretación ingenieril

Una membrana con un elevado coeficiente **A** permite producir mayores caudales utilizando menores presiones de operación, reduciendo directamente el consumo específico de energía.

7.2.9.2 Ecuación del transporte de solutos

El transporte de sales se describe mediante:

$$Js = B\,(Cm - Cp)$$

donde:

Js = flujo del soluto

B = coeficiente de permeabilidad del soluto

Cm = concentración sobre la superficie de la membrana

Cp = concentración del permeado

A diferencia del agua, los solutos presentan coeficientes de difusión considerablemente menores.

Esta diferencia constituye el fundamento físico del rechazo de sales.

Significado del coeficiente B

El coeficiente **B** representa la facilidad con la cual un determinado soluto atraviesa la membrana.

Valores pequeños de **B** indican:

- elevado rechazo;
- baja difusión del soluto;
- mejor calidad del permeado.

Los valores altos, por el contrario, hacen que el permeado lleve más sales.

Interpretación ingenieril

Mientras el diseñador busca aumentar el coeficiente **A**, también procura disminuir el coeficiente **B**. El desarrollo de nuevas membranas consiste precisamente en mejorar simultáneamente ambos parámetros.

7.2.9.3 Selectividad de la membrana

Una manera sencilla de evaluar una membrana es examinar la relación entre su permeabilidad al agua y su permeabilidad al soluto.

Una membrana será más selectiva cuando:

- presente un valor elevado de **A**;
- presente un valor reducido de **B**.

Este compromiso constituye uno de los principales desafíos en el desarrollo de nuevos materiales.

En términos generales:

- aumentar excesivamente la permeabilidad suele incrementar el paso de sales;
- aumentar excesivamente la selectividad puede disminuir la productividad.

El diseño moderno busca optimizar ambas propiedades simultáneamente.

7.2.9.4 Rechazo observado y rechazo intrínseco

Durante la operación de una planta pueden definirse dos conceptos diferentes de rechazo.

El **rechazo observado** se calcula utilizando las concentraciones medidas experimentalmente:

$$Ro = [(Cf - Cp) / Cf] \times 100$$

donde:

Ro = rechazo observado

Cf = concentración de alimentación

Cp = concentración del permeado

No obstante, la polarización por concentración hace que la concentración en la superficie a la que está expuesta la membrana sea más alta.

Por ello también puede definirse el **rechazo intrínseco**:

$$Ri = [(Cm - Cp)/Cm] \times 100$$

donde:

Ri = rechazo intrínseco

Cm = concentración sobre la superficie de la membrana

La capacidad de separación real de la membrana se aprecia mejor en el rechazo intrínseco.

Interpretación ingenieril

En las pruebas de laboratorio se acostumbra usar el rechazo observado. Para modelar matemáticamente con rigor o simular procesos conviene más el rechazo intrínseco, pues este sí toma en cuenta la polarización por concentración.

7.2.9.5 Permeabilidad y permeancia

En la literatura técnica suelen utilizarse indistintamente los términos **permeabilidad** y **permeancia**, aunque representan conceptos diferentes.

La **permeabilidad** corresponde a una propiedad intrínseca del material de la membrana.

La **permeancia** incorpora además el espesor de la membrana y representa el comportamiento del elemento comercial completo.

Esta diferencia resulta importante cuando se comparan materiales desarrollados en laboratorio con membranas industriales.

Tabla 7.6

Diferencia entre permeabilidad y permeancia

Concepto	Definición	Depende del espesor
Permeabilidad	Propiedad intrínseca del material	No

Concepto	Definición	Depende del espesor
Permeancia	Propiedad del elemento de membrana	Sí

Nota. Elaboración propia.

7.2.9.6 Compromiso entre productividad y rechazo

Un principio básico de la ingeniería de membranas dice que productividad y selectividad se compensan entre sí.

En términos generales:

- aumentar el flujo de agua favorece la productividad;
- aumentar el rechazo mejora la calidad del permeado.

Sin embargo, ambas variables no pueden incrementarse indefinidamente de manera simultánea.

El desarrollo de nuevos materiales busca desplazar este compromiso hacia membranas capaces de combinar:

- elevada permeabilidad;
- elevado rechazo;
- menor susceptibilidad al fouling;
- mayor resistencia química;
- mayor estabilidad mecánica.

Hoy, conseguir eso es de las líneas de investigación más importantes en el campo de las membranas.

Tabla 7.7

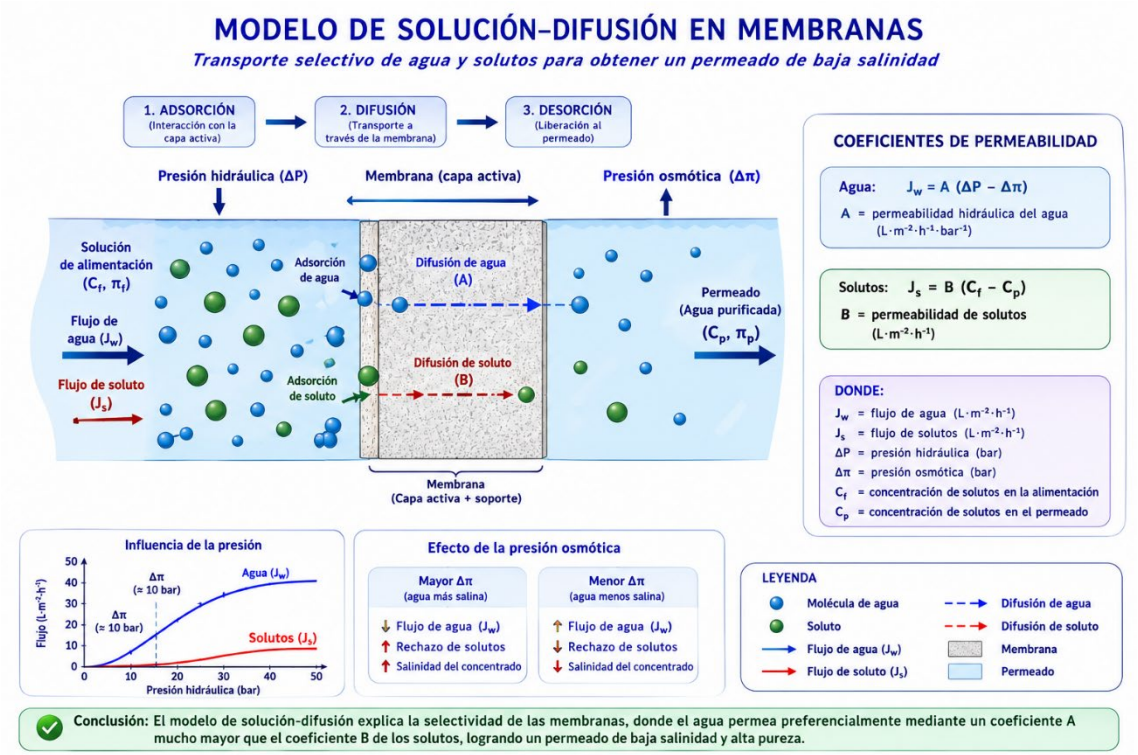
Influencia de los parámetros del modelo de solución-difusión

Parámetro	Incremento del parámetro	Efecto sobre el proceso
A	Aumenta	Mayor flujo de agua
B	Aumenta	Mayor paso de sales
ΔP	Aumenta	Mayor producción de permeado
Δπ	Aumenta	Menor flujo efectivo
Temperatura	Aumenta	Mayor permeabilidad y ligera disminución del rechazo
Salinidad	Aumenta	Mayor presión osmótica y mayor consumo energético

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.5

Representación conceptual del modelo de solución-difusión.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011), Crittenden et al. (2012) y Geise, Lee y Freeman (2014).

Reflexión ingenieril

El modelo de solución-difusión constituye el núcleo de la ingeniería moderna de la ósmosis inversa. Todas las decisiones de diseño —selección de membranas, presión de operación, recuperación, área instalada y consumo energético— derivan, directa o indirectamente, de las relaciones establecidas por este modelo. Comprender el significado físico de los coeficientes **A** y **B** permite interpretar por qué dos membranas aparentemente similares pueden presentar desempeños muy diferentes bajo las mismas condiciones de operación.

7.3 MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

La membrana es la pieza más importante de un sistema de ósmosis inversa. Su estructura y sus propiedades físicas y químicas gobiernan directamente cuánta agua se produce, cuántas sales se rechazan, cuánta energía se consume, qué tanto resiste al fouling y cuánto dura la instalación.

Para el ingeniero, la membrana es el corazón de la separación y, además, lo más valioso tecnológicamente en toda la planta.

Las membranas actuales son fruto de medio siglo largo de trabajo: más de cincuenta años en que confluyeron la ciencia de materiales, la ingeniería química, la

nanotecnología y los polímeros. Esa evolución permitió aumentar gradualmente la permeabilidad hidráulica, afinar la selectividad y gastar menos energía en las plantas desalinizadoras.

Actualmente, prácticamente todas las instalaciones industriales utilizan membranas compuestas de película delgada (**Thin Film Composite, TFC**), las cuales han reemplazado casi por completo a las antiguas membranas de acetato de celulosa.

7.3.1 REQUISITOS QUE DEBE CUMPLIR UNA MEMBRANA DE ÓSMOSIS INVERSA

Una membrana destinada a aplicaciones industriales debe satisfacer simultáneamente múltiples requisitos.

Entre los más importantes destacan:

- elevada permeabilidad al agua;
- elevado rechazo de sales;
- alta resistencia mecánica;
- estabilidad química;
- resistencia al fouling;
- baja compactación bajo presión;
- estabilidad térmica;
- larga vida útil;
- facilidad de limpieza química;
- compatibilidad con diferentes condiciones de operación.

En la práctica ninguna membrana cumple a la perfección todas estas características, así que el diseñador elige la que mejor equilibrio ofrezca para su aplicación concreta.

Interpretación ingenieril

La membrana ideal dejaría pasar el agua libremente y rechazaría por completo todos los solutos, sin necesitar presión adicional. Físicamente eso es inalcanzable, pero el desarrollo tecnológico se aproxima paso a paso a ese límite.

7.3.2 ESTRUCTURA DE LAS MEMBRANAS THIN FILM COMPOSITE (TFC)

Las membranas comerciales de hoy tienen una estructura multicapa, diseñada con cuidado para unir alta selectividad y resistencia mecánica suficiente.

Generalmente están constituidas por tres capas funcionales.

Capa activa

Se trata de una película finísima de poliamida aromática, obtenida por polimerización interfacial, que cumple el papel de capa activa.

Su espesor normalmente se encuentra comprendido entre:

100 y 300 nm

En esta región ocurre prácticamente todo el proceso de separación.

Las principales funciones de esta capa son:

- rechazo de sales;
- separación de contaminantes;
- control del transporte de agua;
- determinación de la selectividad.

Capa microporosa

Debajo de la capa activa se encuentra una estructura microporosa de polisulfona.

Esta capa proporciona:

- soporte mecánico;
- baja resistencia hidráulica;
- adecuada distribución del flujo.

Su espesor suele encontrarse entre:

30 y 50 µm

Soporte estructural

La última capa corresponde generalmente a un tejido no tejido de poliéster.

Su función consiste en proporcionar:

- resistencia mecánica;
- estabilidad dimensional;

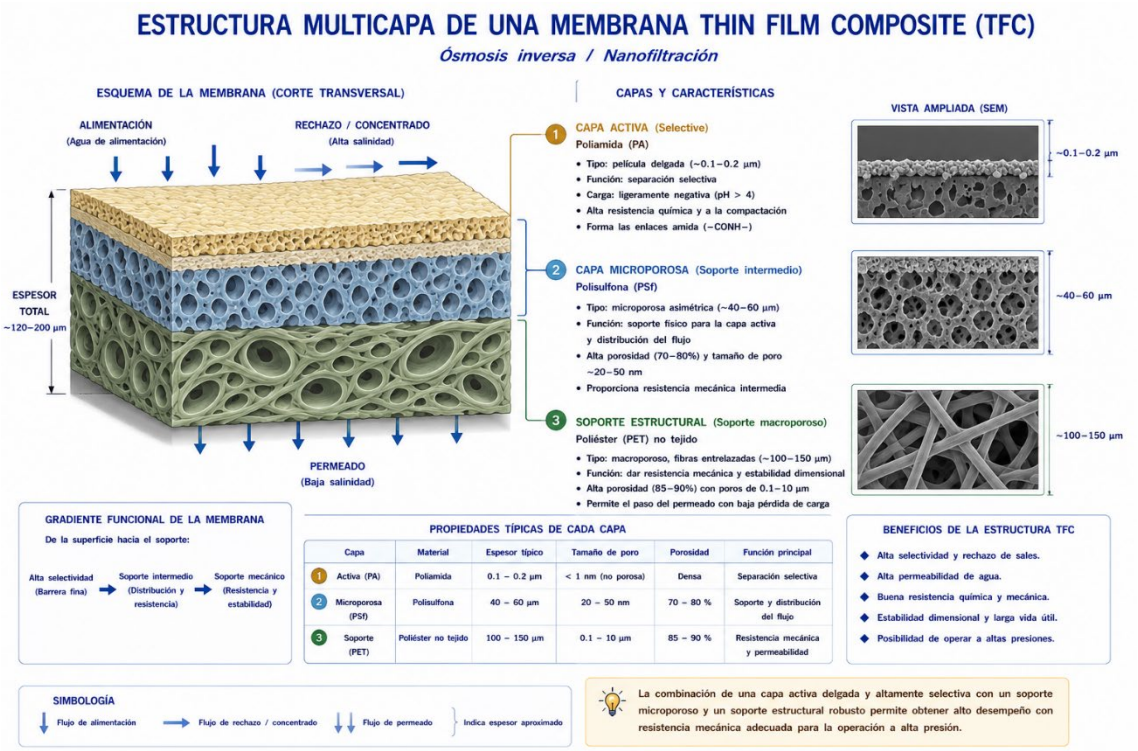
- facilidad de manipulación;
- soporte durante el enrollamiento.

Su espesor puede superar los:

100 µm

Figura 7.6

Corte de una membrana TFC (Thin Film Composite) en tres niveles: arriba, la poliamida de la capa activa; luego, una capa microporosa hecha de polisulfona; y debajo, el poliéster que sirve de soporte estructural.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011) y Geise, Lee y Freeman (2014).

7.3.3 MATERIALES UTILIZADOS

Se usaron varios polímeros a lo largo de la historia, pero hoy dominan claramente las membranas de poliamidas aromáticas.

Los principales materiales utilizados incluyen:

- poliamida aromática;
- acetato de celulosa;
- polisulfona;
- polietersulfona;

- poliéster (como soporte).

Poliamida aromática

Constituye actualmente el material más utilizado.

Presenta:

- rechazo superior al 99 % para NaCl;
- elevada permeabilidad;
- excelente estabilidad mecánica;
- amplio rango de aplicaciones.

Su principal limitación corresponde a la sensibilidad frente al cloro libre.

En consecuencia, antes de que el agua entre al sistema de ósmosis inversa, las plantas necesitan una etapa de decloración.

Acetato de celulosa

Fue el material predominante durante las primeras décadas del desarrollo de la ósmosis inversa.

Actualmente su utilización ha disminuido debido a:

- menor rechazo;
- menor estabilidad;
- menor permeabilidad.

Sin embargo, presenta una ventaja importante:

- mayor tolerancia frente al cloro.

En determinadas aplicaciones específicas continúa utilizándose.

Tabla 7.8

Comparación de materiales utilizados en membranas de ósmosis inversa

Material	Ventajas	Limitaciones
Poliamida aromática	Alto rechazo, elevada permeabilidad	Sensible al cloro
Acetato de celulosa	Buena resistencia al cloro	Menor rechazo y menor productividad
Polisulfona	Excelente soporte estructural	No se utiliza como capa activa
Polietersulfona	Buena estabilidad mecánica	Requiere capa activa adicional

Nota. Elaboración propia.

7.3.4 MEMBRANAS PARA AGUA SALOBRE (BWRO)

Las membranas **Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO)** están diseñadas para tratar aguas cuya salinidad es considerablemente inferior a la del agua de mar.

Generalmente operan con:

- presiones moderadas;
- elevados porcentajes de recuperación;
- menores consumos energéticos.

Sus principales aplicaciones incluyen:

- agua subterránea;
- agua superficial mineralizada;
- reutilización de aguas tratadas;
- producción de agua industrial;
- agua para calderas.

Las características generales son:

- presión típica de operación entre 10 y 25 bar;
- rechazo de sales superior al 99 %;
- recuperación comprendida entre 70 % y 90 %, dependiendo de la calidad del agua.

7.3.5 MEMBRANAS PARA AGUA DE MAR (SWRO)

Las membranas **Seawater Reverse Osmosis (SWRO)** se diseñan específicamente para trabajar con soluciones de elevada salinidad.

Como consecuencia deben soportar:

- altas presiones;
- elevada presión osmótica;
- mayores esfuerzos mecánicos.

Normalmente presentan:

- presión de operación entre 55 y 70 bar;
- rechazo de NaCl superior al 99,7 %;
- recuperación comprendida entre 35 % y 50 %.

Sus capas activas están optimizadas para que pasen las mínimas sales posibles, incluso en condiciones extremas de operación.

Interpretación ingenieril

Las membranas BWRO y SWRO se ven parecidas, pero no deben usarse indistintamente. Una BWRO no fue concebida para resistir las presiones típicas del agua de mar. Una SWRO en agua salobre, por su parte, puede dejar la planta sobredimensionada sin necesidad y encarecer la inversión.

Tabla 7.9

Comparación entre membranas BWRO y SWRO

Característica	BWRO	SWRO
Tipo de agua	Agua salobre	Agua de mar
Presión típica	10–25 bar	55–70 bar
Salinidad de alimentación	Baja a moderada	Muy elevada
Recuperación típica	70–90 %	35–50 %
Rechazo de NaCl	>99 %	>99,7 %
Consumo energético	Moderado	Elevado

Nota. Elaboración propia.

7.3.6 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA MEMBRANA COMERCIAL

Los fabricantes suministran normalmente los siguientes parámetros:

- flujo nominal de permeado;
- rechazo nominal de sales;
- rechazo mínimo garantizado;
- presión máxima de operación;
- temperatura máxima;
- intervalo de pH de operación;
- intervalo de pH para limpieza química;
- concentración máxima de cloro libre;
- área efectiva de membrana;
- diámetro del elemento;
- longitud del elemento.

En la ingeniería conceptual, estos parámetros son el punto de partida para elegir de forma preliminar la membrana.

Reflexión ingenieril

Al escoger la membrana de ósmosis inversa no basta mirar cuántas sales rechaza. Su permeabilidad hidráulica, su resistencia química, la presión máxima que tolera, lo fácil que sea limpiarla y cuán bien se lleva con el agua a tratar pueden pesar aún más en el rendimiento de toda la planta. Un buen diseño evalúa la membrana durante la vida completa del proyecto, no solo con las condiciones de laboratorio que da el catálogo.

7.3.7 CONFIGURACIONES COMERCIALES DE MÓDULOS DE ÓSMOSIS INVERSA

Las membranas de ósmosis inversa son finísimas y poco resistentes mecánicamente, de modo que no pueden instalarse directamente en una tubería ni en un reactor hidráulico.

Para usarlas en la industria se ensamblan en módulos, que les dan soporte mecánico, reparten el flujo de manera uniforme y facilitan recoger el permeado.

El diseño del módulo influye directamente sobre:

- la pérdida de carga;
- la polarización por concentración;
- la facilidad de limpieza;
- la densidad de empaquetamiento;
- el costo de fabricación;
- el mantenimiento.

A lo largo del desarrollo de la tecnología se han propuesto diversas configuraciones. Sin embargo, actualmente la gran mayoría de las plantas industriales emplean módulos de **espiral enrollada (Spiral Wound Modules)**.

Las principales configuraciones utilizadas son:

- espiral enrollada;
- fibra hueca;
- tubular;
- placas y marcos.

Cada una tiene ventajas propias según el tipo de agua y la aplicación industrial.

7.3.7.1 Módulos espiral enrollada (Spiral Wound)

Los módulos espiral enrollada constituyen el estándar mundial para la ósmosis inversa.

Aquí se unen varias hojas planas de membrana para formar sobres sellados por tres de sus lados.

Entre ambas membranas se coloca un espaciador denominado **permeate spacer**, encargado de conducir el agua permeada hacia el tubo colector central.

Por la cara externa se instala otro espaciador denominado **feed spacer**, cuya función consiste en distribuir el agua de alimentación y favorecer la turbulencia.

Luego todo el conjunto se enrolla en torno a un tubo perforado, por donde sale el permeado.

Se obtiene así un módulo cilíndrico y compacto, con mucha superficie de membrana en poco volumen.

Principales componentes

Un módulo espiral enrollada está formado por:

- tubo central colector de permeado;
- sobres de membrana;
- espaciadores del permeado;
- espaciadores de alimentación;
- envolvente exterior;
- tapas de sellado;
- juntas tóricas.

Cada uno de estos componentes cumple una función específica dentro del proceso de separación.

Ventajas

Las principales ventajas son:

- elevada densidad de empaquetamiento;
- gran superficie de membrana por unidad de volumen;

- excelente relación costo-beneficio;
- bajo consumo de materiales;
- amplia disponibilidad comercial;
- facilidad de reemplazo.

Estas características explican que, de cada diez desalinizadoras en el mundo, nueve o más (más del noventa por ciento) adopten esta configuración.

Limitaciones

Entre sus principales limitaciones destacan:

- sensibilidad al fouling;
- necesidad de un excelente pretratamiento;
- limpieza más compleja que otras configuraciones;
- mayor riesgo de obstrucción cuando existen sólidos suspendidos.

No obstante, estas limitaciones pueden controlarse mediante un adecuado diseño del pretratamiento.

Figura 7.7

Esquema de un módulo espiral enrollado.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996) y Strathmann (2011).

7.3.7.2 Módulos de fibra hueca

En esta configuración la membrana adopta la forma de fibras extremadamente delgadas cuyo diámetro puede variar entre aproximadamente 50 y 300 µm.

Miles de fibras se agrupan formando un haz contenido dentro de una carcasa cilíndrica.

Dependiendo del diseño, el agua puede circular:

- por el interior de las fibras;
- por el exterior de las fibras.

Cada fibra deja pasar el permeado por su pared, y después unos colectores ubicados en los extremos del módulo lo juntan.

Ventajas

- enorme superficie específica;
- equipos muy compactos;
- elevada capacidad de producción.

Limitaciones

- mayor sensibilidad al ensuciamiento;
- dificultad para realizar limpiezas intensivas;
- mayor complejidad de fabricación;
- menor resistencia mecánica frente a variaciones bruscas de presión.

En las plantas modernas de ósmosis inversa esta configuración participa poco hoy, si bien algunas aplicaciones específicas aún la emplean.

7.3.7.3 Módulos tubulares

Los módulos tubulares ubican la membrana en la superficie interior de tubos de gran diámetro.

Mientras el agua recorre los tubos, el permeado cruza la membrana y se colecta en la carcasa externa.

Gracias al amplio diámetro hidráulico, esta configuración tolera aguas con mucha carga contaminante.

Aplicaciones

Los módulos tubulares se emplean principalmente en:

- efluentes industriales;
- industria alimentaria;
- lixiviados de rellenos sanitarios;
- corrientes con elevado contenido de sólidos.

Ventajas

- elevada resistencia al fouling;
- facilidad de limpieza;
- posibilidad de trabajar con fluidos viscosos;
- menor riesgo de obstrucción.

Limitaciones

- menor área específica;
- mayor consumo energético;
- equipos de mayor tamaño;
- mayor costo por metro cuadrado de membrana.

7.3.7.4 Módulos de placas y marcos

Aquí se colocan membranas planas entre placas rígidas, con canales independientes para alimentación y permeado.

El diseño resulta similar al de un intercambiador de calor de placas.

Las principales ventajas son:

- fácil desmontaje;
- inspección sencilla;
- limpieza directa;
- gran flexibilidad experimental.

Por ello, esta configuración se utiliza principalmente en:

- plantas piloto;
- laboratorios;
- procesos farmacéuticos;

- aplicaciones especiales de pequeña capacidad.

Rara vez se usa en grandes plantas desalinizadoras, porque su densidad de empaquetamiento es menor.

Tabla 7.10

Comparación de configuraciones comerciales de módulos de ósmosis inversa

Configuración	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones principales
Espiral enrollada	Alta superficie específica, bajo costo, amplia disponibilidad	Sensible al fouling	Desalación, agua potable, agua industrial
Fibra hueca	Muy alta densidad de empaquetamiento	Limpieza más compleja	Aplicaciones específicas y algunos procesos industriales
Tubular	Alta resistencia al ensuciamiento	Mayor costo y consumo energético	Efluentes industriales y corrientes con sólidos
Placas y marcos	Fácil inspección y mantenimiento	Baja densidad de empaquetamiento	Plantas piloto y procesos especiales

Nota. Elaboración propia.

7.3.7.5 Selección de la configuración adecuada

La selección de la configuración depende simultáneamente de criterios hidráulicos, económicos y operacionales.

Entre los factores más importantes destacan:

- calidad del agua de alimentación;
- concentración de sólidos suspendidos;
- riesgo de fouling;
- facilidad de limpieza requerida;
- capacidad de producción;
- disponibilidad de espacio;
- costos de inversión;
- costos de operación.

Para desalar agua de mar o agua salobre, lo normal es que convenga más el módulo espiral enrollada, que da alta productividad y cuesta poco por cada metro cuadrado de membrana efectiva.

7.3.7.6 Tendencias en el diseño de módulos

Los módulos de ósmosis inversa han evolucionado hace poco con dos metas simultáneas: mayor eficiencia hidráulica y menor consumo de energía.

Las principales líneas de desarrollo incluyen:

- espaciadores de alimentación con geometrías optimizadas mediante dinámica de fluidos computacional (CFD);
- materiales con menor pérdida de carga;
- módulos de mayor área efectiva;
- diseños que reducen la polarización por concentración;
- optimización de los canales de flujo para disminuir el fouling;
- integración con sistemas de monitoreo inteligente.

Estas innovaciones permiten incrementar la productividad sin aumentar significativamente la presión de operación.

Reflexión ingenieril

La separación ocurre en la membrana, pero el módulo condiciona buena parte de cómo se comporta hidráulicamente el sistema. Con una buena geometría el flujo se reparte parejo, baja la polarización por concentración y las limpiezas resultan más fáciles. Por eso el módulo es mucho más que un simple apoyo mecánico para la membrana: es parte central de esta ingeniería.

7.3.8 RECIPIENTES A PRESIÓN (PRESSURE VESSELS) Y ARREGLOS DE MÓDULOS

Los elementos de ósmosis inversa no se instalan individualmente dentro de una planta. Para soportar las elevadas presiones de operación y facilitar el manejo hidráulico, varios elementos de membrana se alojan dentro de un recipiente cilíndrico denominado **recipiente a presión** (*Pressure Vessel*).

Este recipiente constituye la unidad con la que se arman los trenes de ósmosis inversa. Hace pasar el agua de alimentación por varios elementos de membrana unidos hidráulicamente en serie.

Desde el punto de vista de la ingeniería, el diseño del recipiente influye sobre:

- la distribución del flujo;
- la pérdida de carga;
- la presión disponible;
- la facilidad de mantenimiento;

- la confiabilidad del sistema.

7.3.8.1 Función del recipiente a presión

El recipiente a presión cumple simultáneamente varias funciones.

Entre las principales se encuentran:

- soportar las altas presiones de operación;
- alojar los elementos de membrana;
- distribuir uniformemente el flujo de alimentación;
- recolectar el concentrado;
- facilitar la extracción y reemplazo de los elementos;
- garantizar la estanqueidad del sistema.

En aplicaciones de agua de mar, estos recipientes deben soportar presiones superiores a **70 bar**, mientras que en plantas de agua salobre normalmente operan entre **10 y 30 bar**.

Materiales de fabricación

Los recipientes modernos se fabrican generalmente utilizando:

- fibra de vidrio reforzada con resina epóxica (FRP);
- materiales compuestos de alta resistencia;
- acero inoxidable (aplicaciones especiales).

Con materiales compuestos se reduce bastante el peso del sistema, sin perder resistencia mecánica y con muy buena resistencia a la corrosión.

7.3.8.2 Número de elementos por recipiente

El número de elementos instalados dentro de un recipiente depende de:

- capacidad de producción;
- pérdida de carga admisible;
- recuperación del sistema;
- presión disponible;
- recomendaciones del fabricante.

En la práctica industrial es frecuente instalar:

- seis elementos;
- siete elementos;
- ocho elementos.

Los recipientes con **ocho elementos** constituyen actualmente la configuración más utilizada en plantas desalinizadoras de gran capacidad.

Interpretación ingenieril

Si se ponen demasiados elementos, aumentan las pérdidas de carga y el flujo que les llega a los últimos elementos del recipiente va cayendo. Por ello, la selección debe tomar en cuenta a la vez criterios hidráulicos y económicos.

7.3.8.3 Flujo dentro del recipiente

El agua de alimentación ingresa por uno de los extremos del recipiente.

A medida que atraviesa cada elemento:

- parte del agua se convierte en permeado;
- la concentración del concentrado aumenta;
- la presión disminuye gradualmente debido a las pérdidas de carga.

Como consecuencia, cada elemento trabaja bajo condiciones ligeramente diferentes.

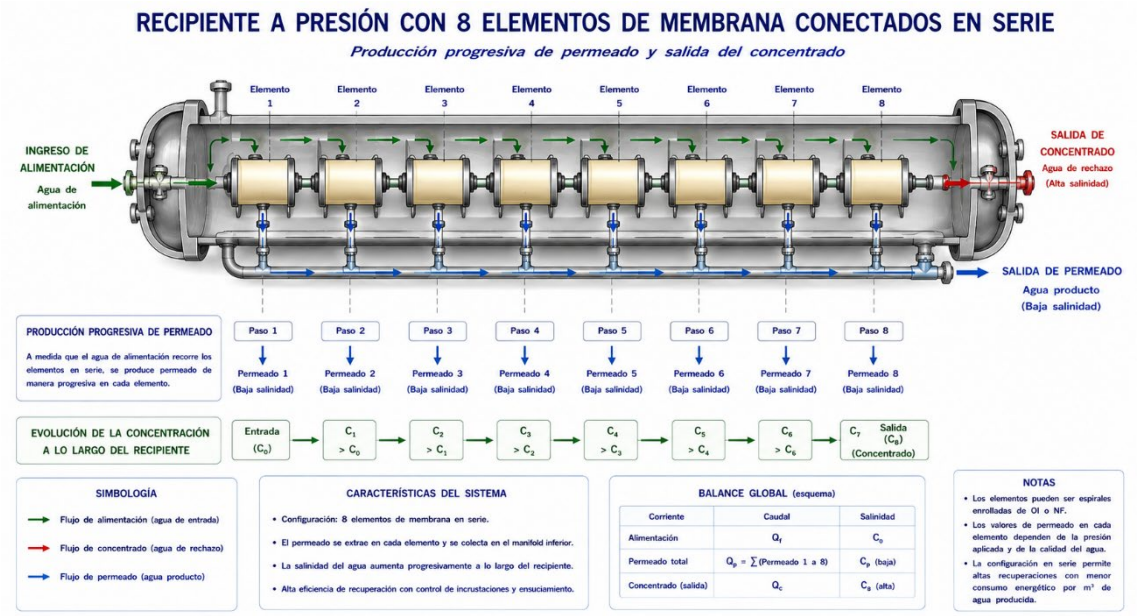
Generalmente:

- el primer elemento produce el mayor caudal de permeado;
- el último elemento trabaja con mayor salinidad y mayor presión osmótica.

Por esto, en el diseño detallado hay que hacer los cálculos hidráulicos de cada elemento.

Figura 7.8

Recipiente a presión mostrando ocho elementos de membrana conectados en serie



Nota. Elaboración propia.

7.3.8.4 Conexión en serie de elementos

Dentro de cada recipiente los elementos se conectan hidráulicamente en serie.

El concentrado que abandona un elemento constituye la alimentación del siguiente.

Como consecuencia:

- disminuye progresivamente el caudal;
- aumenta la concentración salina;
- aumenta la presión osmótica;
- disminuye ligeramente el flujo de permeado.

Este comportamiento debe considerarse durante el dimensionamiento de la planta.

7.3.8.5 Conexión en paralelo de recipientes

Los recipientes a presión pueden conectarse en paralelo para incrementar la capacidad de producción.

En este caso:

- todos reciben aproximadamente la misma presión de alimentación;
- el caudal total se distribuye entre ellos;
- cada recipiente opera de manera similar.

Esta configuración presenta importantes ventajas:

- mayor flexibilidad;
- facilidad de mantenimiento;
- ampliación sencilla de capacidad;
- mejor distribución hidráulica.

Por esta razón constituye el arreglo predominante en plantas industriales.

7.3.8.6 Configuración por etapas (*Stages*)

Cuando el concentrado procedente de un conjunto de recipientes alimenta un segundo conjunto de recipientes se forma una **segunda etapa**.

Con esta configuración se busca aprovechar la presión que aún conserva el concentrado para subir la recuperación global.

La primera etapa procesa la totalidad del caudal de alimentación.

La segunda etapa trata únicamente el concentrado procedente de la primera.

En algunos proyectos pueden instalarse incluso tres etapas.

Ventajas

- mayor recuperación;
- mejor aprovechamiento de la presión;
- menor consumo específico de energía;
- reducción del caudal de rechazo.

Una recuperación demasiado alta, eso sí, eleva el riesgo de incrustaciones; el número de etapas, por ello, se elige con cuidado.

7.3.8.7 Configuración por pasos (*Passes*)

A veces no alcanza con una recuperación alta: además se necesita un agua de salinidad muy baja.

Para ello puede emplearse una configuración denominada **doble paso (Two-Pass RO)**.

En este caso:

- el permeado del primer paso alimenta un segundo sistema completo de ósmosis inversa;
- el segundo paso elimina las pequeñas cantidades de sales remanentes;

- se obtiene agua de muy alta pureza.

Esta configuración se utiliza frecuentemente en:

- producción farmacéutica;
- industria electrónica;
- fabricación de semiconductores;
- generación de vapor de alta presión;
- laboratorios.

Interpretación ingenieril

Debe distinguirse claramente entre una **segunda etapa** y un **segundo paso**.

- Una **segunda etapa** procesa el **concentrado** del primer conjunto de recipientes para aumentar la recuperación.
- Un **segundo paso** procesa el **permeado** obtenido en el primer sistema para mejorar la calidad del agua.

Esta diferencia conceptual confunde a menudo a los estudiantes, y es de los errores más comunes cuando se aprende a diseñar plantas de ósmosis inversa.

Tabla 7.11

*Diferencias entre etapas (*Stages*) y pasos (*Passes*)*

Característica	**Etapa (Stage)**	**Paso (Pass)**
Corriente alimentada	Concentrado de la etapa anterior	Permeado del paso anterior
Objetivo principal	Incrementar la recuperación	Mejorar la calidad del agua
Efecto sobre la recuperación	Aumenta	Prácticamente no cambia
Efecto sobre la conductividad	Moderado	Muy significativo
Aplicaciones	Plantas desalinizadoras	Agua ultrapura e industria farmacéutica

Nota. Elaboración propia.

7.3.8.8 Arreglos hidráulicos típicos

Los arreglos de recipientes más utilizados en plantas industriales son:

- **1:1**, para instalaciones pequeñas;
- **2:1**, donde dos recipientes en la primera etapa alimentan uno en la segunda;
- **3:2**, utilizado en plantas de recuperación intermedia;
- **4:2:1**, empleado en instalaciones de gran capacidad y alta recuperación.

La selección depende de:

- recuperación deseada;
- calidad del agua de alimentación;
- presión disponible;
- costo energético;
- riesgo de *scaling*.

En la ingeniería conceptual se parte de una estimación preliminar, y la configuración definitiva se optimiza luego con simulaciones hidráulicas.

7.3.8.9 Criterios para la selección del arreglo

El diseño del arreglo hidráulico debe considerar simultáneamente:

- calidad del agua de alimentación;
- producción requerida;
- recuperación objetivo;
- consumo energético;
- facilidad de operación;
- mantenimiento;
- posibilidad de expansión futura;
- costo del ciclo de vida.

La mejor solución será la que equilibre cuánto se produce, la calidad del permeado, la energía que se consume y la confiabilidad de la operación.

Tabla 7.12

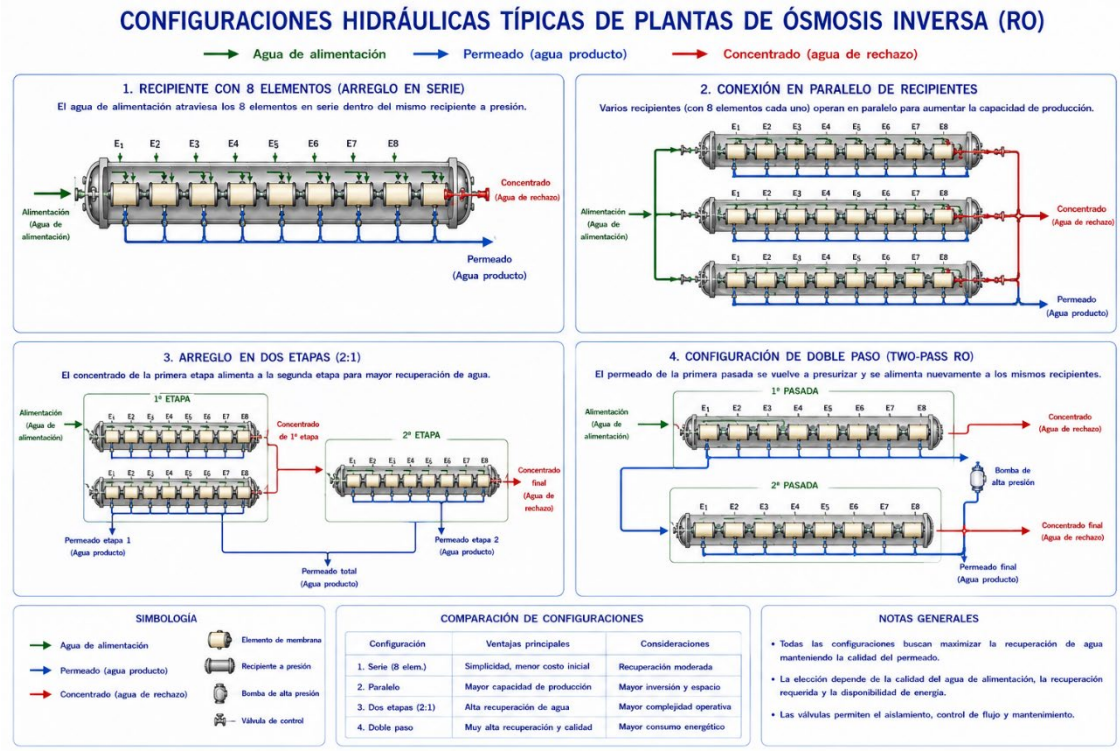
Criterios de selección de recipientes y arreglos hidráulicos de módulos de ósmosis inversa.

Aspecto de diseño	Recomendación de ingeniería
Número de elementos por recipiente	Generalmente 6 a 8 elementos
Material del recipiente	FRP para la mayoría de aplicaciones industriales
Conexión entre recipientes	Paralelo para aumentar capacidad
Conexión entre elementos	Serie dentro de cada recipiente
Configuración por etapas	Incrementar recuperación sin exceder el riesgo de *scaling*
Configuración por pasos	Obtener agua de muy alta pureza
Expansión futura	Reservar espacio para nuevos recipientes y trenes

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.9

Configuraciones hidráulicas típicas de plantas de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Mulder (1996), Strathmann (2011), Crittenden et al. (2012) y los manuales técnicos de diseño de sistemas de ósmosis inversa.

Reflexión ingenieril

Entre elegir la membrana y diseñar una planta completa está el diseño de los recipientes a presión y de los arreglos hidráulicos. Combinar bien elementos, recipientes, etapas y pasos fija la producción posible y además la recuperación, qué calidad tendrá el permeado, cuánta energía se consume y qué tan fácil sea operar. En el ejercicio profesional, optimizar la configuración hidráulica puede significar ahorros considerables mientras la instalación esté en servicio.

7.3.9 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

Entre las decisiones de mayor peso al concebir una planta de tratamiento de agua figura elegir qué membrana de ósmosis inversa usar. El mercado ofrece muchos modelos de apariencia similar, pero unas diferencias pequeñas de rechazo de sales, de permeabilidad o de resistencia química bastan para modificar de forma notable la productividad, la energía consumida y lo que cuesta la instalación durante toda su vida.

Ni el precio de compra ni el mayor porcentaje de rechazo que figure en la ficha técnica bastan para elegir una membrana. Un ingeniero decide tras un análisis completo, donde entran el agua de alimentación, las metas del proyecto, la forma de operar la planta y el mantenimiento que se podrá sostener.

7.3.9.1 Caracterización del agua de alimentación

Lo primero al escoger una membrana es saber con exactitud cómo es el agua que se va a tratar.

Como mínimo deben determinarse los siguientes parámetros:

Parámetros físicos

- temperatura;
- turbidez;
- color;
- sólidos suspendidos;
- índice de densidad de sedimentos (SDI);
- conductividad eléctrica.

Parámetros químicos

- pH;
- alcalinidad;
- dureza;
- calcio;
- magnesio;
- sodio;
- potasio;
- cloruros;
- sulfatos;
- bicarbonatos;
- nitratos;
- sílice;

- hierro;
- manganeso;
- carbono orgánico total.

Parámetros microbiológicos

- bacterias heterotróficas;
- coliformes;
- microorganismos formadores de biofilm.

Conviene que los análisis se refuercen con muestreos repetidos en distintas épocas del año, de modo que se detecten cambios estacionales.

Interpretación ingenieril

Un diseño vale tanto como los datos que lo sustentan. Si el agua real se aleja de la que se supuso al diseñar, una membrana bien elegida sobre el papel puede terminar siendo del todo inapropiada.

7.3.9.2 Definición de la calidad requerida del permeado

Antes de elegir la membrana hay que dejar bien definida la calidad de agua que el proceso necesita.

Dependiendo de la aplicación, pueden existir objetivos diferentes.

Por ejemplo:

- producción de agua potable;
- agua para procesos industriales;
- agua para calderas;
- agua farmacéutica;
- agua ultrapura;
- reutilización de aguas residuales.

Cada aplicación exige diferentes niveles de:

- conductividad;
- sólidos disueltos;
- dureza;

- sílice;
- carbono orgánico;
- microorganismos.

Por tanto, la membrana se escoge según lo que el proceso realmente requiere, sin perseguir de manera automática el mayor rechazo que ofrezca el mercado.

7.3.9.3 Selección según la salinidad del agua

Un primer paso importante es agrupar el agua de alimentación según cuánta sal contiene.

De manera general pueden distinguirse:

Tabla 7.13

Selección preliminar de membranas según la salinidad del agua.

Tipo de agua	Tecnología recomendada
Agua ligeramente mineralizada	Nanofiltración o BWRO de baja presión
Agua salobre	BWRO
Agua de mar	SWRO
Salmueras industriales	SWRO de alta presión o procesos híbridos

Nota. Elaboración propia.

Esta clasificación permite realizar una primera selección antes del desarrollo del diseño hidráulico.

7.3.9.4 Selección según la presión de operación

La presión disponible constituye otro criterio importante.

Las membranas comerciales pueden clasificarse aproximadamente en:

- membranas de baja presión;
- membranas de presión media;
- membranas de alta presión.

Las membranas de baja presión son muy permeables y sirven bien para aguas poco salinas.

Las membranas de alta presión son mecánicamente más resistentes; se destinan sobre todo a desalar agua de mar.

Interpretación ingenieril

Usar siempre la membrana que más presión soporta no es lo más sensato. Si una membrana pensada para agua de mar se destina a aguas salobres, la inversión inicial sube sin necesidad.

7.3.9.5 Selección según el rechazo de sales

El rechazo constituye uno de los parámetros más conocidos por los usuarios.

Sin embargo, debe interpretarse cuidadosamente.

Los fabricantes suelen informar:

- rechazo nominal;
- rechazo mínimo garantizado.

El rechazo nominal corresponde al valor obtenido bajo condiciones normalizadas de laboratorio.

Durante la operación industrial el rechazo puede variar debido a:

- temperatura;
- presión;
- recuperación;
- ensuciamiento;
- envejecimiento de la membrana.

Por ello, el diseñador debe trabajar preferentemente con valores conservadores.

7.3.9.6 Selección según la productividad

La productividad depende principalmente de:

- permeabilidad hidráulica;
- presión de operación;
- temperatura;
- presión osmótica.

Una membrana muy productiva permite reducir:

- área instalada;
- número de módulos;
- inversión inicial.

Aun así, si la productividad se lleva demasiado alto, aumenta el paso de sales y se favorece la polarización por concentración.

En consecuencia, la productividad debe analizarse conjuntamente con el rechazo.

7.3.9.7 Selección según la resistencia química

Durante su vida útil la membrana estará expuesta a diferentes productos químicos utilizados en:

- limpieza CIP;
- desinfección;
- control de incrustaciones;
- ajuste de pH.

Por ello deben verificarse cuidadosamente:

- intervalo de pH de operación;
- intervalo de pH para limpieza;
- tolerancia al cloro;
- compatibilidad con detergentes;
- compatibilidad con agentes oxidantes.

Una selección incorrecta puede provocar daños irreversibles en la capa activa.

7.3.9.8 Selección según el riesgo de fouling

Cuando el agua presenta elevado contenido de:

- materia orgánica;
- microorganismos;
- coloides;
- aceites;
- hierro;
- manganeso,

resulta recomendable seleccionar membranas especialmente desarrolladas para reducir el ensuciamiento.

Varios fabricantes han lanzado en los últimos años membranas cuya superficie se modifica con tratamientos hidrofílicos, lo que reduce la adherencia de contaminantes y hace más fácil la limpieza química.

7.3.9.9 Selección según el costo del ciclo de vida

El criterio económico más importante corresponde al análisis del costo del ciclo de vida.

Debe considerarse:

- inversión inicial;
- consumo energético;
- vida útil;
- frecuencia de limpieza;
- reposición de membranas;
- mantenimiento;
- disponibilidad de repuestos.

La oferta más barata al inicio no siempre resulta la de menor costo total.

Tabla 7.14

Criterios para la selección de membranas de ósmosis inversa

Criterio	Aspectos a evaluar
Calidad del agua	Salinidad, SDI, materia orgánica, composición iónica
Calidad requerida	Conductividad, dureza, sílice, pureza del permeado
Presión de operación	Baja, media o alta presión
Productividad	Flujo de permeado y permeabilidad hidráulica
Rechazo	Nominal y mínimo garantizado
Resistencia química	Intervalo de pH, tolerancia química y limpieza
Riesgo de fouling	Propiedades antifouling y facilidad de limpieza
Costo del ciclo de vida	CAPEX, OPEX y vida útil

Nota. Elaboración propia.

7.3.9.10 Metodología de selección de membranas

Un método estructurado debe guiar la elección de la membrana cuando se trabaja con criterio de ingeniería de proyectos.

Paso 1. Caracterizar completamente el agua de alimentación.

Paso 2. Definir la calidad requerida del permeado.

Paso 3. Establecer la recuperación objetivo.

Paso 4. Estimar la presión de operación.

Paso 5. Preseleccionar varios modelos comerciales.

Paso 6. Simular el comportamiento hidráulico de cada alternativa.

Paso 7. Comparar el consumo energético.

Paso 8. Evaluar el costo del ciclo de vida.

Paso 9. Seleccionar la alternativa óptima.

Con este método la incertidumbre del proyecto baja de forma notable y la decisión final queda respaldada técnicamente.

Figura 7.10

Diagrama de flujo para la selección de membranas de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Seleccionar membranas de ósmosis inversa es un problema de optimización con múltiples criterios. El mejor resultado global no se consigue solo con el máximo rechazo de sales ni con la mayor productividad, sino equilibrando eficiencia hidráulica, energía consumida, aguante frente a agentes químicos, limpieza sencilla y el costo a lo largo de la vida útil. Un método sistemático baja el riesgo en la fase conceptual de la ingeniería y es el cimiento de plantas muy confiables.

7.4 MODELADO HIDRÁULICO DE SISTEMAS DE ÓSMOSIS INVERSA

El modelado hidráulico es la etapa en que la física y la termodinámica del proceso de ósmosis inversa se vuelven ecuaciones que describen cómo opera una planta industrial.

Su finalidad consiste en estimar, con suficiente precisión, variables tales como:

- producción de permeado;
- recuperación del sistema;
- presión requerida;
- pérdidas de carga;
- consumo energético;
- concentración del concentrado;
- rechazo de sales;
- área necesaria de membranas.

Además, los programas comerciales que la industria emplea para diseñar y optimizar sistemas de ósmosis inversa se construyen sobre este modelado.

En términos generales, el procedimiento comprende las siguientes etapas:

- caracterización del agua de alimentación;
- establecimiento de las condiciones de operación;
- formulación de balances de materia;
- aplicación del modelo de solución-difusión;
- cálculo de pérdidas de carga;
- estimación del consumo energético;

- validación del diseño mediante simulación.

7.4.1 VARIABLES FUNDAMENTALES DEL MODELO

En la ósmosis inversa, el comportamiento hidráulico del sistema responde en simultáneo a variables hidráulicas, termodinámicas y fisicoquímicas.

Las principales son:

Variables hidráulicas

- caudal de alimentación;
- caudal de permeado;
- caudal de concentrado;
- presión de alimentación;
- presión del concentrado;
- presión del permeado.

Variables fisicoquímicas

- temperatura;
- conductividad;
- sólidos disueltos;
- composición iónica;
- viscosidad.

Variables de membrana

- permeabilidad hidráulica (A);
- permeabilidad al soluto (B);
- área efectiva;
- rechazo nominal;
- presión máxima admisible.

Todas estas variables interactúan simultáneamente durante la operación de la planta.

7.4.2 BALANCE GLOBAL DE MATERIA

El primer paso consiste en aplicar el principio de conservación de la masa.

Para una planta operando en estado estacionario:

$$Qa = Qp + Qc$$

donde

Qa = caudal de alimentación

Qp = caudal de permeado

Qc = caudal de concentrado

Esta ecuación constituye el balance hidráulico básico de toda planta de ósmosis inversa.

Ejemplo 7.3

Una planta recibe:

$$Qa = 1000\ m^3/día$$

Produce:

$$Qp = 450\ m^3/día$$

Determinar el caudal de concentrado.

Aplicando:

$$Qc = 1000 - 450$$

$$Qc = 550\ m^3/día$$

Por lo tanto,

$$Concentrado = 550\ m^3/día$$

Interpretación ingenieril

A partir del balance global se puede comprobar de inmediato si los datos de operación son coherentes, y con él arranca el dimensionamiento hidráulico.

7.4.3 BALANCE DE SALES

La masa de sales también debe conservarse.

Considerando un sistema sin precipitación:

$$QaCf = QpCp + QcCc$$

donde

Cf = concentración en la alimentación

Cp = concentración del permeado

Cc = concentración del concentrado

Esta ecuación permite estimar la concentración del concentrado y evaluar el riesgo de incrustaciones.

Ejemplo 7.4

Datos:

$$Qa = 1000\ m^3/día$$

$$Cf = 35000\ mg/L$$

$$Qp = 450\ m^3/día$$

$$Cp = 250\ mg/L$$

Entonces:

$$Qc = 550\ m^3/día$$

Sustituyendo:

$$1000(35000)$$

$$=450\ (250) + 550Cc$$

Resolviendo:

$$Cc \approx 63400\ mg/L$$

Se aprecia que el concentrado llega a tener una concentración cercana al doble de la inicial.

Interpretación ingenieril

Por este aumento, las últimas membranas del recipiente trabajan con mayor presión osmótica y tienen más riesgo de que se formen incrustaciones.

7.4.4 RECUPERACIÓN DEL SISTEMA

La recuperación representa la fracción del agua alimentada que se convierte en permeado.

Se calcula mediante:

$$R = Qp/Qa \times 100$$

Ejemplo 7.5

$$Qa = 1000\ m^3/día$$

$$Qp = 450\ m^3/día$$

Entonces:

$$R$$

```
= (450/1000) ×100
=45 %
```

Esta recuperación resulta típica para plantas desalinizadoras de agua de mar.

Tabla 7.15

Recuperaciones típicas

Tipo de agua	Recuperación (%)
Agua superficial	80–90
Agua subterránea	75–90
Agua salobre	70–85
Agua de mar	35–50
Reutilización avanzada	75–90

Nota. Elaboración propia.

7.4.5 PRESIÓN TRANSMEMBRANA

La presión transmembrana representa la fuerza hidráulica efectiva aplicada sobre la membrana.

En términos simplificados puede calcularse mediante:

```
TMP
= (Pf +Pc) /2 - Pp
```

donde

TMP = presión transmembrana

Pf = presión de alimentación

Pc = presión del concentrado

Pp = presión del permeado

En ósmosis inversa debe distinguirse cuidadosamente entre:

- presión transmembrana;
- presión efectiva.

La presión efectiva incorpora además el efecto de la presión osmótica.

7.4.6 PRESIÓN EFECTIVA DE FILTRACIÓN

El flujo de agua depende realmente de:

$$\Delta Pe = TMP - \Delta\pi$$

donde

ΔPe = presión efectiva

TMP = presión transmembrana

$\Delta\pi$ = diferencia de presión osmótica

Esta ecuación resume prácticamente toda la hidráulica de la ósmosis inversa.

Puede observarse que:

- aumentar la presión hidráulica incrementa el flujo;
- aumentar la presión osmótica reduce el flujo.

Interpretación ingenieril

Con la misma presión transmembrana, dos plantas pueden entregar caudales muy distintos si la salinidad de su agua de alimentación no es igual.

7.4.7 FLUJO DE PERMEADO

Aplicando el modelo de solución-difusión:

$$Jw = A\Delta Pe$$

o bien,

$$Jw = A(TMP - \Delta\pi)$$

Esta ecuación constituye la herramienta principal para calcular la producción de agua.

Ejemplo 7.6

Supóngase:

$$A = 2{,}5$$

$$TMP = 60 \text{ bar}$$

$$\Delta\pi = 27 \text{ bar}$$

Entonces:

$$\Delta Pe = 33 \text{ bar}$$

y

$$Jw = 2{,}5 \times 33 = 82{,}5 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$$

Este valor representa el flujo teórico bajo las condiciones indicadas.

En la práctica deberá corregirse considerando:

- polarización por concentración;
- temperatura;
- ensuciamiento;
- envejecimiento de la membrana.

7.4.8 ÁREA NECESARIA DE MEMBRANAS

Conocido el flujo de diseño:

$$A = Qp/Jw$$

donde

A = área total

Qp = producción requerida

Jw = flujo de diseño

Ejemplo 7.7

Producción requerida:

500 m³/día

Conversión:

20,83 m³/h

Flujo:

22 L/m²·h

=0,022 m³/m²·h

Área:

A

=20,83/0,022

≈947 m²

Adicionando un margen del 15 %:

Área instalada

≈1090 m²

Tabla 7.16

Variables fundamentales del modelado hidráulico

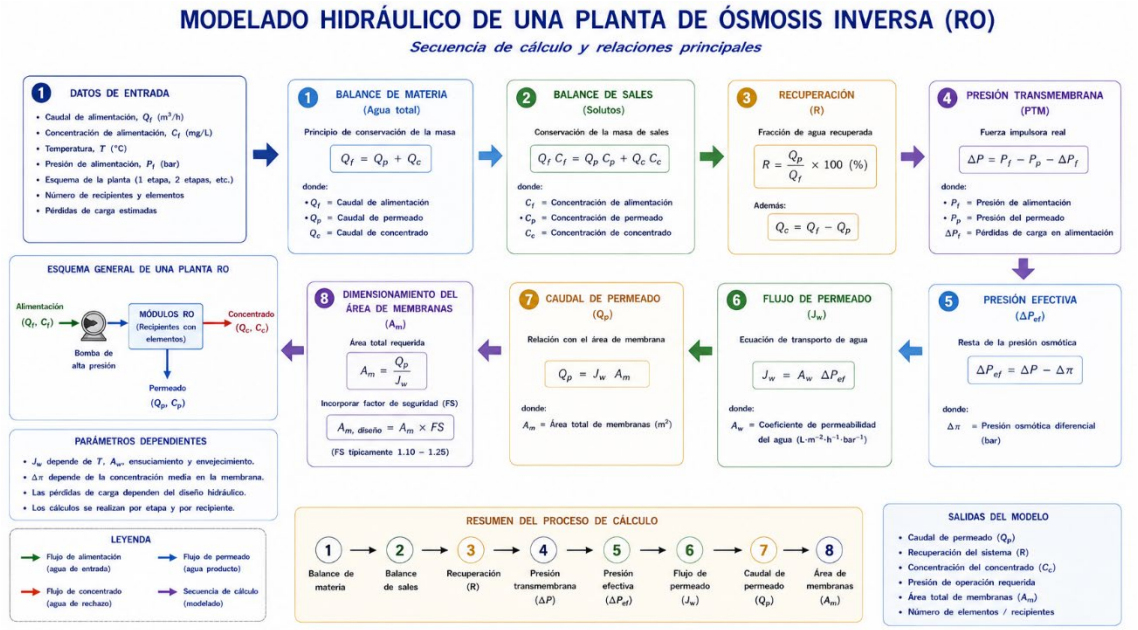
Variable	Influencia sobre el diseño
Caudal de alimentación	Define el tamaño de la planta

Variable	Influencia sobre el diseño
Recuperación	Determina el caudal de concentrado
Presión osmótica	Reduce la presión efectiva
TMP	Determina la fuerza hidráulica disponible
Flujo de diseño	Define el área instalada
Área de membranas	Determina el número de módulos
Temperatura	Modifica la permeabilidad
Salinidad	Incrementa la presión osmótica

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.11

Diagrama conceptual del modelado hidráulico de una planta de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Con el modelado hidráulico, los datos fisicoquímicos de partida se convierten en un diseño que se puede ejecutar. Las ecuaciones básicas son relativamente simples, pero aplicarlas bien requiere comprender cómo se relacionan la hidráulica, la termodinámica y el transporte de masa. En el ejercicio profesional, sirven como punto de partida para usar simuladores especializados y para optimizar plantas que desalan agua salobre o agua de mar.

7.4.9 PÉRDIDAS DE CARGA Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN EN RECIPIENTES DE MEMBRANAS

Dentro del recipiente que aloja los elementos de membrana, la presión que impone la bomba de alta presión va cambiando de un extremo a otro, y no se mantiene fija, cuando el sistema es de ósmosis inversa.

Cuando el agua avanza por los canales de alimentación aparecen pérdidas de carga, que se originan por:

- fricción con las paredes;
- fricción con los espaciadores;
- cambios de dirección del flujo;
- reducción progresiva del caudal;
- incremento de la viscosidad debido al aumento de la concentración salina.

Por ello, la presión disponible va bajando poco a poco entre el primer elemento y el último del recipiente.

Desde el punto de vista de la ingeniería, este fenómeno modifica simultáneamente:

- el flujo de permeado;
- la presión efectiva;
- la recuperación local;
- el rechazo de sales;
- el consumo energético.

Por eso, en el diseño hidráulico conviene analizar cada recipiente como sistema distribuido; considerarlo una unidad única de separación sería un error.

7.4.9.1 Origen de las pérdidas de carga

Las pérdidas de carga corresponden a energía mecánica que se convierte en calor por la fricción del fluido mientras circula.

En un recipiente de ósmosis inversa las pérdidas ocurren principalmente en:

- canales de alimentación;
- espaciadores hidráulicos (*feed spacers*);
- conexiones entre elementos;

- distribuidores de entrada;
- colectores de salida.

La magnitud de estas pérdidas depende de:

- velocidad del agua;
- geometría del espaciador;
- viscosidad;
- rugosidad superficial;
- longitud recorrida.

Interpretación ingenieril

Un solo elemento pierde poca carga, pero todos juntos pueden restar varios bar de presión y reducir con claridad la productividad de los módulos finales.

7.4.9.2 Perfil de presión a lo largo del recipiente

Sea un recipiente con ocho elementos de membrana.

La presión de alimentación al primer elemento puede ser, por ejemplo:

$$Pf = 62 \text{ bar}$$

Después de atravesar sucesivamente los elementos, la presión disminuye gradualmente.

Un perfil simplificado podría ser:

Tabla 7.17

Ejemplo simplificado de distribución de presión en un recipiente con ocho elementos.

Elemento	Presión aproximada (bar)
1	62,0
2	61,4
3	60,8
4	60,1
5	59,4
6	58,7
7	58,0
8	57,2

Nota. Elaboración propia.

Puede observarse que la disminución acumulada alcanza aproximadamente:

$\Delta P \approx 4{,}8$ bar

Este valor se debe sumar al cálculo de la presión efectiva que le queda a cada elemento.

7.4.9.3 Variación del caudal

Además de disminuir la presión, también disminuye el caudal de alimentación.

Cada elemento produce permeado.

En consecuencia:

$Qa1 > Qa2 > Qa3 > \ldots > Qa8$

donde:

$Qa1$ = caudal que ingresa al primer elemento

$Qa8$ = caudal que llega al último elemento

Esta disminución modifica:

- la velocidad del flujo;
- el coeficiente de transferencia de masa;
- la polarización por concentración.

Por ello, cada elemento trabaja bajo condiciones hidráulicas diferentes.

7.4.9.4 Incremento progresivo de la concentración

Mientras el caudal disminuye, la concentración salina aumenta.

Puede expresarse cualitativamente como:

$C1 < C2 < C3 < \ldots < C8$

donde:

$C1$ = concentración en el primer elemento

$C8$ = concentración en el último elemento

Este comportamiento produce:

- mayor presión osmótica;
- menor presión efectiva;
- menor flujo de permeado.

En consecuencia, el último elemento suele producir un caudal inferior al primero.

Interpretación ingenieril

Así se entiende que el permeado no se produzca de forma pareja en todo el recipiente, y que en instalaciones grandes el diseño hidráulico tenga que hacerse elemento por elemento.

7.4.9.5 Pérdida de carga mediante la ecuación de Darcy–Weisbach

La ecuación de Darcy–Weisbach sirve, en la ingeniería de detalle, para estimar cuánta carga se pierde dentro de los canales por donde circula el agua:

$$hf = f\,(L/Dh)\,(V^2/2g)$$

donde:

hf = pérdida de carga

f = factor de fricción

L = longitud del canal

Dh = diámetro hidráulico

V = velocidad media

g = aceleración de la gravedad

En los canales de las membranas, el diámetro hidráulico equivale al espacio libre que dejan los espaciadores.

En la industria, el factor de fricción exacto se suele obtener con correlaciones experimentales propias de cada geometría de espaciador.

7.4.9.6 Influencia de los espaciadores hidráulicos

Los espaciadores cumplen simultáneamente dos funciones.

Por un lado:

- incrementan la turbulencia;
- reducen la polarización por concentración.

Por otro:

- aumentan las pérdidas de carga.

Como consecuencia, su geometría debe optimizarse cuidadosamente.

Actualmente, numerosos fabricantes emplean simulaciones CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para desarrollar espaciadores capaces de maximizar la transferencia de masa con el menor incremento posible de la pérdida de carga.

Interpretación ingenieril

El espaciador es uno de los terrenos donde más se innova en la ingeniería de membranas. Si su geometría se optimiza, la planta puede producir más y gastar menos energía al mismo tiempo.

7.4.9.7 Distribución del flujo de permeado

Como la presión efectiva va cayendo, el flujo que genera cada elemento también se reduce.

Un ejemplo simplificado podría ser:

Tabla 7.18

Ejemplo ilustrativo que muestra la reducción relativa del flujo de permeado desde la entrada hasta el final de un recipiente.

Elemento	Flujo relativo (%)
1	100
2	97
3	94
4	91
5	88
6	85
7	82
8	79

Nota. Elaboración propia.

Los valores presentados sirven únicamente de referencia; cambian con la recuperación, la temperatura, la composición del agua y la presión a la que se opera.

7.4.9.8 Implicancias para el diseño

Como la presión y la concentración no se reparten de manera uniforme, el ingeniero debe tener en cuenta en el diseño:

- pérdidas de carga admisibles;
- presión mínima disponible en el último elemento;
- recuperación por recipiente;
- recuperación por etapa;
- riesgo de incrustaciones;
- velocidad mínima del concentrado.

Todos estos parámetros influyen directamente sobre:

- la selección de bombas;
- el número de recipientes;
- el número de elementos por recipiente;
- el arreglo hidráulico.

Tabla 7.19

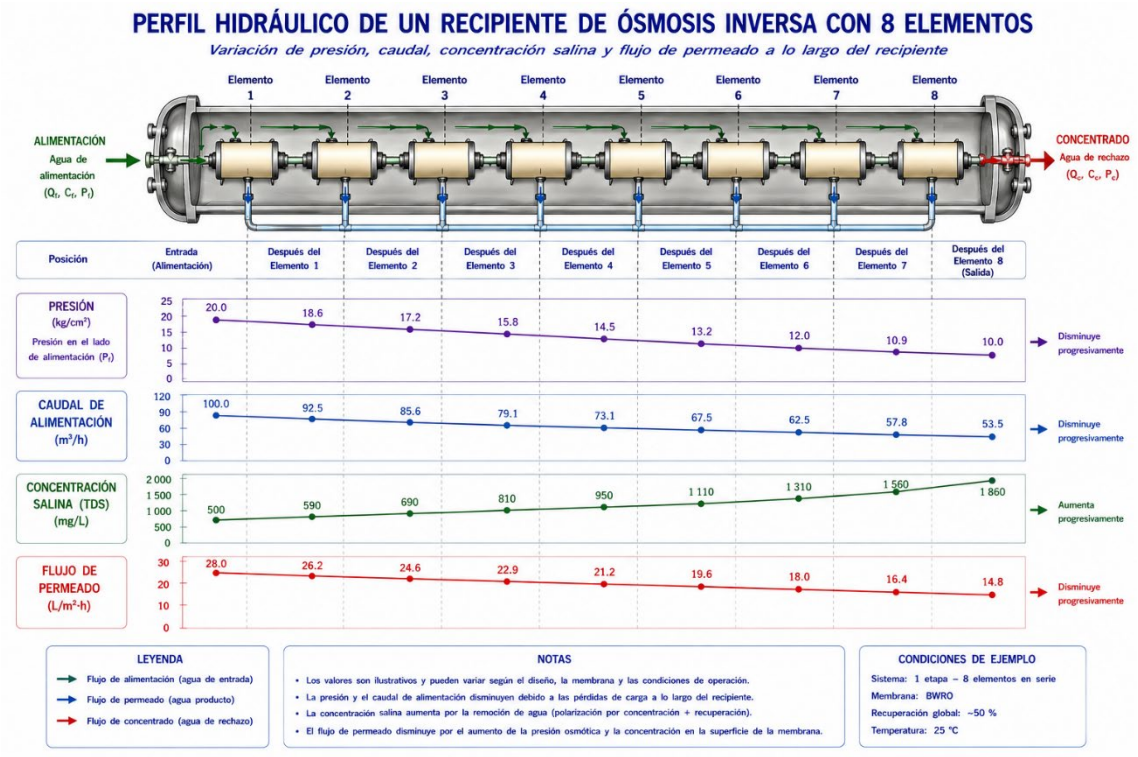
Variables que modifican el perfil hidráulico de un recipiente

Variable	Influencia
Presión de alimentación	Determina la presión inicial disponible
Número de elementos	Incrementa la pérdida de carga acumulada
Recuperación	Incrementa la concentración del concentrado
Velocidad del flujo	Modifica la pérdida de carga y la polarización
Espaciadores	Afectan simultáneamente la transferencia de masa y las pérdidas de carga
Temperatura	Modifica viscosidad y permeabilidad
Salinidad	Incrementa la presión osmótica

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.12

Perfil hidráulico de un recipiente de ósmosis inversa con ocho elementos.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Strathmann (2011), Mulder (1996), Crittenden et al. (2012) y Geise et al. (2014).

7.4.9.9 Modelado hidráulico mediante simulación computacional

Rara vez se evalúa solo con cálculo manual el comportamiento hidráulico en proyectos industriales medianos y grandes. En la práctica se combinan las ecuaciones fundamentales con simuladores que representan cómo rinde cada recipiente, cada etapa y cada tren de membranas con diferentes condiciones de operación.

Los simuladores especializados calculan de forma iterativa:

- el perfil de presión a lo largo de cada recipiente;
- la producción de permeado por elemento;
- la evolución de la concentración del concentrado;
- la presión osmótica local;
- las pérdidas de carga acumuladas;
- el consumo específico de energía;
- el riesgo de incrustaciones.

Con estos modelos se pueden contrastar distintas configuraciones hidráulicas y perfeccionar el diseño antes de que la planta se construya, lo cual resulta muy útil en la etapa previa.

Aplicaciones de la simulación

La simulación resulta especialmente útil para:

- seleccionar el número óptimo de elementos por recipiente;
- comparar configuraciones de etapas (*stages*) y pasos (*passes*);
- evaluar ampliaciones futuras de capacidad;
- analizar el efecto de variaciones estacionales en la calidad del agua;
- optimizar la recuperación sin incrementar el riesgo de *scaling*;
- calcular cómo afecta el envejecimiento de las membranas a la producción y al consumo de energía.

Reflexión ingenieril

Del estudio de la caída de presión por fricción y del reparto de la presión se concluye que no se puede diseñar una planta de ósmosis inversa asumiendo que todos los elementos operan igual. Presión, caudal y concentración son propios de cada módulo, y

esa diferencia exige un diseño distribuido. Si se unen los balances de materia, las ecuaciones de transporte y la simulación computacional, se reproduce con gran fidelidad el comportamiento hidráulico de las instalaciones industriales, y de ahí se parte para optimizar el gasto de energía y la confiabilidad operacional.

7.4.10 CORRECCIÓN DEL FLUJO POR TEMPERATURA Y NORMALIZACIÓN DEL DESEMPEÑO

Cuánto permeado produce una membrana de ósmosis inversa varía de manera notable con la temperatura del agua que ingresa.

Cuando la temperatura aumenta:

- disminuye la viscosidad del agua;
- aumenta la movilidad molecular;
- aumenta la permeabilidad hidráulica;
- aumenta el flujo de permeado.

Por el contrario, cuando la temperatura disminuye:

- aumenta la viscosidad;
- disminuye la difusión del agua;
- disminuye el flujo de permeado.

Así, la producción de una planta puede variar bastante incluso cuando las membranas están perfectamente limpias.

Debido a ello, en la operación industrial se aplican procedimientos de normalización con los que se compara el desempeño de la planta en condiciones equivalentes.

7.4.10.1 Influencia de la temperatura sobre la viscosidad

De todas las propiedades que gobiernan el transporte por la membrana, la viscosidad del agua es una de las de mayor peso.

Al aumentar la temperatura:

- disminuye la resistencia al flujo;
- aumenta la permeabilidad aparente;
- disminuye ligeramente la presión requerida.

De ahí que una misma membrana entregue caudales distintos solo por cambiar la temperatura del agua.

Ejemplo conceptual

Considérese una membrana operando bajo las mismas condiciones hidráulicas.

Tabla 7.20

Variación conceptual del flujo de permeado con la temperatura.

Temperatura (°C)	Producción relativa (%)
10	72
15	83
20	92
25	100
30	108
35	116

Nota. Elaboración propia.

Se ve que al subir la temperatura el flujo crece de forma apreciable, sin que la membrana haya cambiado en nada.

Interpretación ingenieril

Si el operador pusiera lado a lado el flujo de invierno y el de verano, podría concluir por error que las membranas ganaron o perdieron productividad. Por eso toda comparación tiene que hacerse con valores normalizados.

7.4.10.2 Factor de corrección por temperatura (Temperature Correction Factor, TCF)

Los fabricantes suministran un **Factor de Corrección por Temperatura (TCF)** que permite convertir el flujo medido a una temperatura determinada en un flujo equivalente a una temperatura de referencia, generalmente **25 °C**.

La relación puede expresarse como:

```
Q25 = Qm × TCF
```

donde

```
Q25 = flujo normalizado a 25 °C
```

Qm = flujo medido

TCF = factor de corrección por temperatura

El TCF cambia según el tipo de membrana y la temperatura a la que se opera.

Cuando la temperatura es inferior a 25 °C:

- el TCF es mayor que uno.

Cuando la temperatura es superior a 25 °C:

- el TCF es menor que uno.

Tabla 7.21

Valores orientativos del factor de corrección por temperatura

Temperatura (°C)	TCF aproximado
10	1,39
15	1,21
20	1,09
25	1,00
30	0,93
35	0,86

Nota. Elaboración propia. Los valores exactos deben obtenerse de las curvas suministradas por el fabricante de la membrana.

7.4.10.3 Ejemplo de normalización del flujo

Durante una inspección se registran los siguientes datos:

```
Producción medida = 96 m³/h
Temperatura = 20 °C
```

$$TCF = 1{,}09$$

Calcular la producción equivalente a 25 °C.

Aplicando:

```
Q25 = 96 × 1,09
```

Se obtiene:

```
Q25 = 104,6 m³/h
```

Interpretación ingenieril

Aunque la planta produce únicamente **96 m³/h** a 20 °C, su desempeño equivalente corresponde aproximadamente a **105 m³/h** a la temperatura de referencia. La diferencia se debe exclusivamente al efecto de la temperatura y no a un deterioro de las membranas.

7.4.10.4 Flujo normalizado de permeado (Normalized Permeate Flow)

El **Flujo Normalizado de Permeado (NPF)** constituye uno de los indicadores operacionales más importantes en una planta de ósmosis inversa.

Además de corregir el efecto de la temperatura, incorpora ajustes por:

- presión de operación;

- presión osmótica;
- recuperación;
- variaciones del caudal.

Gracias al NPF se compara cómo rinde la planta durante periodos prolongados de operación y se detecta pronto el ensuciamiento.

Aplicaciones

El flujo normalizado se utiliza para:

- evaluar la eficiencia de las limpiezas CIP;
- detectar fouling;
- identificar compactación de membranas;
- programar mantenimiento preventivo;
- verificar garantías del fabricante.

7.4.10.5 Rechazo normalizado de sales

El rechazo también debe analizarse mediante indicadores normalizados.

Un aumento progresivo de la conductividad del permeado puede indicar:

- envejecimiento de la membrana;
- daño químico;
- roturas mecánicas;
- defectos en juntas tóricas;
- deterioro de la capa activa.

Por ello, el flujo normalizado debe interpretarse conjuntamente con el rechazo normalizado.

Tabla 7.22

Indicadores normalizados de desempeño

Indicador	Aplicación
Flujo normalizado de permeado	Evaluar productividad real
Rechazo normalizado	Evaluar integridad de la membrana
Presión diferencial normalizada	Detectar fouling hidráulico
Consumo específico normalizado	Evaluar eficiencia energética

plantas de ósmosis inversa.

Nota. Elaboración propia.

7.4.10.6 Tendencias operacionales

Más que fijarse en un dato aislado, importa interpretar cómo evolucionan las tendencias.

Por ejemplo:

- disminución gradual del flujo normalizado → posible fouling;
- incremento de la presión diferencial → posible obstrucción hidráulica;
- aumento de la conductividad del permeado → deterioro de membranas;
- incremento del consumo energético → pérdida de eficiencia del sistema.

El análisis conjunto de estos indicadores permite diagnosticar tempranamente problemas operacionales.

Interpretación ingenieril

Si el flujo disminuye mientras sube la presión diferencial, lo habitual es que se trate de fouling. Si el flujo baja y la presión diferencial casi no varía, entonces puede haber compactación de la membrana o cambios en el agua de alimentación.

7.4.10.7 Automatización del monitoreo

Las plantas modernas incorporan sistemas SCADA capaces de calcular automáticamente:

- flujo normalizado;
- rechazo normalizado;
- recuperación;
- presión diferencial;
- consumo específico de energía;
- índices de desempeño (KPI).

Si alguno de estos indicadores pasa los límites fijados, el sistema emite alarmas para que se intervenga antes de que la producción sufra.

Una de las tendencias de mayor fuerza en la industria del agua es combinar estos algoritmos con mantenimiento predictivo apoyado en inteligencia artificial.

Tabla 7.23

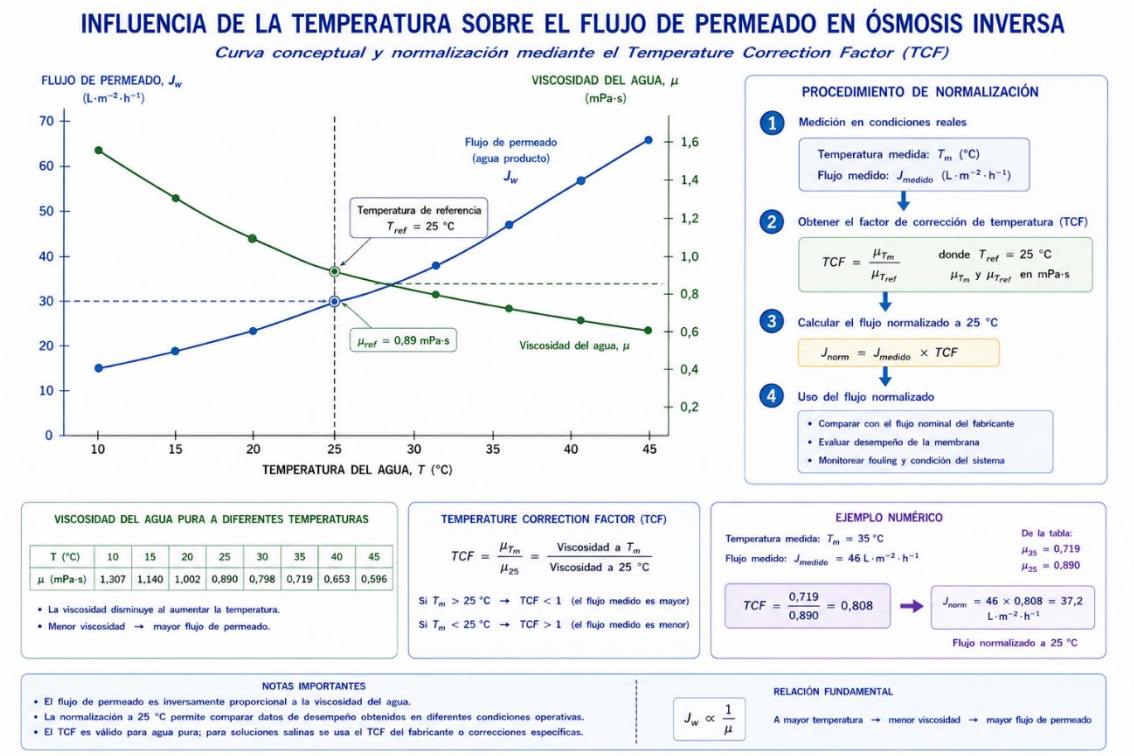
Indicadores recomendados para el monitoreo continuo

Indicador	Frecuencia recomendada
Producción de permeado	Continua
Conductividad del permeado	Continua
Presión diferencial	Continua
Temperatura	Continua
Recuperación	Continua
Flujo normalizado	Automática
Consumo específico de energía	Automática
Índice de desempeño global	Diario

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.13

Curva conceptual que muestra la influencia de la temperatura sobre el flujo de permeado.



Nota. Elaboración propia con base en manuales técnicos de fabricantes de membranas y literatura especializada en ingeniería de membranas.

Reflexión ingenieril

Normalizar el desempeño es una herramienta indispensable cuando se opera hoy una planta de ósmosis inversa. Si no se hiciera, resultaría imposible diferenciar lo que es oscilación natural del proceso de lo que es un problema real en las membranas. Emplear indicadores normalizados de manera sistemática ayuda a afinar los programas de

limpieza, bajar los costos de operación, alargar la duración de las membranas y dar más confiabilidad al sistema.

7.4.11 MODELADO HIDRÁULICO AVANZADO Y SIMULACIÓN DE PLANTAS DE ÓSMOSIS INVERSA

Diseñar una planta de ósmosis inversa de hoy exige resolver simultáneamente muchas ecuaciones: los balances de materia y energía, el transporte del agua y de los solutos, la presión osmótica, las pérdidas de carga y la polarización por concentración.

El cálculo manual es impracticable cuando la planta tiene cientos de elementos de membrana distribuidos en decenas de recipientes y en varios trenes.

Por tanto, en las fases de ingeniería básica y también en la de detalle se usan modelos computacionales que reproducen el comportamiento hidráulico de toda la instalación.

Hoy día, estos modelos son el instrumento principal con que se optimiza el diseño antes de construir la planta.

7.4.11.1 Objetivos del modelado hidráulico avanzado

La simulación hidráulica persigue diversos objetivos.

Entre los principales destacan:

- verificar la producción requerida;
- optimizar la recuperación del sistema;
- minimizar el consumo específico de energía;
- reducir el riesgo de incrustaciones;
- seleccionar el número óptimo de recipientes;
- definir la configuración por etapas;
- evaluar diferentes tipos de membranas;
- analizar futuras ampliaciones.

El modelo permite estudiar múltiples alternativas sin necesidad de construir prototipos físicos.

Interpretación ingenieril

Una simulación bien hecha puede recortar bastante los costos de ingeniería, bajar el riesgo de sobredimensionar y prevenir problemas operacionales en la puesta en marcha.

7.4.11.2 Información requerida

Todo modelo hidráulico debe construirse utilizando información representativa del proyecto.

Los datos mínimos necesarios incluyen:

Agua de alimentación

- caudal;
- temperatura;
- pH;
- conductividad;
- composición iónica completa;
- SDI;
- turbidez;
- carbono orgánico total.

Membranas

- área efectiva;
- permeabilidad hidráulica;
- permeabilidad al soluto;
- presión máxima;
- rechazo nominal;
- dimensiones del elemento.

Condiciones de diseño

- producción requerida;
- recuperación objetivo;
- presión máxima disponible;
- calidad requerida del permeado;
- número preliminar de etapas.

La calidad del modelo dependerá directamente de la confiabilidad de esta información.

7.4.11.3 Estructura general del modelo

El simulador resuelve iterativamente los balances correspondientes a cada elemento de membrana.

Para cada elemento calcula:

- presión de alimentación;
- presión de concentrado;
- presión osmótica;
- flujo de agua;
- flujo de sales;
- producción de permeado;
- concentración del concentrado;
- pérdidas de carga.

Luego va juntando todos los elementos hasta obtener cómo se comporta el recipiente completo y, por último, la planta en su totalidad.

Secuencia de cálculo

El procedimiento iterativo puede resumirse en los siguientes pasos:

Paso 1. Introducir las características del agua de alimentación.

Paso 2. Seleccionar el modelo de membrana.

Paso 3. Definir el arreglo hidráulico.

Paso 4. Estimar la presión inicial.

Paso 5. Calcular el flujo de permeado por elemento.

Paso 6. Actualizar la concentración del concentrado.

Paso 7. Recalcular la presión osmótica.

Paso 8. Determinar la presión disponible para el siguiente elemento.

Paso 9. Repetir el procedimiento hasta el último elemento.

7.4.11.4 Variables calculadas por el simulador

Una simulación profesional proporciona una gran cantidad de resultados.

Los principales son:

Variables hidráulicas

- presión por elemento;
- presión diferencial;
- caudal por recipiente;
- velocidad del flujo;
- pérdidas de carga.

Variables de producción

- producción por elemento;
- producción por recipiente;
- producción por etapa;
- producción total.

Variables de calidad

- conductividad del permeado;
- rechazo de sales;
- concentración del concentrado;
- recuperación.

Variables energéticas

- potencia requerida;
- consumo específico de energía;
- eficiencia del sistema;
- energía recuperable.

Tabla 7.24

Variables obtenidas mediante simulación hidráulica

Grupo	Variables principales
Hidráulicas	Presión, caudal, pérdidas de carga
Transporte	Flujo de agua y de solutos
Calidad	Conductividad, rechazo, recuperación
Energéticas	Potencia, consumo específico, eficiencia
Operacionales	Flujo normalizado, presión diferencial

Nota. Elaboración propia.

7.4.11.5 Análisis de sensibilidad

El modelado tiene la gran ventaja de permitir ver cómo influye cada variable en el desempeño de la planta.

Las variables que normalmente se estudian son:

- temperatura;
- salinidad;
- presión de operación;
- recuperación;
- tipo de membrana;
- número de recipientes;
- número de etapas;
- eficiencia de la bomba.

Para cada escenario el simulador calcula automáticamente las nuevas condiciones de operación.

Ejemplo conceptual

Supóngase una planta diseñada para una recuperación del 45 %.

El ingeniero desea evaluar qué ocurriría si la recuperación aumenta al 50 %.

La simulación permitirá estimar:

- incremento de la producción;
- aumento de la presión osmótica;
- incremento del riesgo de *scaling*;
- variación del consumo energético;
- modificación de la calidad del permeado.

Este análisis facilita la selección de la alternativa más conveniente.

7.4.11.6 Validación del modelo

Antes de apoyarse en un modelo para decidir, hay que comprobar que sí reproduce bien lo que hace el sistema.

La validación puede realizarse mediante:

- comparación con datos de plantas piloto;
- comparación con resultados experimentales;
- contraste con datos históricos de operación;
- análisis estadístico del error.

Entre los indicadores más utilizados destacan:

- error medio absoluto;
- error porcentual medio;
- raíz del error cuadrático medio;
- coeficiente de determinación.

Una adecuada validación incrementa la confiabilidad de las predicciones del modelo.

Interpretación ingenieril

Más complejo no siempre es mejor. La calidad de una simulación descansa sobre todo en que los datos de entrada sean representativos y en que los parámetros empleados estén bien validados.

7.4.11.7 Optimización hidráulica

Una vez validado el modelo, puede utilizarse para optimizar el diseño.

Los objetivos habituales incluyen:

- minimizar el consumo específico de energía;
- maximizar la recuperación;
- reducir la presión de operación;
- minimizar el número de recipientes;
- reducir el riesgo de incrustaciones;
- aumentar la vida útil de las membranas.

Lo usual es optimizar cambiando variables una y otra vez hasta llegar a la solución técnica más conveniente.

7.4.11.8 Simulación de escenarios operacionales

Más allá del diseño inicial, el modelo sirve para estudiar situaciones que pueden surgir mientras la planta opera.

Por ejemplo:

- incremento estacional de la temperatura;
- aumento de la salinidad del agua de alimentación;
- envejecimiento de las membranas;
- ampliación de la capacidad instalada;
- sustitución de un modelo de membrana por otro de mayor permeabilidad;
- reducción del rendimiento de las bombas.

Estos estudios facilitan la planificación de estrategias de operación y mantenimiento.

Tabla 7.25

Aplicaciones del modelado hidráulico avanzado

Aplicación	Objetivo
Diseño conceptual	Seleccionar configuración preliminar
Ingeniería básica	Optimizar presión y recuperación
Ingeniería de detalle	Dimensionar equipos y tuberías
Puesta en marcha	Comparar diseño con operación real
Optimización	Reducir consumo energético
Expansión futura	Evaluar nuevas etapas y trenes

Nota. Elaboración propia.

7.4.11.9 Limitaciones del modelado

Aunque los simuladores constituyen herramientas muy potentes, presentan ciertas limitaciones.

Los resultados dependen de:

- la calidad de los datos de entrada;
- la precisión del modelo termodinámico;
- las hipótesis adoptadas;
- la representatividad de las propiedades de la membrana.

A esto se suma que el fouling biológico, la compactación gradual de la membrana y los cambios transitorios en la operación suelen exigir modelos más complejos o más información experimental.

Por eso la simulación debe verse como un apoyo para decidir, nunca como reemplazo del criterio profesional del ingeniero.

Figura 7.14

Esquema general del proceso de modelado hidráulico de una planta de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

El modelado hidráulico avanzado conecta la ciencia de base con el ejercicio de la ingeniería del agua como profesión. Más que calcular caudales o presiones, su valor está en permitir una evaluación objetiva de muchas opciones de diseño, antes de comprometer inversiones importantes. El ingeniero que domina la física y las matemáticas detrás del modelo puede leer con criterio lo que arroje cualquier software especializado, descubrir incoherencias y plantear soluciones técnicas firmes.

7.5 SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Uno de los grandes retos de la ósmosis inversa es la energía que se consume para generar las altas presiones con las que se supera la presión osmótica del agua marina.

En una planta desaladora convencional, del agua que se alimenta, entre 40 % y 60 % termina como concentrado. Esa corriente es muy salina, pero guarda buena porción de la energía hidráulica que le dio la bomba de alta presión.

Si esa energía se botara directamente al sistema de rechazo, la pérdida sería grande y el costo de producir agua desalinizada subiría de forma notable.

Con el propósito de aprovechar esta energía residual se desarrollaron los **Dispositivos de Recuperación de Energía (Energy Recovery Devices, ERD)**.

Con estos equipos, parte importante de la energía que lleva el concentrado pasa a la corriente de alimentación y la bomba principal realiza menos trabajo.

Esta tecnología hizo caer de forma extraordinaria el consumo específico de energía en las plantas actuales y volvió económicamente viable producir agua potable a partir de agua de mar.

Hoy casi todas las plantas desalinizadoras grandes llevan algún sistema de recuperación de energía.

7.5.1 FUNDAMENTO ENERGÉTICO

Para entender la importancia de los ERD hay que revisar un balance simplificado de la energía en la planta de ósmosis inversa.

La bomba de alta presión suministra energía al agua de alimentación.

Parte de esta energía se utiliza para producir permeado.

Sin embargo, una fracción importante se queda en el concentrado, porque este sale del sistema casi a la presión de operación.

Por ejemplo:

si una planta opera a

```
65 bar
```

el concentrado puede salir todavía a

```
62–64 bar
```

Lo anterior significa que la mayor parte de la energía hidráulica continúa disponible.

En vez de disiparla en válvulas de control, es mucho más eficiente devolverla al agua de alimentación.

Este principio constituye el fundamento de todos los sistemas modernos de recuperación de energía.

Interpretación ingenieril

Desde la termodinámica, el concentrado no es un residuo sin valor energético; es una corriente a alta presión que puede producir trabajo útil. La tarea del ingeniero es recuperar de ella la porción más grande posible antes de descargar el rechazo.

7.5.2 BALANCE SIMPLIFICADO DE ENERGÍA

Aplicando el principio de conservación de la energía:

Potencia suministrada = Potencia útil + Pérdidas

La potencia hidráulica puede estimarse mediante:

$$P = Q\Delta P$$

o, considerando la eficiencia de la bomba,

$$P = Q\Delta P / \eta$$

donde:

P = potencia hidráulica (W)

Q = caudal (m^3/s)

ΔP = incremento de presión (Pa)

η = eficiencia de la bomba

Con esta ecuación se puede estimar el consumo de energía de los sistemas de bombeo.

Ejemplo 7.8

Una planta requiere bombear:

$$Q = 0{,}12\ m^3/s$$

hasta una presión de:

$$\Delta P = 6\ MPa$$

La eficiencia de la bomba es:

$$\eta = 0{,}85$$

Calcular la potencia requerida.

Aplicando:

$$P = (0{,}12 \times 6 \times 10^6) / 0{,}85$$

se obtiene:

$P \approx 847\ kW$

Este valor corresponde únicamente a la potencia hidráulica requerida por la bomba principal.

Interpretación ingenieril

Sin recuperación de energía, toda esa potencia tendría que salir del sistema eléctrico de la planta de forma continua.

7.5.3 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

El indicador energético más utilizado en desalación es el **Consumo Específico de Energía (Specific Energy Consumption, SEC)**.

Se define como:

SEC = Energía consumida / Volumen de permeado

Sus unidades habituales son:

kWh/m^3

Este indicador permite comparar plantas de diferente capacidad.

Valores típicos son:

Tabla 7.26

Consumo específico de energía en diferentes sistemas de ósmosis inversa.

Tipo de planta	SEC (kWh/m³)
Agua salobre	0,8–2,0
Agua de mar sin ERD	6–8
Agua de mar con ERD moderno	2,5–3,5

Nota. Elaboración propia.

Se observa que, con dispositivos de recuperación energética, el consumo eléctrico del agua de mar queda en cerca de la mitad.

7.5.4 BENEFICIOS DE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Los principales beneficios son:

- reducción del consumo eléctrico;
- disminución de costos operacionales;
- menor tamaño de bombas;
- reducción de emisiones de CO_2;
- menor costo del agua producida;

- mayor sostenibilidad del proceso.

En instalaciones grandes, lo que se ahorra a lo largo de la vida útil puede sumar varios millones de dólares.

7.5.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

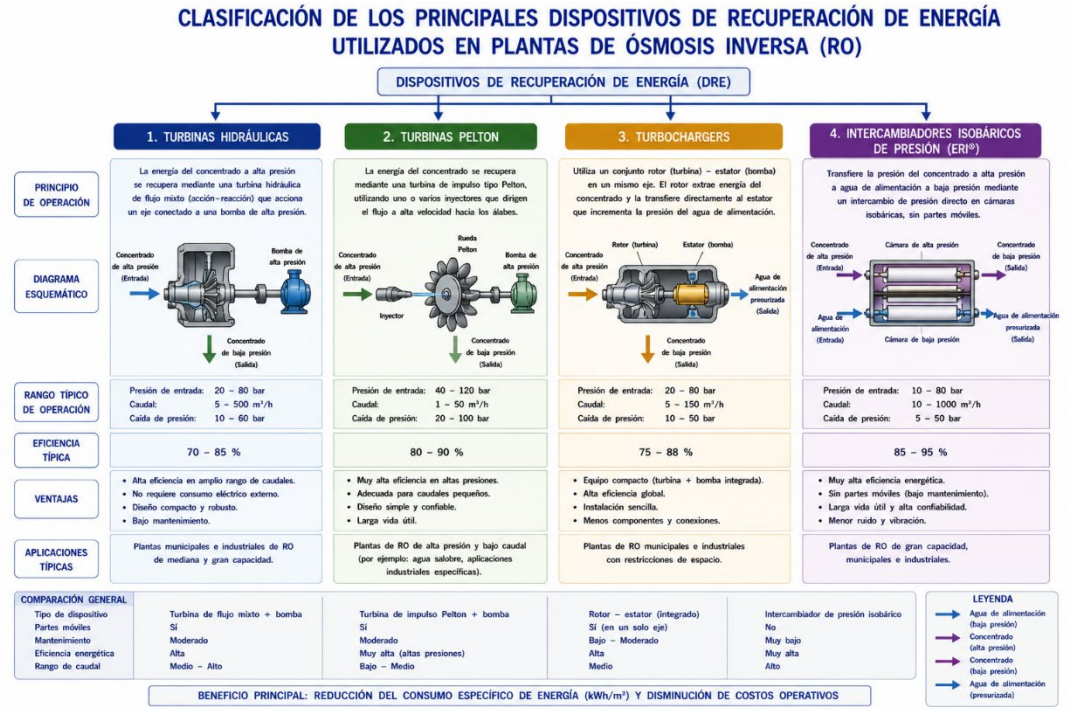
Los dispositivos de recuperación de energía pueden clasificarse en cuatro grandes grupos:

- turbinas hidráulicas;
- turbinas Pelton;
- turbochargers o amplificadores hidráulicos;
- intercambiadores isobáricos de presión (*Pressure Exchangers*).

Cada uno presenta características particulares de eficiencia, complejidad y costo.

Figura 7.15

Clasificación de los principales dispositivos de recuperación de energía.



Nota. Elaboración propia con base en Fritzmann et al. (2007), Crittenden et al. (2012), Baker (2012) y Strathmann (2011).

7.5.6 EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA

La evolución histórica de los ERD puede resumirse en cuatro generaciones.

Primera generación

Las primeras plantas utilizaban válvulas de estrangulamiento.

Toda la energía del concentrado se perdía.

El consumo específico superaba frecuentemente:

$8\ kWh/m^3$

Segunda generación

Posteriormente se incorporaron turbinas hidráulicas.

La eficiencia energética mejoró significativamente.

Tercera generación

Aparecieron los turbochargers hidráulicos.

Estos equipos permitieron transferir directamente parte de la energía hacia la corriente de alimentación.

Cuarta generación

Actualmente predominan los intercambiadores isobáricos de presión.

Estos dispositivos alcanzan eficiencias superiores al:

$95–98\ \%$

constituyendo el estándar mundial en plantas desalinizadoras de gran capacidad.

Tabla 7.27

Evolución de los dispositivos de recuperación de energía

Generación	Tecnología	Eficiencia aproximada
Primera	Descarga directa	0 %
Segunda	Turbinas hidráulicas	70–80 %
Tercera	Turbochargers	80–90 %
Cuarta	Intercambiadores isobáricos	95–98 %

Nota. Elaboración propia.

7.5.7 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN

La selección del dispositivo depende de múltiples factores:

- capacidad de la planta;
- presión de operación;
- recuperación;

- consumo energético objetivo;
- costo de inversión;
- facilidad de mantenimiento;
- disponibilidad de repuestos;
- experiencia operacional.

En plantas pequeñas pueden resultar adecuados sistemas relativamente simples.

Aun así, para instalaciones de gran capacidad, la opción técnicamente más eficiente hoy son los intercambiadores isobáricos.

Reflexión ingenieril

Hay pocos avances tan importantes en la desalación mediante ósmosis inversa como la recuperación de energía. Visto desde la ingeniería, estos dispositivos aprovechan un rechazo de alta presión como fuente útil de energía, y así mejoran a la vez el rendimiento energético, la sostenibilidad ambiental y la competitividad económica. Escoger bien el sistema repercute directamente en lo que cuesta el agua producida a lo largo de la vida de la planta, y pocas decisiones de diseño en los proyectos modernos tienen tanta trascendencia.

7.5.8 TURBINAS HIDRÁULICAS Y TURBINAS PELTON

Las primeras máquinas usadas para recuperar la energía del concentrado que sale de plantas con ósmosis inversa fueron las turbinas hidráulicas. Convierten esa energía en rotación mecánica, que puede accionar equipos auxiliares o aliviar parte de la potencia que consume la bomba principal.

Hoy los sistemas más eficientes las han desplazado en buena medida, pero las turbinas siguen empleándose en ciertas aplicaciones por su sencillez mecánica, su alta confiabilidad y lo fácil que es mantenerlas.

7.5.8.1 Principio de funcionamiento

El concentrado deja el sistema, una vez que cruza los módulos de membrana, con una presión que sigue siendo apreciable.

Una turbina hidráulica recibe el concentrado, en vez de que su presión se pierda en una válvula de estrangulamiento.

Al expandirse a través de la turbina:

- disminuye su presión;
- aumenta su velocidad;
- transfiere energía al rotor;
- produce movimiento de rotación.

Esta energía mecánica puede emplearse para:

- accionar directamente una bomba;
- impulsar un generador eléctrico;
- asistir a la bomba de alta presión.

Se aplica el mismo principio físico de las centrales hidroeléctricas, pero adaptado a los caudales y presiones propios de la desalación.

Interpretación ingenieril

Crear presión adicional no es lo que hace la turbina para recuperar energía; transforma la energía hidráulica que hay en trabajo mecánico aprovechable. Por eso lo recuperado está ligado al caudal del concentrado y a la presión residual con que sale del sistema.

7.5.8.2 Fundamentos energéticos

La potencia hidráulica disponible en el concentrado puede estimarse mediante:

$$P = Q\,\Delta P$$

Considerando el rendimiento de la turbina:

$$Prec = \eta t \cdot Q \cdot \Delta P$$

donde:

Prec = potencia recuperada (W)

ηt = eficiencia de la turbina

Q = caudal del concentrado (m^3/s)

ΔP = caída de presión (Pa)

El diseño hidráulico, el régimen de operación y el tipo de turbina determinan la eficiencia.

7.5.8.3 Turbinas Pelton

Las turbinas Pelton son de impulso y se diseñan para presiones altas con caudales relativamente moderados.

En ellas, el concentrado se expande al pasar por una boquilla, que convierte la presión en velocidad.

El chorro, ya a gran velocidad, afecta unas cucharas de forma especial y hace girar el rodete.

Posteriormente el agua abandona la turbina prácticamente a presión atmosférica.

Componentes principales

Una turbina Pelton está constituida por:

- boquilla de expansión;
- aguja reguladora;
- rodete con cucharas;
- eje;
- cojinetes;
- carcasa protectora.

Cada componente contribuye a maximizar la conversión de energía hidráulica en energía mecánica.

Ventajas

Las principales ventajas son:

- diseño sencillo;
- elevada confiabilidad;
- bajo costo de mantenimiento;
- buena respuesta frente a variaciones de caudal;
- larga vida útil.

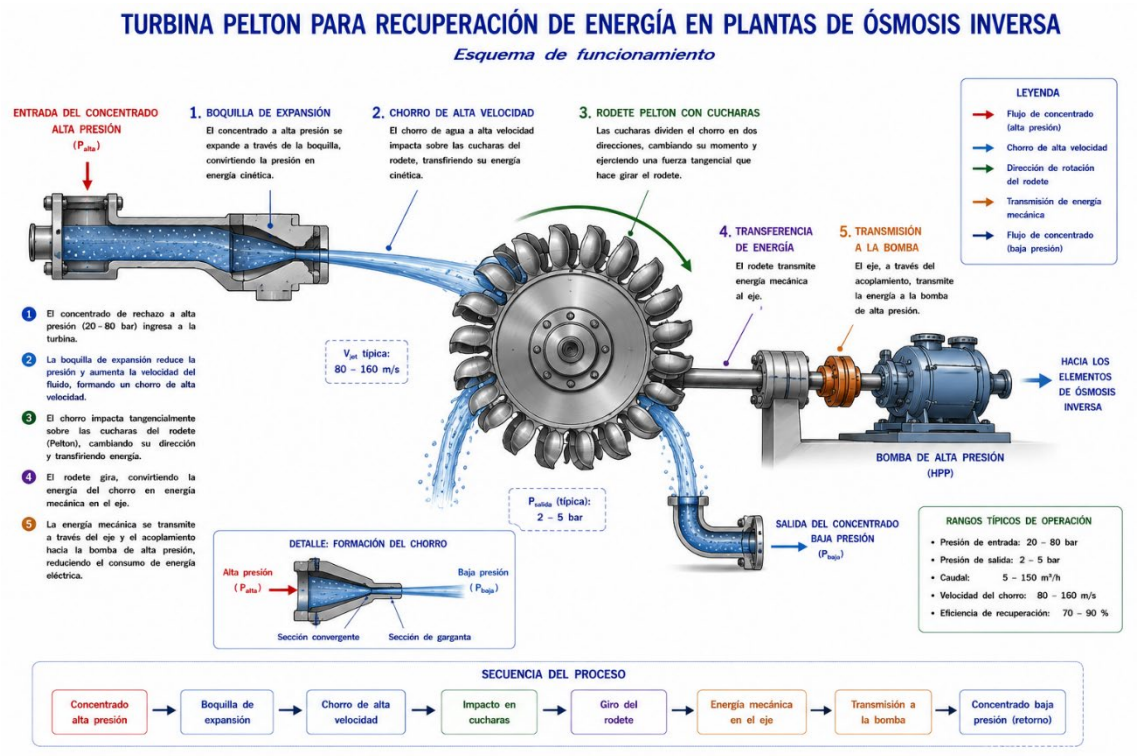
Limitaciones

Entre sus principales limitaciones destacan:

- menor eficiencia que los intercambiadores isobáricos;
- presencia de pérdidas mecánicas;
- necesidad de equipos de transmisión;
- menor aprovechamiento de la energía residual.

Figura 7.16

Esquema de funcionamiento de una turbina Pelton.



Nota. Elaboración propia con base en Fritzmann et al. (2007), Baker (2012) y Crittenden et al. (2012).

7.5.8.4 Turbinas tipo Francis y otras configuraciones

Junto a las Pelton, algunas plantas han empleado turbinas de reacción, en especial del tipo Francis.

En estas máquinas, la energía se transforma a la vez por variaciones de la presión y de la velocidad del fluido.

En ósmosis inversa su uso es hoy limitado, pues ofrecen menos ventajas que los modernos dispositivos isobáricos.

Sin embargo, continúan siendo importantes desde el punto de vista histórico y académico.

7.5.8.5 Integración con la bomba de alta presión

Muchas instalaciones conectan la turbina con la bomba de alta presión mecánicamente, a través de un eje que ambas comparten.

De esta forma:

- la bomba recibe parte de la potencia recuperada;
- disminuye la potencia suministrada por el motor eléctrico;

- mejora la eficiencia global del sistema.

La potencia requerida por el motor puede expresarse como:

```
Pmotor = Pbomba − Prec
```

donde:

```
Pmotor = potencia suministrada por el motor
Pbomba = potencia requerida por la bomba
```

Prec = potencia recuperada

Esta relación evidencia el beneficio energético de incorporar una turbina de recuperación.

Ejemplo 7.9

Una bomba requiere una potencia de:

```
Pbomba = 900 kW
```

La turbina recupera:

Prec = 230 kW

La potencia que debe suministrar el motor será:

```
Pmotor = 900 − 230 = 670 kW
```

Por tanto, el sistema reduce en aproximadamente un **26 %** la potencia demandada por el motor principal.

Interpretación ingenieril

Aunque la recuperación es significativa, aún se desaprovecha una parte importante de la energía hidráulica. Este hecho impulsó el desarrollo de tecnologías más eficientes, como los **turbochargers** y, posteriormente, los **intercambiadores isobáricos de presión**.

7.5.8.6 Eficiencia de las turbinas

La eficiencia global depende de diversos factores:

- diseño hidráulico;
- velocidad de rotación;
- caudal tratado;
- pérdidas mecánicas;
- desgaste de componentes;

- régimen de operación.

En condiciones adecuadas, las turbinas Pelton empleadas en desalación presentan eficiencias comprendidas aproximadamente entre **75 % y 85 %**.

Estos valores se tuvieron por excelentes durante años, pero hoy quedan por debajo de lo que logran los sistemas isobáricos modernos.

Tabla 7.28

Características generales de las turbinas utilizadas para recuperación de energía

Característica	Turbina Pelton	Turbina Francis
Principio de funcionamiento	Impulso	Reacción
Presiones de operación	Altas	Medias
Eficiencia típica	75–85 %	70–85 %
Complejidad mecánica	Baja	Media
Aplicación actual	Limitada	Muy limitada

Nota. Elaboración propia.

7.5.8.7 Aplicaciones actuales

Pese a haber cedido protagonismo a los dispositivos isobáricos, las turbinas aún se encuentran en:

- plantas construidas durante las décadas de 1980 y 1990;
- instalaciones de pequeña capacidad;
- proyectos donde la simplicidad mecánica constituye un criterio prioritario;
- procesos industriales específicos.

En nuevas plantas desalinizadoras de gran capacidad, su utilización es cada vez menos frecuente.

7.5.8.8 Comparación con tecnologías modernas

Hoy se ven las turbinas como una tecnología puente: quedaron entre los sistemas pioneros de recuperación energética y los intercambiadores isobáricos modernos.

Sus principales diferencias respecto a estos últimos son:

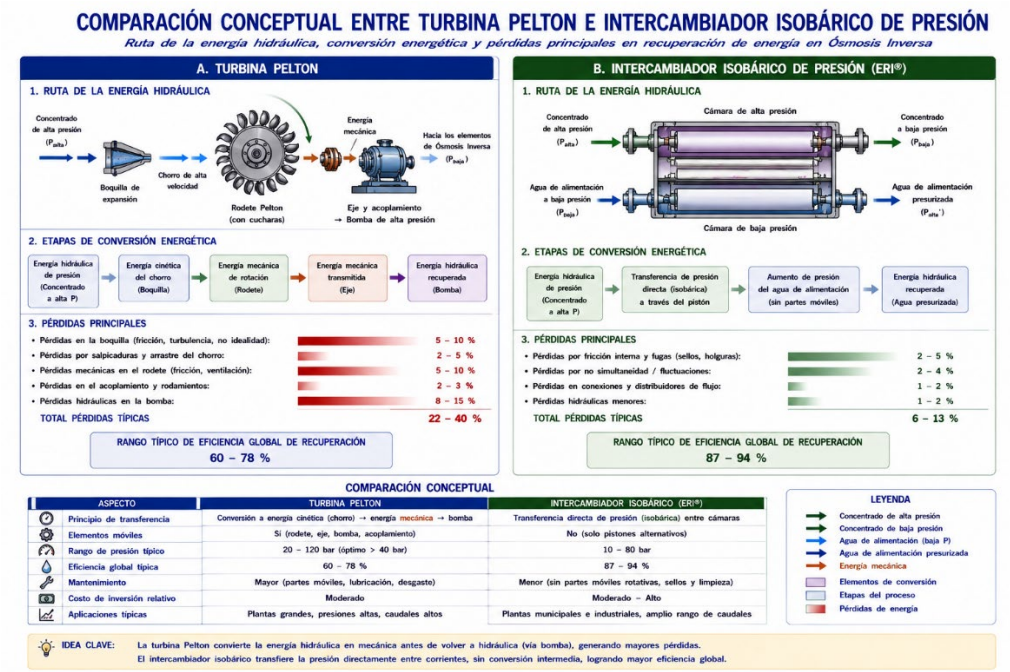
- recuperan energía mediante conversión mecánica;
- presentan mayores pérdidas internas;
- requieren elementos rotativos adicionales;
- alcanzan eficiencias inferiores;

- demandan mayor mantenimiento.

Su robustez y su confiabilidad hacen que muchas sigan operando bien después de décadas, aunque ya no sean lo último.

Figura 7.17

Comparación conceptual entre una turbina Pelton y un intercambiador isobárico de P.



Nota. Elaboración propia con base en Fritzmann et al. (2007), Crittenden et al. (2012), Baker (2012) y Strathmann (2011).

Reflexión ingenieril

Con las turbinas hidráulicas se inició la recuperación de energía en la desalación mediante ósmosis inversa, y quedó demostrado que el concentrado podía reaprovecharse para disminuir lo que la planta consume en electricidad. Su eficiencia es menor que la de los sistemas de hoy; sin embargo, estudiarlas es esencial para comprender cómo evolucionaron los equipos de recuperación y qué fundamentos hidráulicos dieron origen a los modernos.

7.5.9 TURBOCHARGERS O AMPLIFICADORES HIDRÁULICOS

Los **turbochargers** o amplificadores hidráulicos representan la segunda generación de dispositivos de recuperación de energía desarrollados para plantas de ósmosis inversa.

A diferencia de lo que ocurre con las turbinas hidráulicas convencionales, que buscan convertir en mecánica la energía hidráulica del concentrado, los turbochargers la pasan directamente a otra corriente de agua de alimentación gracias a un acoplamiento hidráulico interno.

Esta característica permite reducir las pérdidas mecánicas y mejorar la eficiencia global del sistema.

Durante las décadas de 1980 y 1990 los turbochargers constituyeron una de las tecnologías más difundidas en plantas desalinizadoras de agua de mar.

Hoy los intercambiadores isobáricos los han reemplazado en gran parte, aunque numerosas instalaciones industriales los mantienen por su robustez y su operación sencilla.

7.5.9.1 Principio de funcionamiento

El turbocharger se compone de una bomba centrífuga y una turbina hidráulica que giran sobre el mismo eje.

El concentrado procedente del sistema de membranas ingresa a la turbina.

Durante su expansión:

- disminuye su presión;
- hace girar el eje;
- transmite energía mecánica a la bomba acoplada.

Al mismo tiempo, la bomba eleva en parte la presión de una porción del agua alimentada, antes de que esta pase a la bomba principal.

Como resultado:

- disminuye la potencia requerida por la bomba de alta presión;
- aumenta la eficiencia energética del sistema.

Interpretación ingenieril

No hay traspaso directo de presión entre las dos corrientes en el turbocharger, y en eso difiere de los sistemas isobáricos. La energía pasa por dos conversiones sucesivas:

- energía hidráulica → energía mecánica;
- energía mecánica → energía hidráulica.

Cada conversión introduce pérdidas adicionales que limitan la eficiencia global del equipo.

7.5.9.2 Componentes principales

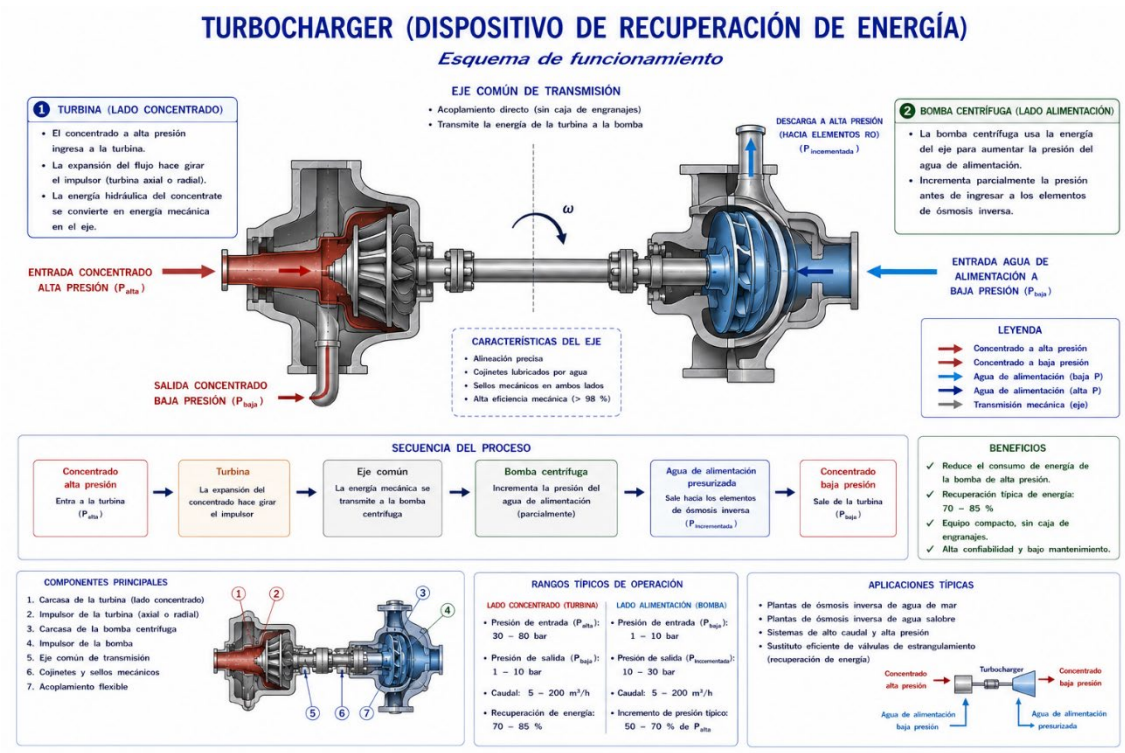
Un turbocharger está integrado por los siguientes elementos:

- turbina hidráulica;
- impulsor centrífugo;
- eje de transmisión;
- cojinetes;
- sellos mecánicos;
- carcasa hidráulica.

Que la turbina y la bomba estén bien alineadas es indispensable para lograr un funcionamiento eficiente y reducir las vibraciones.

Figura 7.18

Esquema de un turbocharger.



Nota. Elaboración propia con base en Fritzmann et al. (2007), Baker (2012) y Crittenden et al. (2012).

7.5.9.3 Balance de potencia

La potencia recuperada puede expresarse mediante:

$$Prec = \eta tc \cdot Qc \cdot \Delta Pc$$

donde:

Prec = potencia recuperada

ηtc = eficiencia del turbocharger

Qc = caudal del concentrado

ΔPc = caída de presión del concentrado

Además, la potencia que recibe la corriente de alimentación quedará condicionada por las pérdidas mecánicas del conjunto rotativo.

En consecuencia:

Pútil < Prec

Esta diferencia representa las pérdidas por:

- fricción;
- turbulencia;
- rodamientos;
- sellos mecánicos.

7.5.9.4 Eficiencia del sistema

Los turbochargers modernos alcanzan eficiencias globales comprendidas aproximadamente entre:

80 % y 90 %

Estos valores representan una mejora importante respecto a muchas turbinas tradicionales.

No obstante, permanecen por debajo de la eficiencia alcanzada por los intercambiadores isobáricos modernos.

Factores que afectan la eficiencia

Entre los principales factores destacan:

- velocidad de rotación;
- desgaste de cojinetes;
- alineamiento del eje;
- pérdidas hidráulicas;

- variación del caudal;
- estado de mantenimiento.

7.5.9.5 Integración con la bomba principal

Generalmente el turbocharger no reemplaza completamente a la bomba de alta presión.

Su función consiste en suministrar una parte de la energía requerida.

La bomba principal proporciona la presión restante.

La potencia suministrada por la bomba puede expresarse como:

```
Pbomba = Ptotal – Prec
```

donde:

```
Ptotal = potencia total requerida
```

Prec = potencia recuperada

Ejemplo 7.10

Supóngase una planta con los siguientes datos:

```
Potencia requerida = 1500 kW
Potencia recuperada = 420 kW
```

La potencia que deberá suministrar el motor principal será:

```
Pbomba =1500-420
=1080 kW
```

Por tanto, el sistema reduce el consumo eléctrico en aproximadamente:

```
28 %
```

Interpretación ingenieril

El ahorro depende de la eficiencia del turbocharger y del caudal de concentrado. Si la planta es de gran capacidad, supone una baja importante en los costos de operación.

7.5.9.6 Ventajas

Entre las principales ventajas pueden mencionarse:

- diseño relativamente sencillo;
- elevada confiabilidad;
- menor complejidad que algunos sistemas híbridos;
- buena adaptación a plantas existentes;

- mantenimiento relativamente simple.

Estas características favorecieron su amplia utilización durante varias décadas.

7.5.9.7 Limitaciones

Las principales limitaciones corresponden a:

- pérdidas mecánicas inevitables;
- presencia de componentes rotativos;
- menor eficiencia respecto a los sistemas isobáricos;
- sensibilidad al desgaste de cojinetes;
- necesidad de alineamiento periódico.

En consecuencia, su competitividad disminuye conforme aumenta la capacidad de la planta.

Tabla 7.29

Ventajas y limitaciones de los turbochargers

Ventajas	Limitaciones
Buena eficiencia energética	Inferior a los sistemas isobáricos
Diseño robusto	Pérdidas mecánicas
Fácil mantenimiento	Componentes rotativos sometidos a desgaste
Buena confiabilidad	Mayor consumo energético que un Pressure Exchanger
Amplia experiencia operacional	Menor eficiencia en grandes plantas

Nota. Elaboración propia.

7.5.9.8 Comparación con turbinas hidráulicas

En términos de energía, el turbocharger supone un paso adelante frente a las turbinas convencionales.

Las principales diferencias son:

- mejor aprovechamiento de la energía recuperada;
- menor número de equipos auxiliares;
- mayor integración hidráulica;
- reducción parcial de pérdidas mecánicas.

Sin embargo, ambos sistemas presentan un principio común:

primero hay que convertir la energía en mecánica y luego regresarla a hidráulica.

Esta doble conversión limita la eficiencia máxima alcanzable.

7.5.9.9 Aplicaciones industriales

Actualmente los turbochargers continúan utilizándose en:

- plantas de mediana capacidad;
- modernización de instalaciones existentes;
- proyectos donde se prioriza la simplicidad mecánica;
- sistemas con restricciones de inversión inicial.

En plantas nuevas de gran capacidad se prefieren por lo general los intercambiadores isobáricos, por su mejor eficiencia energética.

Tabla 7.30

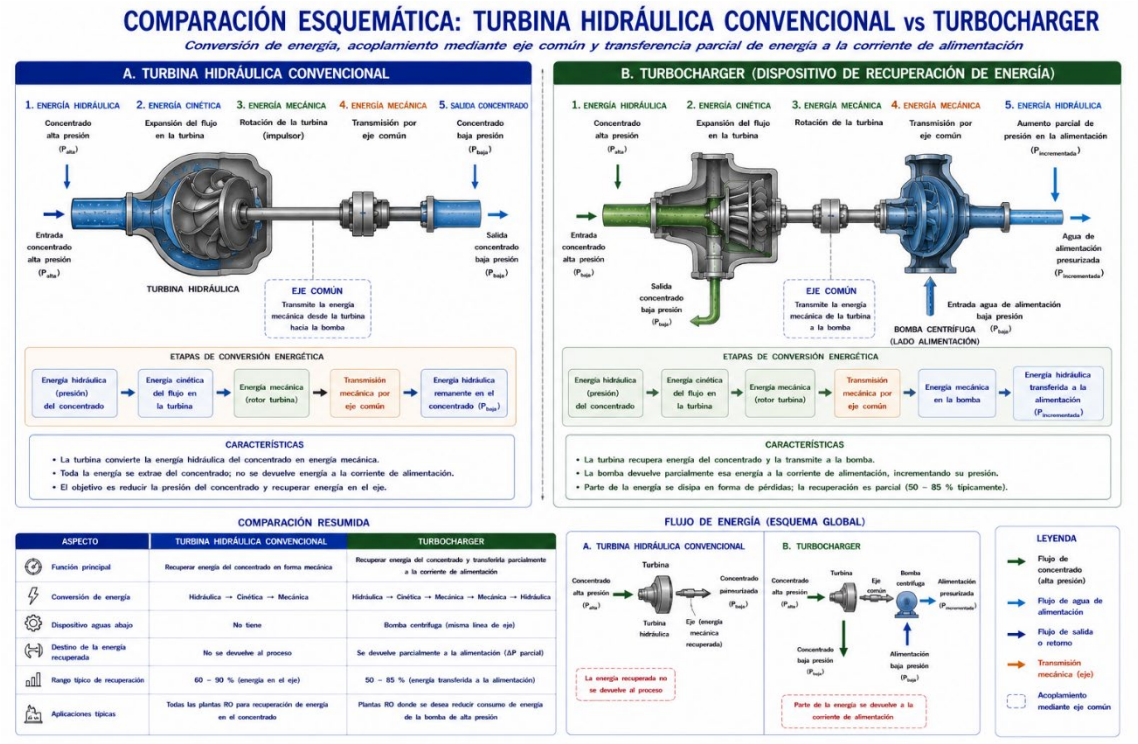
Comparación entre turbinas hidráulicas y turbochargers

Característica	**Turbina hidráulica**	**Turbocharger**
Conversión de energía	Hidráulica → Mecánica	Hidráulica → Mecánica → Hidráulica
Eficiencia típica	75–85 %	80–90 %
Complejidad	Baja	Media
Mantenimiento	Bajo	Moderado
Aplicación actual	Limitada	Moderada

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.19

Comparación esquemática entre una turbina hidráulica convencional y un turbocharger.



Nota. Elaboración propia con base en Fritzmann et al. (2007), Baker (2012), Strathmann (2011) y Crittenden et al. (2012).

Reflexión ingenieril

Los turbochargers constituyen una solución técnicamente sólida para mejorar la eficiencia energética de plantas de ósmosis inversa sin incrementar significativamente la complejidad del sistema. No obstante, la necesidad de transformar la energía hidráulica en energía mecánica y posteriormente nuevamente en energía hidráulica impone un límite físico a su eficiencia. Esta limitación impulsó el desarrollo de los **intercambiadores isobáricos de presión (Pressure Exchangers)**, capaces de transferir directamente la presión entre dos corrientes de agua con pérdidas mínimas y eficiencias superiores al 95 %.

7.5.10 INTERCAMBIADORES ISOBÁRICOS DE PRESIÓN (PRESSURE EXCHANGERS)

Los **intercambiadores isobáricos de presión** representan la tecnología más eficiente desarrollada hasta la fecha para recuperar la energía hidráulica contenida en el concentrado de una planta de ósmosis inversa.

Estos dispositivos se distinguen de las turbinas y los turbochargers en que no transforman la energía hidráulica en mecánica para luego volver a hidráulica.

Su funcionamiento se basa en trasladar la presión del concentrado, de manera directa, a una parte del agua que se alimenta.

Esta transferencia ocurre prácticamente sin cambios significativos de presión, motivo por el cual reciben el nombre de **intercambiadores isobáricos**.

Al quitar las conversiones intermedias, se llega a eficiencias energéticas de más de 95 %, y por ello se han vuelto el estándar de la desalación contemporánea.

7.5.10.1 Principio de funcionamiento

El funcionamiento puede resumirse en cuatro etapas sucesivas.

Primera etapa

El concentrado procedente de los módulos de membrana ingresa al intercambiador a alta presión.

Segunda etapa

En su interior, el concentrado cede casi toda su presión, de forma directa, a un volumen igual de agua por alimentar.

Entre ambas corrientes no hay contacto químico: lo único que se transmite es energía hidráulica, por un sistema de cámaras internas.

Tercera etapa

El agua de alimentación sale del dispositivo con una presión casi idéntica a la que traía el concentrado.

Por lo común solo hace falta darle un pequeño empuje extra con una bomba auxiliar, para cubrir pérdidas menores.

Cuarta etapa

El concentrado, ya prácticamente despresurizado, se descarga al sistema de rechazo.

Interpretación ingenieril

Para la termodinámica, el intercambiador isobárico transfiere la energía directamente. No hay un paso intermedio que la convierta de hidráulica a mecánica y otra vez a hidráulica, de modo que se pierde bastante menos que con los sistemas previos.

7.5.10.2 Estructura interna

Aunque existen diferentes diseños comerciales, la mayoría de los intercambiadores modernos están constituidos por:

- carcasa de alta resistencia;
- rotor cerámico;
- cámaras de transferencia;
- puertos de alimentación;
- puertos de concentrado;
- puertos de descarga;
- sellos hidráulicos.

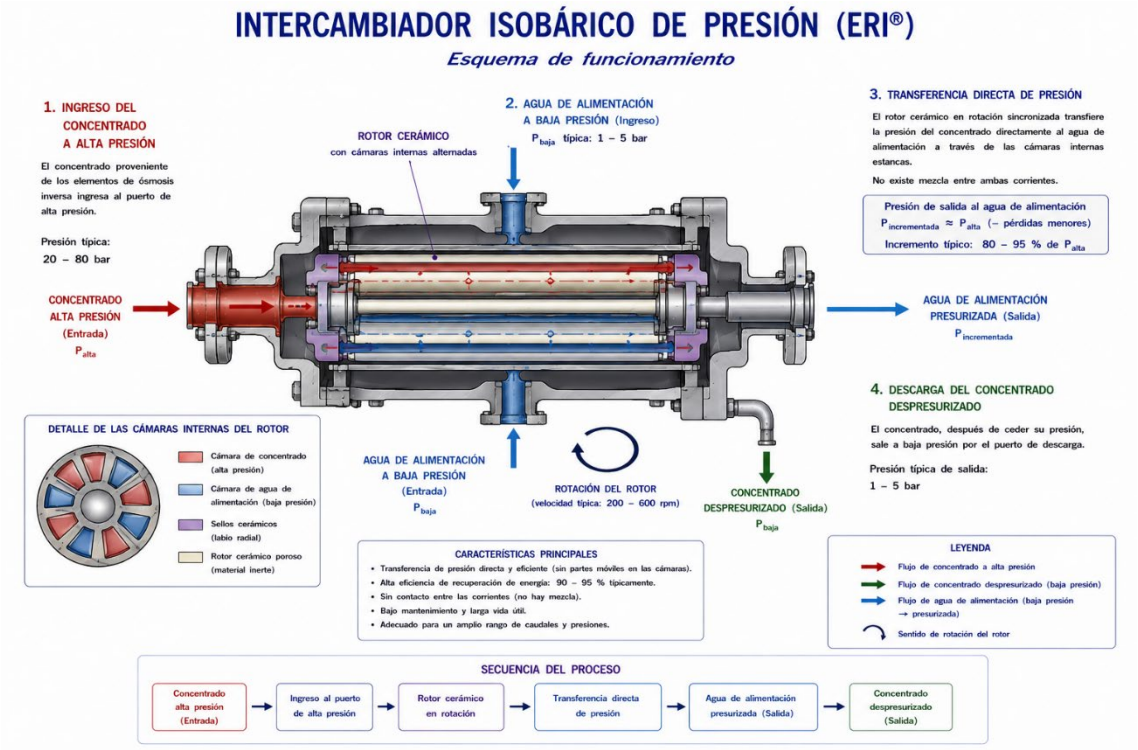
El propio flujo de agua impulsa el rotor, que gira despacio y permite pasar la presión de una corriente a otra sin interrupción.

Actualmente predominan materiales cerámicos debido a:

- elevada dureza;
- resistencia al desgaste;
- estabilidad química;
- excelente comportamiento frente al agua de mar.

Figura 7.20

Esquema de un intercambiador isobárico de presión



Nota. Elaboración propia con base en Fritzmann et al. (2007), Baker (2012), Strathmann (2011) y Crittenden et al. (2012).

7.5.10.3 Balance energético

Sea:

$$Qc = \text{caudal del concentrado}$$

$$Qa = \text{caudal de alimentación}$$

$$Pc = \text{presión del concentrado}$$

$$Pa = \text{presión de alimentación}$$

La energía hidráulica disponible puede estimarse mediante:

$$Eh = Qc \cdot Pc$$

La energía transferida será:

$$Et = \eta PX \cdot Qc \cdot Pc$$

donde:

ηPX = eficiencia del intercambiador

En dispositivos modernos:

$\eta PX \approx 95\text{–}98\ \%$

Esto significa que únicamente entre un **2 % y un 5 %** de la energía disponible se pierde durante el proceso de transferencia.

Interpretación ingenieril

Hasta hoy, ningún otro sistema aplicado en desalación para recuperar energía alcanza tales niveles de eficiencia.

7.5.10.4 Bomba de refuerzo (Booster Pump)

El agua sale del intercambiador casi a la presión que la planta necesita, pero aún quedan pequeñas pérdidas debidas a:

- fricción interna;
- conexiones hidráulicas;
- tuberías;
- válvulas.

Por ello normalmente se instala una **bomba de refuerzo**.

Su función consiste únicamente en compensar dichas pérdidas.

En consecuencia:

- posee menor potencia;
- consume poca energía;
- presenta menores costos operacionales.

La potencia requerida resulta considerablemente inferior a la necesaria cuando no existe recuperación energética.

7.5.10.5 Ejemplo de balance energético

Supóngase una planta con:

```
Caudal de alimentación = 2 000 m³/h
Recuperación = 45 %
Presión de operación = 65 bar
Eficiencia del PX = 97 %
```

El caudal de concentrado será:

$$Qc = 2\,000 \times (1 - 0{,}45)$$

$$Qc = 1\,100\ m^3/h$$

La energía recuperada equivale aproximadamente al:

```
97 %
```

de la energía hidráulica contenida en dicho concentrado.

Como consecuencia, la bomba principal únicamente deberá suministrar la energía correspondiente a:

- producción de permeado;
- pérdidas hidráulicas;
- pérdidas mecánicas.

Este principio explica la extraordinaria reducción del consumo eléctrico alcanzada por las plantas modernas.

7.5.10.6 Ventajas

Las principales ventajas son:

- eficiencia superior al 95 %;
- ausencia de conversiones energéticas intermedias;
- reducido consumo específico;
- bajo mantenimiento;
- elevada confiabilidad;
- larga vida útil;
- reducido desgaste;
- funcionamiento silencioso;
- tamaño compacto.

Por estas características, los intercambiadores isobáricos son hoy la tecnología dominante en recuperación de energía.

7.5.10.7 Limitaciones

Aunque presentan numerosas ventajas, también existen ciertas limitaciones.

Entre ellas:

- mayor costo inicial;
- necesidad de agua adecuadamente pretratada;
- sensibilidad al ingreso de partículas abrasivas;
- fabricación altamente especializada.

Con todo, el ahorro de energía durante la operación suele compensar de sobra estas limitaciones.

Tabla 7.31

Ventajas y limitaciones de los intercambiadores isobáricos

Ventajas	Limitaciones
Eficiencia 95–98 %	Mayor inversión inicial
Bajo mantenimiento	Requiere excelente pretratamiento
Menor consumo eléctrico	Componentes de alta precisión
Alta confiabilidad	Fabricación especializada
Vida útil prolongada	Mayor costo de reposición

Nota. Elaboración propia.

7.5.10.8 Comparación energética

La evolución de la recuperación de energía puede resumirse de la siguiente manera:

Tabla 7.32

Comparación de la eficiencia de los principales sistemas de recuperación de energía.

Tecnología	Eficiencia típica
Sin recuperación	0 %
Turbinas hidráulicas	75–85 %
Turbochargers	80–90 %
Intercambiadores isobáricos	95–98 %

Nota. Elaboración propia.

Puede observarse que el salto tecnológico introducido por los intercambiadores isobáricos resulta considerable.

7.5.10.9 Influencia sobre el consumo específico de energía

Con un intercambiador isobárico, el consumo específico de energía en una desaladora de agua marina baja, aproximadamente, desde:

$$6–8\ kWh/m^3$$

hasta valores comprendidos entre:

$$2,5–3,5\ kWh/m^3$$

dependiendo de:

- recuperación;
- eficiencia de bombas;

- temperatura;
- salinidad;
- configuración hidráulica.

Esta reducción cuenta entre los mayores logros tecnológicos de toda la historia de la desalación.

7.5.10.10 Criterios para la selección

Durante la ingeniería conceptual deben evaluarse los siguientes aspectos:

- capacidad de producción;
- presión de operación;
- recuperación prevista;
- consumo específico objetivo;
- disponibilidad de mantenimiento especializado;
- calidad del agua de alimentación;
- análisis del costo del ciclo de vida.

Los intercambiadores isobáricos son hoy la opción técnica más recomendable cuando la planta es de gran capacidad.

Tabla 7.33

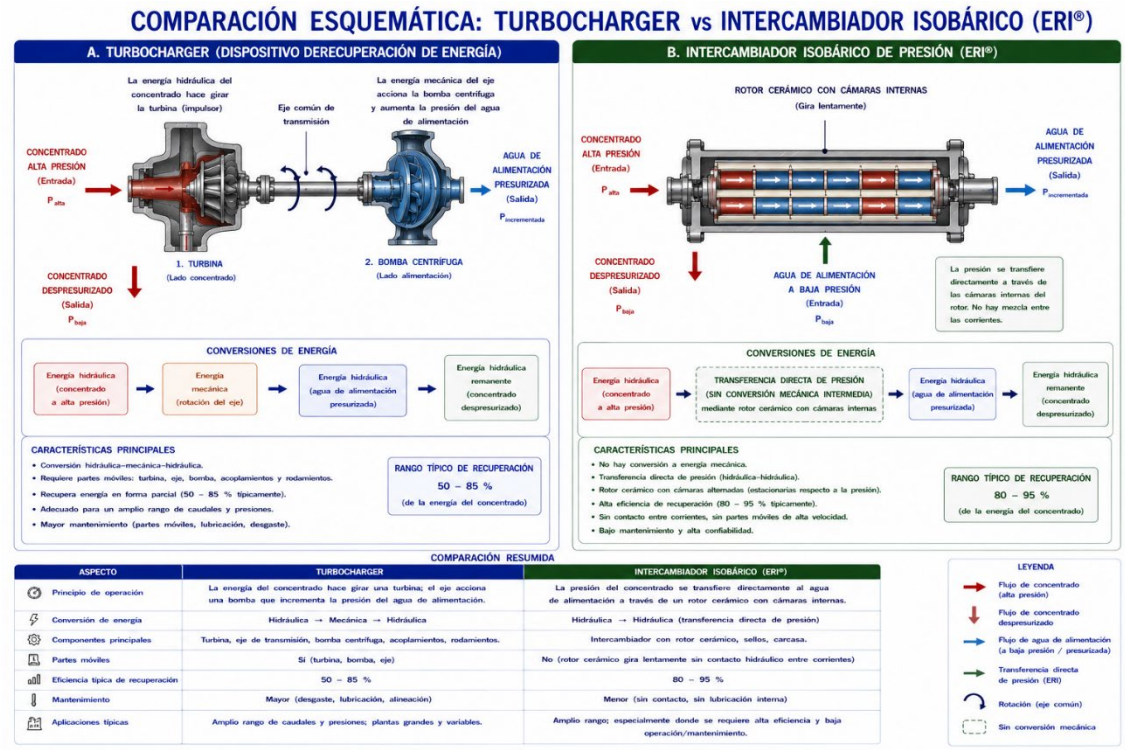
Criterios para seleccionar un intercambiador isobárico

Criterio	Recomendación
Capacidad de planta	Especialmente recomendable en plantas medianas y grandes
Presión de operación	Alta presión (agua de mar)
Recuperación	Compatible con recuperaciones típicas de SWRO
Mantenimiento	Programa preventivo periódico
Calidad del agua	Excelente pretratamiento para evitar abrasión
Evaluación económica	Analizar CAPEX y OPEX durante toda la vida útil

Nota. Elaboración propia.

Figura 7.21

Comparación esquemática entre un turbocharger y un intercambiador isobárico.



Nota. Elaboración propia con base en Fritzmann et al. (2007), Baker (2012), Strathmann (2011), Crittenden et al. (2012) y Elimelech y Phillip (2011).

Reflexión ingenieril

Entre los avances más importantes de las últimas décadas en este campo están los intercambiadores isobáricos de presión. Al recuperar casi toda la energía hidráulica contenida en el concentrado, permitieron que lo que consume la desalación en energía se acerque a lo que marca el límite termodinámico. Hoy resultaría difícil justificar una planta moderna de agua de mar con ósmosis inversa que no los incluya, pues su efecto en el costo del agua y en la sostenibilidad supera de largo la inversión inicial que demandan.

7.5.11 SELECCIÓN, INTEGRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Elegir cómo se va a recuperar la energía es una decisión de gran peso al plantear la ingeniería conceptual de la planta de ósmosis inversa. Los equipos actuales son muy eficientes, aunque la mejor alternativa varía según factores técnicos, económicos y operacionales.

Al diseñar, no existe un sistema válido para todo tipo de aplicación. La elección se basa en cuánto se produce, a qué presión se opera, qué recuperación se espera, si se dispone de mantenimiento especializado y cuánto cuesta el sistema durante su vida útil.

El consumo eléctrico es el rubro más pesado del costo operacional de una planta; por eso optimizar la energía es hoy uno de los objetivos centrales de la ingeniería de desalación.

7.5.11.1 Metodología para la selección del sistema de recuperación

La metodología recomendada comprende las siguientes etapas.

Paso 1. Caracterización del proyecto

Determinar:

- caudal de alimentación;
- producción requerida;
- recuperación objetivo;
- presión de operación;
- calidad del agua de alimentación.

Estos parámetros constituyen la base del diseño energético.

Paso 2. Estimación del consumo energético

Calcular:

- potencia hidráulica requerida;
- potencia de bombeo;
- consumo específico de energía (SEC).

Estos valores permitirán cuantificar el potencial de ahorro.

Paso 3. Selección preliminar de alternativas

Comparar diferentes tecnologías:

- turbinas hidráulicas;
- turbochargers;
- intercambiadores isobáricos.

La preselección debe considerar tanto criterios técnicos como económicos.

Paso 4. Simulación energética

Modelar cada alternativa mediante herramientas de simulación para estimar:

- consumo específico;

- eficiencia global;
- potencia instalada;
- comportamiento bajo diferentes condiciones de operación.

Paso 5. Evaluación económica

Analizar:

- inversión inicial (CAPEX);
- costos de operación (OPEX);
- costos de mantenimiento;
- vida útil esperada;
- período simple de recuperación;
- valor presente neto (VPN);
- costo del ciclo de vida (LCC).

Paso 6. Selección final

Elegir la alternativa que ofrezca el mejor equilibrio entre:

- eficiencia energética;
- confiabilidad;
- facilidad de mantenimiento;
- rentabilidad económica.

Interpretación ingenieril

En proyectos industriales, la eficiencia del equipo rara vez decide por sí sola. Uno con eficiencia algo menor puede salir más conveniente en lo económico una vez que se cuentan los costos de mantenimiento, la disponibilidad de repuestos y lo sencillo que sea de operar.

7.5.11.2 Criterios técnicos de selección

Los principales criterios técnicos se resumen a continuación.

Capacidad de producción

Las plantas de gran capacidad sacan especial provecho de dispositivos con eficiencia energética muy alta.

En instalaciones pequeñas, el ahorro energético puede no justificar inversiones elevadas.

Presión de operación

A mayor presión de operación:

- mayor energía disponible en el concentrado;
- mayor potencial de recuperación;
- mayor beneficio económico.

Por esa razón, recuperar energía resulta muy atractivo cuando la planta trata agua marina.

Recuperación del sistema

La recuperación influye directamente sobre el caudal del concentrado.

Si la recuperación es baja, el caudal de rechazo es mayor y, con él, la energía que se puede recuperar.

Flexibilidad operacional

En algunas plantas se requiere trabajar bajo diferentes condiciones de producción.

En esos casos conviene elegir dispositivos que operen con eficiencia dentro de un rango amplio de caudales.

Tabla 7.34

Criterios técnicos para la selección de dispositivos de recuperación de energía

Criterio	Influencia sobre la selección
Capacidad de planta	Define la escala económica del proyecto
Presión de operación	Determina la energía recuperable
Recuperación	Influye sobre el caudal del concentrado
Flexibilidad	Permite adaptarse a variaciones de operación
Calidad del agua	Condiciona el tipo de dispositivo
Mantenimiento	Afecta la disponibilidad de la planta

Nota. Elaboración propia.

7.5.11.3 Evaluación económica

Desde el punto de vista económico deben analizarse simultáneamente:

Inversión inicial (CAPEX)

Incluye:

- adquisición del dispositivo;
- instalación;
- instrumentación;
- integración hidráulica;
- puesta en marcha.

Costos operacionales (OPEX)

Comprenden:

- consumo eléctrico;
- mantenimiento;
- repuestos;
- lubricantes;
- inspecciones periódicas.

Costo del ciclo de vida (LCC)

Lo más recomendable es evaluar el costo total a lo largo de la vida útil del sistema.

Es frecuente que el equipo de mayor inversión inicial tenga menores costos de operación y termine siendo la mejor opción económica a largo plazo.

7.5.11.4 Cálculo del ahorro energético

El ahorro anual de energía puede estimarse mediante:

$$\text{Ahorro anual} = (SEC_1 - SEC_2) \times \text{Producción anual}$$

donde:

SEC_1 = consumo específico sin recuperación

SEC_2 = consumo específico con recuperación

Ejemplo 7.11

Una planta produce:

$$\text{Producción} = 36\,500\,000\ m^3/\text{año}$$

Consumo sin recuperación:

$$6{,}5\ kWh/m^3$$

Consumo con intercambiador isobárico:

$3,0\ kWh/m^3$

Entonces:

Ahorro específico

$= 6,5 - 3,0$

$=3,5\ kWh/m^3$

Energía ahorrada:

$36\ 500\ 000 \times 3,5$

$=127\ 750\ 000\ kWh/año$

Es decir,

aproximadamente

$127,8\ GWh/año$

Interpretación ingenieril

Esa reducción tan grande del consumo eléctrico explica, sobre todo, por qué los sistemas modernos llevan dispositivos de recuperación de energía.

7.5.11.5 Período simple de recuperación

El período simple de recuperación puede estimarse mediante:

$$PRS = \text{Inversión} / \text{Ahorro anual}$$

Ejemplo 7.12

Supóngase:

$Inversión = US\$\ 4\ 000\ 000$

$Ahorro\ anual = US\$\ 2\ 100\ 000$

Entonces:

PRS

$=4\ 000\ 000 / 2\ 100\ 000$

$\approx 1,9\ años$

Este resultado muestra que la inversión se recupera en menos de dos años.

7.5.11.6 Análisis del costo del ciclo de vida (LCC)

Se incluyen en el costo total del ciclo de vida todos los gastos que genera el sistema mientras dura.

Comprende:

- inversión inicial;
- energía;
- mantenimiento;
- reposición de componentes;
- costos de operación;
- valor residual.

En proyectos de desalación, el costo energético suele representar la mayor fracción del LCC.

Por ello, pequeñas mejoras en la eficiencia pueden generar importantes beneficios económicos.

7.5.11.7 Tendencias futuras

Las principales líneas de investigación incluyen:

- intercambiadores de menor pérdida hidráulica;
- materiales cerámicos avanzados;
- monitoreo inteligente;
- mantenimiento predictivo mediante inteligencia artificial;
- integración con energías renovables;
- optimización mediante gemelos digitales (*Digital Twins*).

Estas tecnologías permitirán incrementar aún más la eficiencia energética de las futuras plantas desalinizadoras.

Tabla 7.35

Comparación global de tecnologías de recuperación de energía en RO

Tecnología	Eficiencia	Complejidad	Aplicación recomendada
Turbinas hidráulicas	75–85 %	Baja	Modernización de plantas pequeñas
Turbochargers	80–90 %	Media	Plantas medianas
Intercambiadores isobáricos	95–98 %	Media	Plantas medianas y grandes
Sistemas híbridos	>95 %	Alta	Proyectos especiales

Nota. Elaboración propia.

7.5.11.8 Caso de estudio integrado

Hay que diseñar el sistema que recuperará energía en una desalinizadora de agua marina que presenta estas características:

- Producción de permeado: **100 000 m³/día**
- Recuperación: **45 %**
- Presión de operación: **65 bar**
- Consumo específico objetivo: **≤ 3,0 kWh/m³**

Análisis técnico

- La elevada presión de operación genera un importante potencial de recuperación energética.
- Dada su capacidad, la planta admite una inversión inicial superior si eso reduce el consumo eléctrico.
- El objetivo de consumo específico es difícilmente alcanzable con turbinas o turbochargers.

Selección recomendada

Se recomienda instalar **intercambiadores isobáricos de presión**, complementados con una bomba de refuerzo de alta eficiencia y un sistema de control automático de presión.

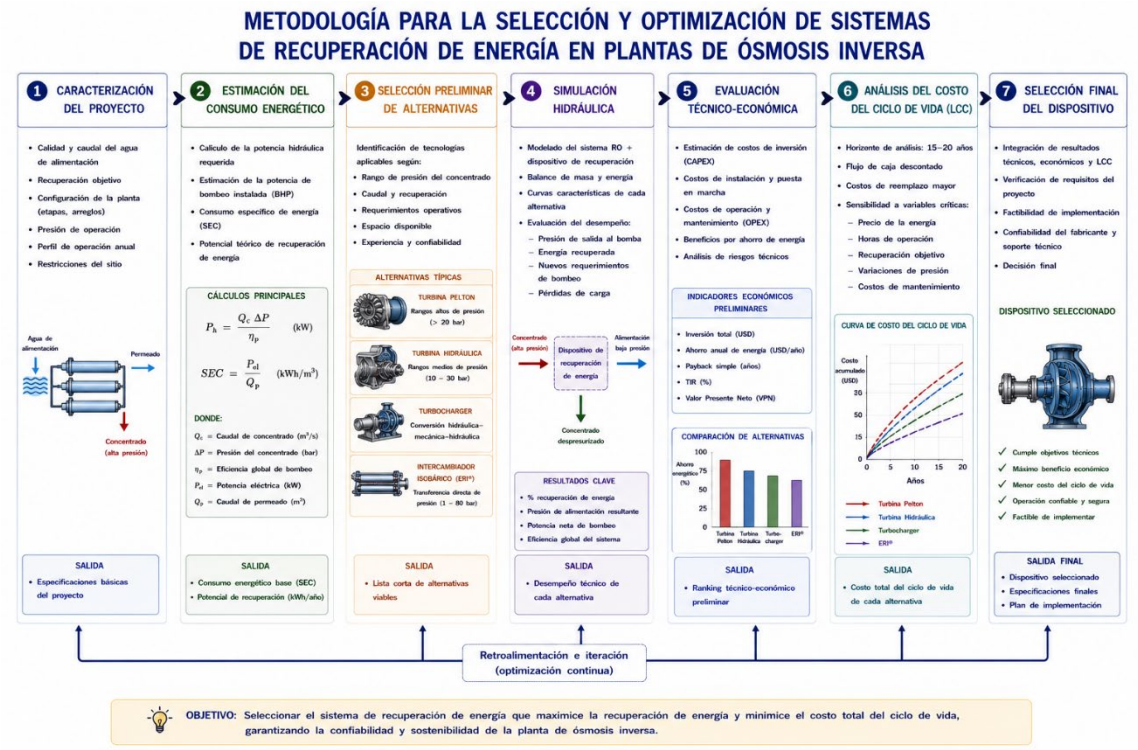
Resultados esperados

- Consumo específico cercano a **2,8–3,0 kWh/m³**.
- Reducción significativa del costo operativo.
- La inversión se recupera en un plazo relativamente corto, según el precio local de la energía.
- Menor huella de carbono del proceso.

Con este ejemplo se aprecia que elegir el sistema de recuperación repercute a la vez en el diseño hidráulico, en la evaluación económica y en la sostenibilidad del proyecto.

Figura 7.22

Procedimiento a seguir para seleccionar y optimizar los sistemas de recuperación de energía de plantas de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia con base en Fritzmann et al. (2007), Elimelech y Phillip (2011), Baker (2012), Strathmann (2011) y Crittenden et al. (2012).

Reflexión ingenieril

No hay que ver el sistema de recuperación de energía como un equipo que simplemente se agrega; es una decisión estratégica que marca el rendimiento técnico y económico de la planta completa. Para tener proyectos competitivos y a la altura de la ingeniería moderna, hoy resulta indispensable analizar de manera integrada la hidráulica, la energía consumida, los costos y la sostenibilidad.

7.6 FOULING Y SCALING EN SISTEMAS DE ÓSMOSIS INVERSA

Que una planta de ósmosis inversa sea eficiente no depende solo de membranas de buena calidad ni del diseño hidráulico; también influye cuán capaz sea de evitar que se acumulen depósitos que le resten productividad a las membranas.

Durante la operación continua, diferentes sustancias presentes en el agua de alimentación pueden acumularse progresivamente sobre la superficie de la membrana, originando un fenómeno conocido como **ensuciamiento (fouling)**.

Paralelamente, determinadas sales poco solubles pueden precipitar cuando su concentración supera el límite de solubilidad, formando depósitos cristalinos denominados **incrustaciones (scaling)**.

El rendimiento hidráulico cae gradualmente por ambos fenómenos, que son la causa principal del mayor consumo de energía y de una vida útil más corta de las membranas.

El fouling y el scaling son, según la ingeniería, los factores que más restringen cuánto puede producir la planta de ósmosis inversa.

Por esto, el diseño actual incluye estrategias preventivas que buscan reducir su formación desde la ingeniería conceptual.

7.6.1 CONCEPTO DE FOULING

El término **fouling** hace referencia a la acumulación de materiales no deseados sobre la superficie de la membrana o dentro de los canales de alimentación.

Este fenómeno modifica simultáneamente:

- la permeabilidad hidráulica;
- la transferencia de masa;
- la presión diferencial;
- el rechazo de sales;
- el consumo energético.

Inicialmente el ensuciamiento puede ser reversible.

Pero si el depósito se queda mucho tiempo, puede consolidarse y dañar la membrana de forma permanente.

Interpretación ingenieril

El fouling no es un fenómeno único, sino un grupo de mecanismos de acumulación con orígenes físicos, químicos y biológicos distintos.

Por esta razón, cada tipo de fouling requiere estrategias específicas de prevención y limpieza.

7.6.2 CONSECUENCIAS DEL FOULING

La presencia de depósitos sobre las membranas produce una serie de efectos negativos.

Entre los principales destacan:

- disminución del flujo de permeado;

- incremento de la presión diferencial;
- aumento del consumo eléctrico;
- reducción de la recuperación efectiva;
- disminución del rechazo de sales;
- incremento de la frecuencia de limpieza;
- reducción de la vida útil de las membranas.

En lo económico, estos efectos encarecen de manera notable la producción de agua.

Tabla 7.36

Consecuencias del fouling en sistemas de ósmosis inversa

Consecuencia	Impacto operacional
Disminución del flujo	Menor producción de agua
Incremento de presión diferencial	Mayor consumo energético
Mayor frecuencia de CIP	Incremento del costo operativo
Reducción del rechazo	Disminución de la calidad del permeado
Compactación acelerada	Menor vida útil de las membranas

Nota. Elaboración propia.

7.6.3 CLASIFICACIÓN DEL FOULING

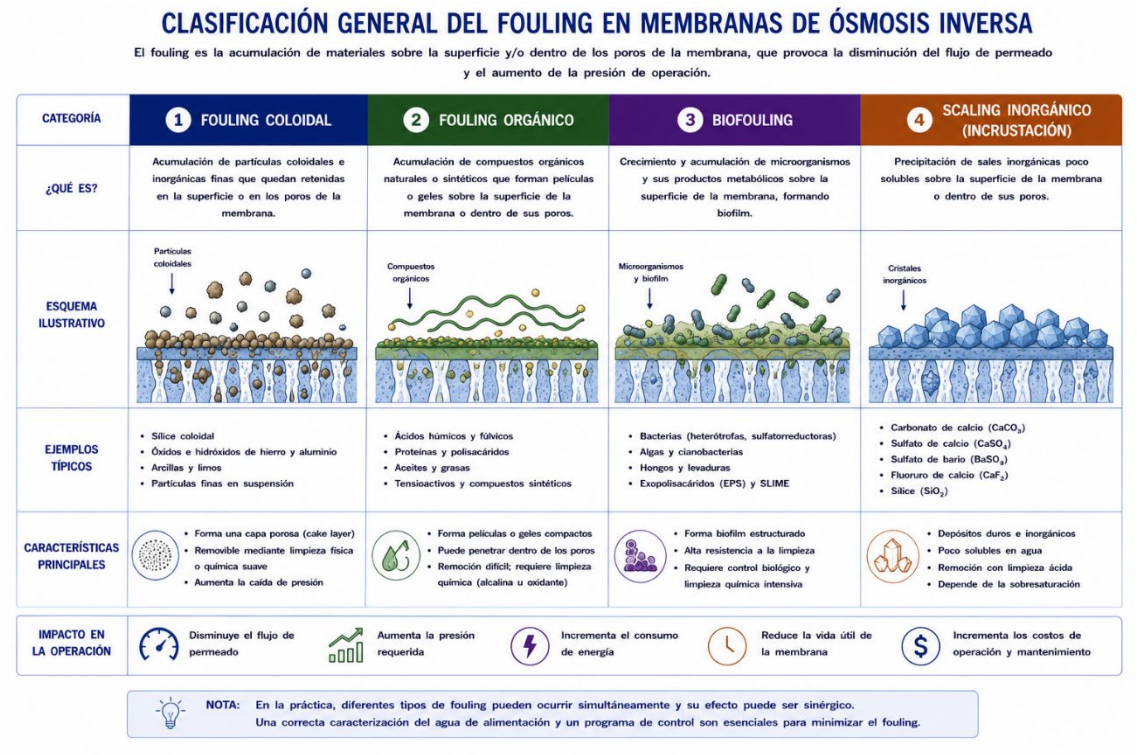
El ensuciamiento puede clasificarse en cuatro grandes categorías:

- fouling coloidal;
- fouling orgánico;
- biofouling;
- fouling inorgánico (scaling).

Cada uno presenta mecanismos de formación diferentes y requiere tratamientos específicos.

Figura 7.23

Clasificación general del fouling en membranas de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Elimelech y Phillip (2011) y Strathmann (2011).

7.6.4 FOULING COLOIDAL

El fouling coloidal surge al acumularse partículas muy pequeñas que flotan en el agua que ingresa.

Generalmente incluye:

- arcillas;
- limos;
- sílice coloidal;
- óxidos metálicos;
- partículas minerales;
- coloides naturales.

Estas partículas poseen tamaños comprendidos aproximadamente entre:

`1 nm y 1 µm`

Como la membrana las retiene, forman sobre la superficie una capa que aumenta la resistencia hidráulica.

Mecanismo de formación

El proceso ocurre en varias etapas:

1. transporte de partículas hacia la membrana;
2. adhesión superficial;
3. crecimiento del depósito;
4. compactación de la capa coloidal.

Con el tiempo la capa se vuelve más densa y difícil de remover.

Factores que favorecen el fouling coloidal

Entre los principales se encuentran:

- elevado SDI;
- alta turbidez;
- baja velocidad tangencial;
- elevada recuperación;
- insuficiente pretratamiento.

Interpretación ingenieril

Que toda planta de ósmosis inversa tenga microfiltración, ultrafiltración o filtración multimedia previa a las membranas se debe, en buena parte, al fouling coloidal.

7.6.5 FOULING ORGÁNICO

El fouling orgánico nace de la acumulación de la materia orgánica que contiene el agua.

Las sustancias más comunes incluyen:

- ácidos húmicos;
- ácidos fúlvicos;
- proteínas;
- polisacáridos;
- aceites;
- grasas;
- compuestos orgánicos naturales (NOM).

Las sustancias de este tipo se adsorben con fuerza en la superficie de la membrana y dejan películas muy difíciles de retirar.

Factores que favorecen el fouling orgánico

- elevado carbono orgánico total;
- aguas superficiales;
- presencia de algas;
- insuficiente coagulación;
- ausencia de carbón activado.

Consecuencias

- reducción del flujo;
- incremento de presión diferencial;
- aumento del biofouling;
- disminución del rechazo.

Tabla 7.37

Principales características del fouling coloidal y orgánico

Tipo	Origen	Consecuencia principal	Prevención
Coloidal	Partículas minerales	Obstrucción física	Filtración y UF
Orgánico	Materia orgánica natural	Adsorción superficial	Coagulación y carbón activado

Nota. Elaboración propia.

7.6.6 DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DEL FOULING

Con la planta en marcha, el tipo de ensuciamiento se puede deducir observando cómo evolucionan distintas variables operacionales.

Por ejemplo:

Disminución del flujo normalizado

Puede indicar:

- fouling coloidal;
- fouling orgánico;
- biofouling;
- scaling.

Incremento de la presión diferencial

Generalmente indica:

- acumulación de depósitos;
- obstrucción hidráulica;
- biofilm.

Incremento de la conductividad del permeado

Puede indicar:

- deterioro de membranas;
- daño químico;
- ruptura de sellos;
- envejecimiento de la capa activa.

Interpretación ingenieril

Diagnosticar con una sola variable nunca es recomendable. Si se interpretan en conjunto la temperatura, el rechazo de sales, la presión diferencial y el flujo normalizado, es más fácil identificar el mecanismo de ensuciamiento que predomina.

Tabla 7.38

Indicadores operacionales para el diagnóstico de fouling

Variable observada	Posible causa
Disminución del flujo	Fouling o scaling
Aumento de presión diferencial	Depósitos superficiales
Disminución del rechazo	Daño de membranas
Incremento del consumo energético	Fouling avanzado
Mayor frecuencia de limpieza	Ensuciamiento persistente

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Intervienen a la vez hidráulica, química del agua, microbiología y ciencia de materiales, por lo que el fouling es un fenómeno multidisciplinario. Controlarlo no se logra solo limpiando: se consigue sobre todo con un buen diseño del pretratamiento, una recuperación bien elegida y una operación que no propicie la acumulación de depósitos.

7.6.7 BIOFOULING: FORMACIÓN DE BIOPELÍCULAS Y CONTROL MICROBIOLÓGICO

El **biofouling** corresponde al ensuciamiento producido por el crecimiento y desarrollo de microorganismos sobre la superficie de las membranas y en los canales hidráulicos del sistema de ósmosis inversa.

A diferencia del fouling coloidal u orgánico, el biofouling constituye un proceso dinámico en el que los microorganismos se multiplican continuamente y producen sustancias poliméricas extracelulares (Extracellular Polymeric Substances, **EPS**) que favorecen la formación de estructuras altamente resistentes denominadas **biopelículas (biofilms)**.

Estas biopelículas hacen caer de manera notable el flujo de permeado, elevan la presión diferencial y entorpecen la transferencia de masa.

El biofouling es, en el campo de la ingeniería del agua, uno de los mayores retos de operación para las desalinizadoras.

7.6.7.1 Microorganismos involucrados

Diversos microorganismos pueden participar en la formación de biopelículas.

Entre los más frecuentes se encuentran:

- bacterias heterotróficas;
- bacterias formadoras de limo;
- bacterias oxidantes de hierro;
- bacterias sulfato reductoras;
- hongos;
- levaduras;
- microalgas.

Aunque todos pueden contribuir al biofouling, las bacterias heterotróficas suelen constituir el grupo predominante.

Interpretación ingenieril

Lo que define el problema no es únicamente el número de microorganismos del agua, sino su habilidad para fijarse sobre la membrana y generar matrices poliméricas que los protegen.

7.6.7.2 Etapas de formación del biofilm

La formación de una biopelícula ocurre mediante un proceso secuencial.

Etapa 1. Acondicionamiento de la superficie

Antes de que lleguen las bacterias, la membrana se cubre con una película delgada de materia orgánica disuelta.

Esta capa modifica las propiedades superficiales y favorece la adhesión de microorganismos.

Etapa 2. Adhesión reversible

Las bacterias llegan hasta la superficie mediante:

- transporte convectivo;
- difusión;
- movimiento browniano.

Inicialmente la adhesión es débil y puede revertirse mediante el flujo hidráulico.

Etapa 3. Adhesión irreversible

Posteriormente los microorganismos comienzan a producir sustancias poliméricas extracelulares (EPS).

Estas sustancias funcionan como un adhesivo biológico que fija las bacterias a la membrana.

A partir de este momento el desprendimiento resulta mucho más difícil.

Etapa 4. Crecimiento del biofilm

Las bacterias continúan multiplicándose.

La matriz de EPS aumenta progresivamente su espesor.

Se desarrollan:

- canales internos;
- zonas con diferente concentración de nutrientes;
- comunidades microbianas complejas.

Etapa 5. Maduración

El biofilm alcanza una estructura tridimensional altamente organizada.

Presenta elevada resistencia frente a:

- desinfectantes;
- variaciones hidráulicas;
- cambios de temperatura;
- agentes químicos.

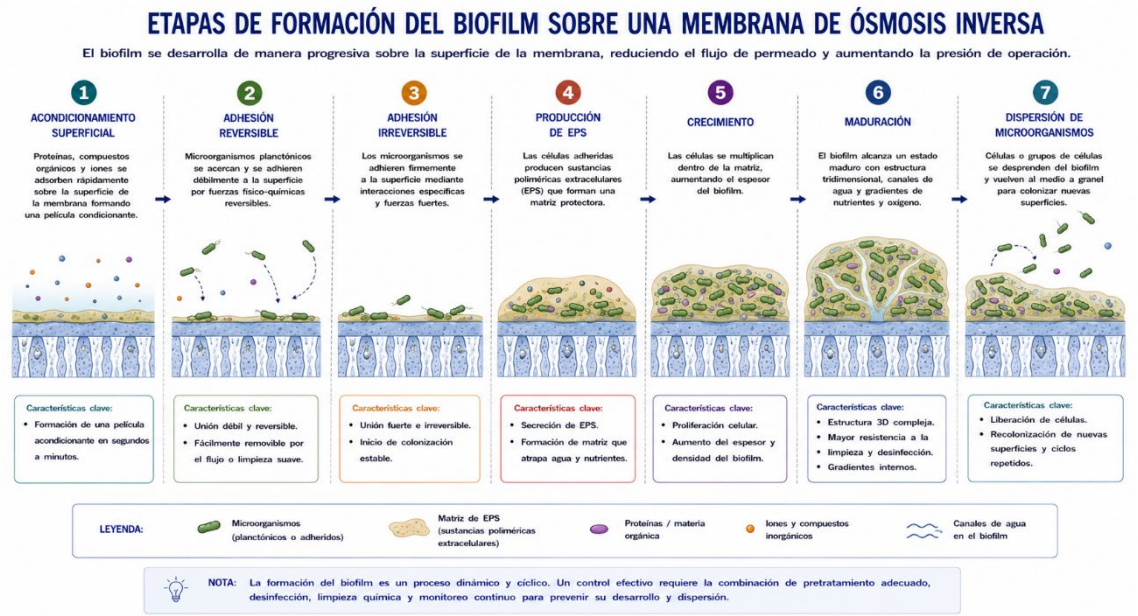
Etapa 6. Dispersión

Fragmentos del biofilm pueden desprenderse y colonizar otras zonas de la planta.

Este mecanismo explica la rápida propagación del biofouling.

Figura 7.24

Etapas del biofilm sobre la membrana de ósmosis inversa, en orden: acondicionamiento de la superficie, adhesión reversible, luego irreversible, formación de EPS, crecimiento, después maduración y, al final, dispersión de microorganismos.



Nota. Elaboración propia con base en Flemming y Wingender (2010), Baker (2012), Elimelech y Phillip (2011) y Crittenden et al. (2012).

7.6.7.3 Sustancias poliméricas extracelulares (EPS)

Las **EPS** constituyen el componente estructural más importante de las biopelículas.

Están formadas principalmente por:

- polisacáridos;
- proteínas;

- lípidos;
- ácidos nucleicos;
- glicoproteínas.

Estas sustancias cumplen diversas funciones:

- fijación de microorganismos;
- retención de nutrientes;
- protección frente a biocidas;
- estabilidad mecánica del biofilm.

En muchas biopelículas, más del 80 % del volumen corresponde a EPS y no a células bacterianas.

Interpretación ingenieril

Eliminar el biofouling pide retirar ante todo la matriz de EPS, ya que destruir las bacterias presentes no es suficiente.

7.6.7.4 Consecuencias del biofouling

El desarrollo de biopelículas produce importantes efectos operacionales.

Entre ellos destacan:

- disminución del flujo de permeado;
- incremento de la presión diferencial;
- aumento del consumo energético;
- reducción del rechazo de sales;
- mayor frecuencia de limpiezas químicas;
- deterioro prematuro de membranas.

En casos severos puede incluso producirse el bloqueo parcial de los canales hidráulicos.

Tabla 7.39

Consecuencias operacionales del biofouling

Consecuencia	Efecto sobre la planta
Disminución del flujo	Reducción de la producción
Incremento de presión diferencial	Mayor consumo eléctrico

Consecuencia	Efecto sobre la planta
Obstrucción de canales	Pérdida de capacidad hidráulica
Incremento de limpiezas CIP	Mayor costo operativo
Deterioro de membranas	Reducción de la vida útil

Nota. Elaboración propia.

7.6.7.5 Factores que favorecen el biofouling

Diversas condiciones favorecen el desarrollo microbiológico.

Las más importantes son:

- elevada materia orgánica biodegradable;
- baja velocidad tangencial;
- temperaturas elevadas;
- largos tiempos de residencia;
- zonas de flujo estancado;
- desinfección insuficiente;
- pretratamiento inadecuado.

El control de estos factores constituye la estrategia preventiva más efectiva.

7.6.7.6 Monitoreo microbiológico

El biofouling debe detectarse antes de que provoque pérdidas importantes de rendimiento.

Las herramientas más utilizadas incluyen:

- recuento de bacterias heterotróficas;
- ATP (adenosín trifosfato);
- carbono orgánico asimilable (AOC);
- carbono orgánico biodegradable (BDOC);
- microscopía;
- análisis molecular mediante PCR.

Hoy el monitoreo de ATP es de las técnicas más usadas, por su rapidez y su sensibilidad.

Interpretación ingenieril

Los métodos microbiológicos tradicionales tardan varios días en dar resultados. Las técnicas con ATP, en cambio, detectan aumentos de actividad biológica casi en tiempo real.

7.6.7.7 Estrategias de prevención

El control del biofouling debe iniciarse antes de que las membranas entren en operación.

Las principales estrategias incluyen:

- excelente pretratamiento;
- eliminación de materia orgánica biodegradable;
- filtración por ultrafiltración;
- dosificación controlada de biocidas cuando sea compatible con el sistema;
- eliminación completa del cloro libre antes de las membranas de poliamida;
- operación continua evitando largos períodos de estancamiento;
- programas preventivos de limpieza.

En las plantas modernas, prevenir sale bastante más barato que eliminar biopelículas que ya se han desarrollado.

7.6.7.8 Diagnóstico operacional

La presencia de biofouling suele manifestarse mediante una combinación de indicadores.

Por ejemplo:

- disminución gradual del flujo normalizado;
- incremento continuo de la presión diferencial;
- aumento del ATP;
- incremento de la frecuencia de limpieza;
- recuperación parcial del flujo después del CIP.

Al evaluar juntas estas variables se logra diferenciar el biofouling de los demás tipos de ensuciamiento.

Tabla 7.40

Indicadores para el diagnóstico del biofouling

Indicador	Interpretación
ATP elevado	Alta actividad biológica
Incremento de presión diferencial	Formación de biopelículas
Disminución del flujo normalizado	Obstrucción progresiva
Alta frecuencia de CIP	Biofouling persistente
Recuperación incompleta después del CIP	Biofilm consolidado

Nota. Elaboración propia.

7.6.7.9 Caso de estudio

Durante seis meses, una desalinizadora de agua marina acumula las variaciones operacionales listadas enseguida:

- disminución del flujo normalizado del 12 %;
- incremento de la presión diferencial de 0,6 a 1,4 bar;
- aumento progresivo del ATP en el agua de alimentación;
- recuperación parcial del flujo después de cada limpieza CIP.

Análisis técnico

Tomados en conjunto, estos indicadores apuntan más a biofouling que a scaling inorgánico, por las siguientes razones:

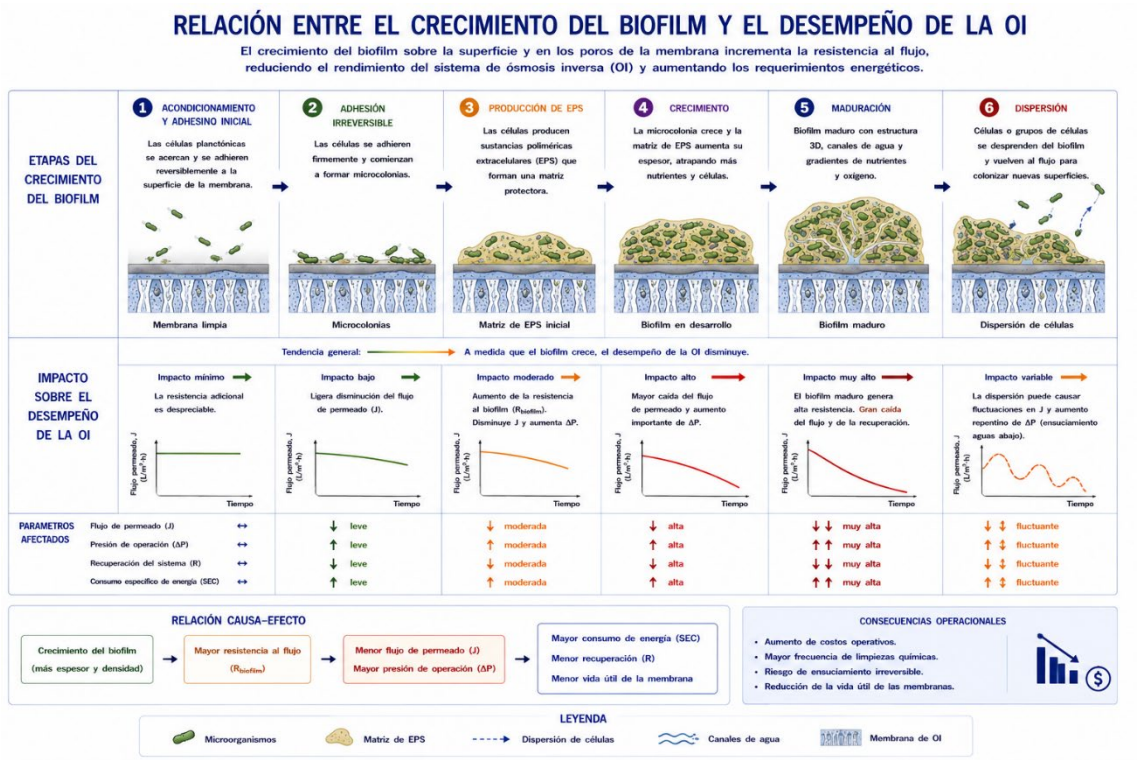
- el incremento de ATP evidencia actividad microbiológica;
- como la recuperación tras el CIP fue solo parcial, la matriz de EPS no se eliminó por completo;
- el aumento sostenido de la presión diferencial es característico de la formación de biopelículas.

Acciones recomendadas

- Optimizar el pretratamiento para reducir el carbono orgánico biodegradable.
- Revisar la eficacia de la desinfección previa a la decloración.
- Implementar monitoreo rutinario de ATP y AOC.
- Ajustar la frecuencia y formulación de las limpiezas CIP.
- Verificar la existencia de zonas de baja velocidad hidráulica en los recipientes y tuberías.

Figura 7.25

Relación entre el crecimiento del biofilm y el desempeño de la OI



Nota. Elaboración propia con base en Flemming y Wingender (2010), Baker (2012), Elimelech y Phillip (2011) y Crittenden et al. (2012).

Reflexión ingenieril

El biofouling constituye un proceso biológico altamente organizado y no una simple acumulación de microorganismos. Una vez establecida la biopelícula, las bacterias quedan protegidas por la matriz de EPS, reduciendo significativamente la eficacia de los agentes químicos. Por ello, la ingeniería moderna de membranas prioriza el **control preventivo**, el monitoreo microbiológico continuo y el diseño hidráulico que evite zonas de bajo flujo, antes que depender exclusivamente de las limpiezas químicas.

7.6.8 SCALING INORGÁNICO: MECANISMOS DE PRECIPITACIÓN Y CONTROL

El **scaling** o incrustación inorgánica corresponde a la formación de depósitos cristalinos sobre la superficie de la membrana como consecuencia de la precipitación de sales poco solubles presentes en el agua de alimentación.

Lo que distingue al scaling del fouling coloidal u orgánico es su naturaleza termodinámica: lo provoca la concentración cada vez mayor de las sales en el concentrado.

Los módulos de membrana dejan pasar parte del solvente hacia el permeado; las sales, en cambio, se quedan retenidas y se acumulan en el lado del concentrado.

Como consecuencia, la concentración de especies iónicas aumenta continuamente hasta alcanzar condiciones de sobresaturación.

Superado el producto de solubilidad por el producto iónico respectivo, nacen los núcleos y los cristales empiezan a crecer sobre la membrana.

En términos de ingeniería, es el scaling lo que fija el techo de recuperación en una planta de ósmosis inversa.

7.6.8.1 Fundamento termodinámico

La precipitación ocurre cuando:

```
Producto iónico > Producto de solubilidad (Kps)
```

Mientras:

```
Producto iónico < Kps
```

la solución permanece estable.

Cuando:

```
Producto iónico = Kps
```

la solución se encuentra en equilibrio.

Sin embargo,

```
Producto iónico > Kps
```

origina una condición de sobresaturación que favorece la nucleación de cristales.

Interpretación ingenieril

Debe destacarse que la sobresaturación no implica necesariamente precipitación inmediata. En muchas ocasiones existe un período denominado **zona metaestable**, durante el cual la solución permanece aparentemente estable hasta que aparece un núcleo de cristalización.

Así se entiende que ciertas plantas funcionen durante un tiempo con recuperaciones altas sin que aparezcan incrustaciones.

7.6.8.2 Etapas del proceso de scaling

La formación de incrustaciones comprende varias etapas consecutivas.

Etapa 1. Concentración de sales

La recuperación incrementa la concentración de los iones en el concentrado.

Etapa 2. Sobresaturación

Se supera el límite de solubilidad.

Etapa 3. Nucleación

Se forman pequeños núcleos cristalinos.

Etapa 4. Crecimiento cristalino

Los cristales aumentan de tamaño mediante incorporación de nuevos iones.

Etapa 5. Formación de depósitos

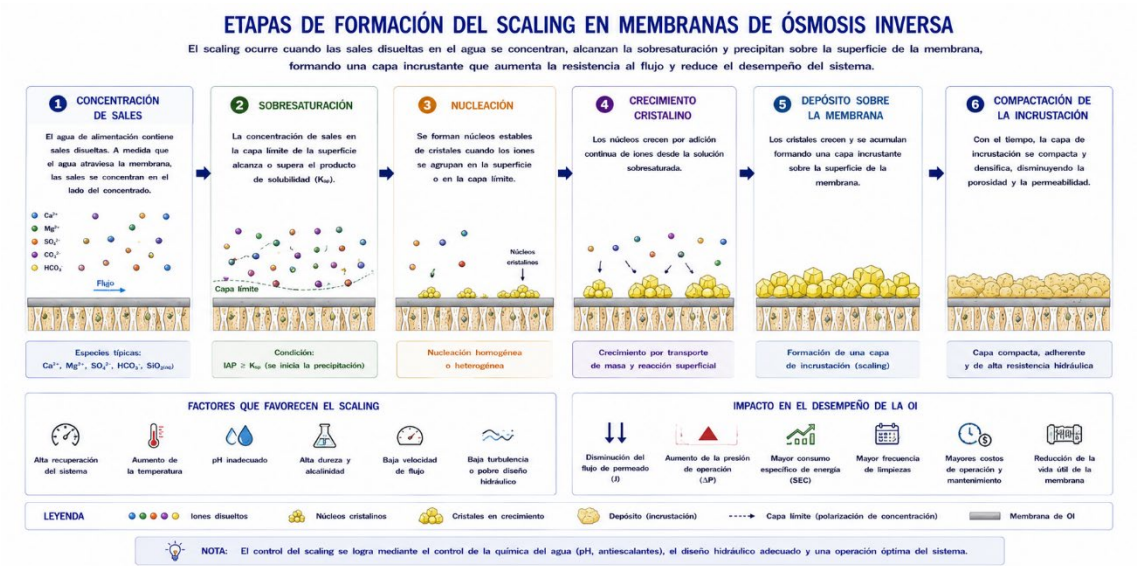
Los cristales cubren progresivamente la superficie de la membrana.

Etapa 6. Compactación

Los depósitos se vuelven más densos y difíciles de eliminar.

Figura 7.26

Así avanza el scaling en una membrana de ósmosis inversa: las sales se concentran, el agua queda sobresaturada, aparecen los primeros núcleos, los cristales engordan, se asientan sobre la superficie y la incrustación termina compactándose.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Elimelech y Phillip (2011), Crittenden et al. (2012) y Strathmann (2011).

7.6.8.3 Principales sales incrustantes

Las incrustaciones más frecuentes corresponden a:

Carbonato de calcio ($CaCO_3$)

Es la incrustación más común en aguas subterráneas y salobres.

Su precipitación depende principalmente de:

- pH;
- alcalinidad;
- calcio;
- temperatura.

Sulfato de calcio ($CaSO_4$)

Presenta una solubilidad relativamente baja.

Su formación aumenta con:

- recuperación elevada;
- altas concentraciones de sulfato.

Sulfato de bario ($BaSO_4$)

El bario suele estar presente en concentraciones bajas, pero su sulfato es de solubilidad extremadamente reducida.

Por ello incluso cantidades reducidas pueden originar incrustaciones severas.

Sulfato de estroncio ($SrSO_4$)

Presenta un comportamiento similar al sulfato de bario.

Sílice

La sílice constituye uno de los problemas más complejos.

Puede presentarse como:

- sílice reactiva;
- sílice coloidal;
- sílice polimérica.

Las incrustaciones de sílice resultan particularmente difíciles de eliminar mediante limpieza química.

Fluoruro de calcio

Puede aparecer en determinadas aguas subterráneas con elevadas concentraciones de fluoruro.

Tabla 7.41

Principales compuestos responsables del scaling

Incrustación	Principales iones involucrados	Dificultad de limpieza
Carbonato de calcio	$Ca^{2+} – HCO_3^-$	Baja
Sulfato de calcio	$Ca^{2+} – SO_4^{2-}$	Media
Sulfato de bario	$Ba^{2+} – SO_4^{2-}$	Muy alta
Sulfato de estroncio	$Sr^{2+} – SO_4^{2-}$	Alta
Sílice	SiO_2	Muy alta
Fluoruro de calcio	$Ca^{2+} – F^-$	Alta

Nota. Elaboración propia.

7.6.8.4 Variables que favorecen el scaling

Los principales factores son:

- elevada recuperación;
- incremento del pH;
- aumento de temperatura;
- elevada concentración salina;
- insuficiente dosificación de antincrustantes;
- mezcla inadecuada de productos químicos.

Interpretación ingenieril

Entre todas estas variables, la **recuperación** constituye el parámetro de diseño más importante.

Con cada aumento de la recuperación se concentra más el rechazo y el sistema se acerca un poco más a la sobresaturación.

7.6.8.5 Índice de Saturación de Langelier (LSI)

Uno de los criterios más utilizados para evaluar la tendencia a la precipitación de carbonato de calcio es el **Índice de Saturación de Langelier (LSI)**.

Se define como:

$$LSI = pH - pHs$$

donde:

$$pHs = pH \text{ de saturación del carbonato de calcio}$$

La interpretación general es:

Tabla 7.42

Interpretación del Índice de Saturación de Langelier.

Valor del LSI	Interpretación
LSI < 0	Agua subsaturada
LSI = 0	Equilibrio
LSI > 0	Tendencia a incrustación

Nota. Elaboración propia.

Ejemplo 7.13

Supóngase:

$$pH = 8{,}2$$

$$pHs = 7{,}5$$

Entonces:

$$LSI = 8{,}2 - 7{,}5 = 0{,}7$$

Interpretación

El agua presenta tendencia a formar carbonato de calcio.

7.6.8.6 Índice de Ryznar (RSI)

El **Índice de Ryznar** complementa la interpretación del LSI.

Se calcula mediante:

$$RSI = 2pHs - pH$$

Interpretación orientativa:

Tabla 7.43

Interpretación general del Índice de Ryznar.

RSI	Tendencia
< 6	Formación de incrustaciones
6–7	Equilibrio aproximado
> 7	Tendencia corrosiva

Nota. Elaboración propia.

7.6.8.7 Índice de Stiff & Davis (S&DSI)

El **Índice de Stiff & Davis** constituye una modificación del LSI desarrollada específicamente para aguas con elevada salinidad.

Por ello resulta especialmente útil en:

- agua de mar;

- aguas salobres;
- concentrados de ósmosis inversa.

Durante el diseño de plantas desalinizadoras suele preferirse este índice frente al LSI clásico.

7.6.8.8 Índice SDI (Silt Density Index)

Es importante distinguir claramente el **SDI** del **LSI**.

Aunque ambos índices aparecen frecuentemente en ingeniería del agua, evalúan fenómenos completamente diferentes.

El **SDI** estima el potencial de ensuciamiento por partículas suspendidas.

No evalúa incrustaciones químicas.

Su interpretación habitual es:

Tabla 7.44

Interpretación del Índice de Densidad de Sedimentos (SDI).

SDI15	Calidad del agua
< 3	Excelente
3–5	Aceptable
> 5	Deficiente para ósmosis inversa

Nota. Elaboración propia.

7.6.8.9 Índice MFI (Modified Fouling Index)

El **MFI** representa una herramienta más sensible que el SDI para evaluar el potencial de ensuciamiento particulado.

Su gran ventaja es que toma en cuenta cómo evoluciona el flujo durante la filtración, en lugar de limitarse al tiempo que tarda en producirse una pérdida de presión determinada.

El MFI se usa hoy de manera generalizada en plantas grandes y en procesos cuyo pretratamiento es la ultrafiltración.

Tabla 7.45

Comparación de índices utilizados para evaluar fouling y scaling

Índice	Evalúa
LSI	Carbonato de calcio
RSI	Tendencia a incrustación/corrosión
S&DSI	Aguas de alta salinidad

Índice	Evalúa
SDI	Ensuciamiento por partículas
MFI	Potencial de fouling particulado

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

El scaling, de naturaleza termodinámica, responde al equilibrio entre las sales presentes en el agua. A diferencia del ensuciamiento biológico o del orgánico, se previene sobre todo manteniendo controlada la sobresaturación: con una recuperación bien diseñada, con el pH ajustado y con antincrustantes dosificados. Si se emplean a la vez MFI, SDI, S&DSI, RSI y LSI, se valora de manera integral el riesgo de incrustación y ensuciamiento, y se dispone de un sustento técnico firme tanto para diseñar como para operar una planta de ósmosis inversa.

7.6.9 ANTINCRUSTANTES: MECANISMOS DE ACCIÓN, SELECCIÓN Y DOSIFICACIÓN

Los **antincrustantes** (*antiscalants*) son productos químicos adicionados al agua de alimentación antes del ingreso a los módulos de ósmosis inversa con el propósito de impedir o retrasar la formación de incrustaciones minerales sobre la superficie de las membranas.

Aun cuando el agua llegue a la sobresaturación, estos productos alteran los mecanismos de nucleación y de crecimiento de los cristales, y así la planta puede trabajar con recuperaciones mayores de las que admitiría sin tratamiento químico.

Hoy es práctica corriente que casi toda planta de ósmosis inversa, sea salobre o marina, opere con antincrustantes.

7.6.9.1 Fundamentos del uso de antincrustantes

En una planta de ósmosis inversa, la concentración del agua sube gradualmente conforme avanza por los elementos de membrana.

Como consecuencia:

- aumenta la concentración de calcio;
- aumenta la concentración de sulfatos;
- aumenta la concentración de bicarbonatos;
- aumenta la concentración de sílice;
- aumenta la fuerza iónica de la solución.

De no aplicarse tratamiento, buena parte de esas especies se sobresaturaría enseguida y se depositaría sobre la membrana.

Los antincrustantes cambian ese comportamiento: los iones permanecen en solución durante mucho más tiempo.

Interpretación ingenieril

Es importante destacar que un antiincrustante **no aumenta la solubilidad termodinámica de las sales**. Su acción consiste en retardar la cinética de nucleación y crecimiento cristalino, ampliando la denominada zona metaestable y permitiendo operar a recuperaciones más elevadas sin formación inmediata de depósitos.

7.6.9.2 Mecanismos de acción

Los antincrustantes comerciales actúan simultáneamente mediante varios mecanismos.

Efecto umbral (*Threshold Effect*)

Es el mecanismo más importante.

Una cantidad muy pequeña de antiincrustante basta para impedir que precipiten grandes cantidades de sales.

Entre los hallazgos de la historia de este campo del tratamiento de aguas, pocos han sido tan importantes como este.

Modificación del crecimiento cristalino

Las moléculas del antiincrustante se adsorben sobre la superficie de los cristales en formación.

Como consecuencia:

- alteran su geometría;
- disminuyen la velocidad de crecimiento;
- generan cristales menos compactos y más fáciles de remover.

Dispersión de partículas

Los polímeros presentes en muchos antincrustantes generan repulsión electrostática entre partículas.

Esto evita:

- aglomeración;
- sedimentación;
- crecimiento de depósitos.

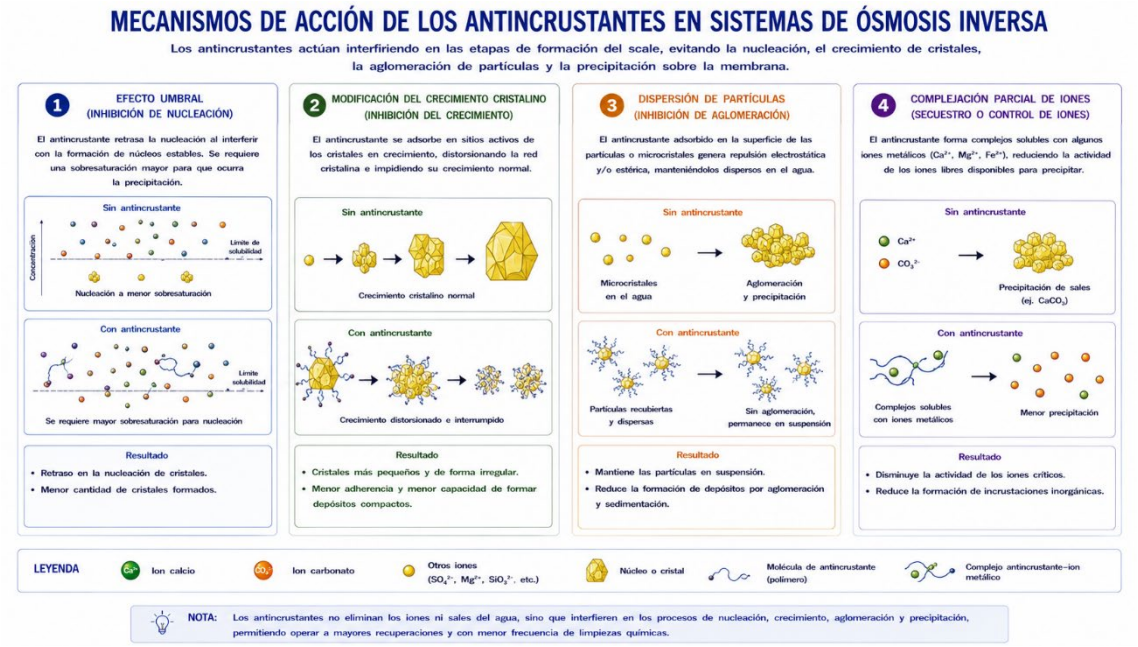
Secuestro parcial de iones

Algunos productos pueden formar complejos débiles con determinados cationes.

Este mecanismo contribuye adicionalmente a retrasar la cristalización.

Figura 7.27

Cómo trabajan los antincrustantes en ósmosis inversa: aprovechan el efecto umbral, alteran el crecimiento de los cristales, dispersan las partículas y complejan parcialmente los iones.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Elimelech y Phillip (2011) y Amjad (1995).

7.6.9.3 Clasificación química

Los antincrustantes modernos pertenecen principalmente a las siguientes familias.

Fosfonatos

Presentan excelente desempeño frente a:

- carbonato de calcio;
- sulfato de calcio;
- óxidos metálicos.

Se utilizan ampliamente en aguas de dureza elevada.

Poliacrilatos

Son polímeros aniónicos que actúan principalmente mediante dispersión y modificación cristalina.

Resultan eficaces frente a:

- carbonato de calcio;
- sulfato de calcio;
- partículas finas.

Policarboxilatos

Presentan buena estabilidad química y amplio espectro de aplicación.

Se emplean frecuentemente en aguas industriales.

Copolímeros avanzados

Los desarrollos más recientes combinan diferentes grupos funcionales en una misma molécula.

Estas formulaciones permiten controlar simultáneamente:

- carbonatos;
- sulfatos;
- sílice;
- óxidos metálicos.

Tabla 7.46

Clasificación de los principales antincrustantes utilizados en plantas de ósmosis inversa.

Familia química	Mecanismo predominante	Aplicaciones principales
Fosfonatos	Efecto umbral y complejación	Carbonatos y sulfatos
Poliacrilatos	Dispersión y modificación cristalina	Carbonato de calcio
Policarboxilatos	Dispersión y control de precipitación	Aguas industriales
Copolímeros	Acción múltiple	Amplio espectro de incrustaciones

Nota. Elaboración propia.

7.6.9.4 Selección del antiincrustante

Al escoger el producto se toma como punto de partida cómo es químicamente el agua que alimenta la planta, además del régimen operativo.

Los principales parámetros que deben evaluarse son:

- calcio;
- magnesio;
- bario;
- estroncio;
- sulfatos;
- bicarbonatos;
- sílice;
- fluoruros;
- pH;
- temperatura;
- recuperación de diseño.

Conviene, además, calcular los índices de saturación y simular la concentración en el rechazo, con el fin de detectar qué especies tienen mayor riesgo de precipitar.

Interpretación ingenieril

Ningún antincrustante sirve para todos los casos. La elección debe apoyarse en un análisis químico detallado y, de preferencia, en los programas de predicción de los fabricantes, que incluyen modelos específicos para distintas composiciones de agua.

7.6.9.5 Dosificación

La dosificación habitual de antincrustantes es muy baja.

En muchas plantas oscila entre:

```
1 y 6 mg/L
```

aunque el valor exacto depende de:

- composición del agua;
- recuperación;
- temperatura;
- tipo de membrana;
- producto utilizado.

La dosificación insuficiente favorece la formación de incrustaciones.

Pasarse con la dosis encarece la operación y puede traer otras formas de ensuciamiento.

Procedimiento general

La dosificación comprende las siguientes etapas:

1. Caracterizar el agua de alimentación.
2. Calcular la composición del concentrado para la recuperación de diseño.
3. Identificar las sales con mayor riesgo de precipitación.
4. Seleccionar el antiincrustante compatible.
5. Determinar la dosis recomendada por el fabricante.
6. Verificar el desempeño mediante seguimiento operacional.

Ejemplo 7.14. Cálculo del consumo diario de antiincrustante

Una planta trata:

$$Qa = 500\ m^3/h$$

La dosis recomendada es:

```
3 mg/L
```

Calcular el consumo diario de producto.

Paso 1. Caudal diario

```
500 × 24 = 12 000 m³/día
```

Paso 2. Conversión de unidades

```
3 mg/L = 3 g/m³
```

Paso 3. Consumo diario

```
12 000 × 3 = 36 000 g/día
```

Por tanto,

```
Consumo = 36 kg/día
```

Interpretación ingenieril

El resultado es el gasto teórico de producto puro. Ya en la práctica se corrige con la concentración a la que se vende la formulación y con lo que se pierde en el equipo de dosificación.

7.6.9.6 Compatibilidad con membranas

No todos los productos químicos son compatibles con las membranas de poliamida.

Durante la selección deben verificarse:

- compatibilidad química;
- intervalo de pH permitido;
- estabilidad frente a la temperatura;
- ausencia de agentes oxidantes;
- interacción con otros productos del pretratamiento.

Mezclar formulaciones incompatibles puede hacer caer el rechazo de sales, o destruir de manera irreversible la capa activa.

7.6.9.7 Optimización económica

La dosis óptima no coincide necesariamente con la mínima recomendada ni con la máxima permitida.

Debe encontrarse un equilibrio entre:

- costo del producto;
- incremento de recuperación;
- frecuencia de limpiezas CIP;
- consumo energético;
- vida útil de las membranas.

En muchos proyectos, basta aumentar apenas la dosis para recuperar más agua y abaratar sensiblemente lo que cuesta, en conjunto, producirla.

Tabla 7.47

Factores que influyen en la selección y dosificación de antincrustantes

Factor	Influencia
Composición química del agua	Determina el tipo de incrustación predominante
Recuperación del sistema	Aumenta la concentración de sales en el rechazo
Temperatura	Modifica la solubilidad y la cinética de precipitación
Tipo de membrana	Define la compatibilidad química
Calidad del pretratamiento	Reduce la presencia de partículas y materia orgánica
Estrategia de operación	Condiciona la dosis óptima y la frecuencia de ajuste

Nota. Elaboración propia.

7.6.9.8 Errores frecuentes en la dosificación

En la práctica industrial se observan algunos errores recurrentes:

- seleccionar el antiincrustante únicamente por su costo;
- utilizar una dosis fija sin considerar cambios en la calidad del agua;
- no recalcular la dosis al modificar la recuperación de la planta;
- mezclar productos incompatibles;
- descuidar el mantenimiento de las bombas dosificadoras;
- no verificar periódicamente la concentración del producto preparado.

Tales errores pueden elevar el riesgo de incrustaciones o llevar a un uso poco eficiente de los productos químicos.

Figura 7.28

Diagrama de decisión para la selección de antincrustantes en sistemas de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia con base en Amjad (1995), Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Elimelech y Phillip (2011) y manuales técnicos de fabricantes de antincrustantes.

Reflexión ingenieril

Gracias a los antincrustantes, las plantas de ósmosis inversa han podido elevar bastante su recuperación y espaciar las limpiezas químicas. Pero rinden solo si el agua está bien caracterizada, el producto bien elegido y la dosis ajustada a lo que ocurre

realmente en planta. Para la ingeniería de membranas son un apoyo más de una estrategia mayor, que además requiere buen pretratamiento, diseño hidráulico apropiado y vigilancia permanente de los indicadores de desempeño.

7.6.10 LIMPIEZA QUÍMICA DE MEMBRANAS (CLEANING-IN-PLACE, CIP)

La **limpieza química de membranas**, conocida internacionalmente como **Cleaning-In-Place (CIP)**, corresponde al conjunto de operaciones destinadas a remover los depósitos acumulados sobre la superficie de las membranas sin necesidad de desmontar los elementos del sistema.

Se pretende devolver a la planta, hasta donde sea posible, su condición operativa original, quitando incrustaciones minerales, coloides, biopelículas y materia orgánica.

El CIP es una pieza imprescindible de toda planta moderna de ósmosis inversa; por eso se lo debe prever desde la ingeniería básica.

7.6.10.1 Objetivos del sistema CIP

Los objetivos principales son:

- recuperar el flujo de permeado;
- disminuir la presión diferencial;
- restaurar el rechazo de sales;
- prolongar la vida útil de las membranas;
- reducir el consumo específico de energía;
- evitar daños permanentes en la capa activa.

En lo económico, una buena estrategia de limpieza recorta de manera importante los costos de operación y de reposición de membranas.

Interpretación ingenieril

La limpieza química no pretende dejar la membrana como nueva; lo que busca es recobrar un alto porcentaje de su desempeño inicial sin comprometer su integridad estructural.

7.6.10.2 ¿Cuándo debe iniciarse una limpieza?

Uno de los errores más comunes es dejar pasar demasiado tiempo antes de hacer el CIP.

Según las recomendaciones internacionales, la limpieza debe programarse cuando se presenta alguna de estas condiciones:

- disminución del flujo normalizado entre **10 % y 15 %**;
- incremento de la presión diferencial entre **10 % y 15 %**;
- disminución del rechazo normalizado de sales entre **5 % y 10 %**;
- incremento persistente del consumo específico de energía;
- presencia confirmada de biofouling o scaling.

Esperar a que el rendimiento caiga mucho no es recomendable: los depósitos se consolidan y luego cuesta más removerlos.

Tabla 7.48

Criterios para iniciar una limpieza CIP

Variable operacional	Valor de referencia
Disminución del flujo normalizado	10–15 %
Incremento de presión diferencial	10–15 %
Disminución del rechazo de sales	5–10 %
Incremento del consumo energético	Tendencia sostenida
Confirmación de biofouling o scaling	Limpieza inmediata

Nota. Elaboración propia con base en recomendaciones de fabricantes de membranas y literatura especializada.

7.6.10.3 Principios de la limpieza química

Una limpieza eficaz depende de cuatro factores principales:

- acción química;
- acción hidráulica;
- temperatura;
- tiempo de contacto.

Estos factores actúan de forma complementaria.

Una solución muy concentrada no compensa un tiempo de contacto insuficiente ni una circulación deficiente.

El círculo de Sinner aplicado al CIP

La eficacia de una limpieza puede interpretarse mediante el **círculo de Sinner**, ampliamente utilizado en ingeniería sanitaria.

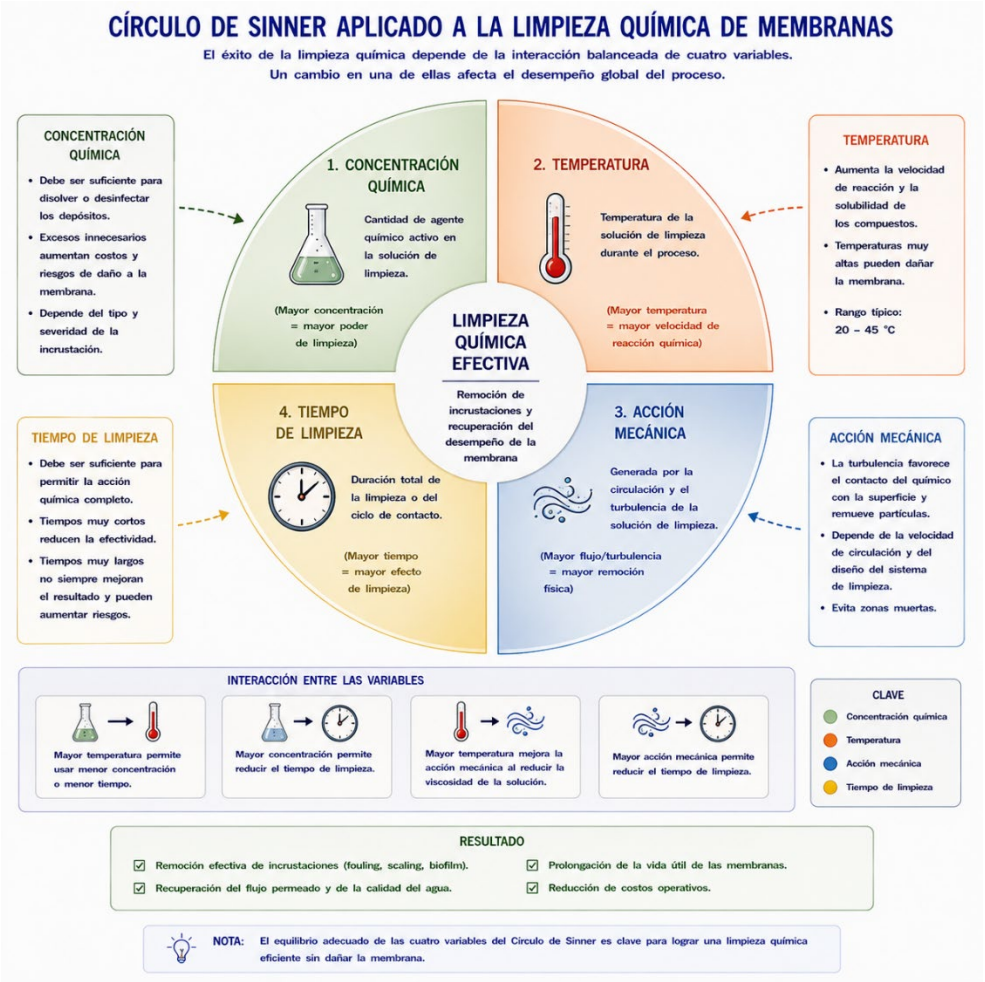
Los cuatro componentes son:

- concentración del reactivo;
- temperatura;
- acción mecánica (circulación);
- tiempo.

Si uno de ellos baja, los demás tienen que subir para que el proceso conserve su eficacia.

Figura 7.29

Círculo de Sinner aplicado a la limpieza química de membranas



Nota. Elaboración propia.

7.6.10.4 Clasificación de las soluciones de limpieza

La selección del reactivo depende del tipo de ensuciamiento predominante.

Soluciones ácidas

Se emplean principalmente para eliminar:

- carbonato de calcio;
- óxidos metálicos;
- hidróxidos metálicos;
- algunas incrustaciones minerales.

Los ácidos más utilizados son:

- ácido cítrico;
- ácido clorhídrico (en aplicaciones específicas);
- ácido fosfórico;
- ácido sulfámico.

Las soluciones ácidas suelen trabajar con valores de pH comprendidos entre **2 y 3**, respetando siempre las especificaciones del fabricante de la membrana.

Soluciones alcalinas

Se utilizan para remover:

- materia orgánica;
- proteínas;
- grasas;
- aceites;
- biofilms.

Generalmente contienen:

- hidróxido de sodio;
- surfactantes;
- agentes quelantes;
- dispersantes.

El intervalo habitual de pH se encuentra entre **10 y 12**, siempre dentro de los límites permitidos por la membrana.

Soluciones enzimáticas

En aplicaciones especiales pueden emplearse enzimas para degradar:

- proteínas;

- polisacáridos;
- componentes de la matriz de EPS.

Estas formulaciones resultan especialmente útiles frente al biofouling avanzado.

Tabla 7.49

Selección de soluciones de limpieza según el tipo de ensuciamiento

Tipo de ensuciamiento	Solución recomendada
Carbonato de calcio	Ácida
Sulfatos metálicos	Ácida específica
Óxidos de hierro	Ácida con agentes complejantes
Materia orgánica	Alcalina
Biofilm	Alcalina con surfactantes y, cuando corresponda, enzimas
Mezcla de depósitos	Secuencia alcalina seguida de ácida

Nota. Elaboración propia.

7.6.10.5 Secuencia general del procedimiento CIP

Una limpieza completa comprende las siguientes etapas:

Etapa 1. Enjuague inicial

Se desplaza el agua de proceso mediante agua permeada o desmineralizada.

Etapa 2. Preparación de la solución

Se prepara el reactivo respetando:

- concentración;
- temperatura;
- volumen;
- pH.

Etapa 3. Recirculación

La solución circula a baja presión por los recipientes de membranas.

El objetivo no es producir permeado, sino favorecer el contacto químico.

Etapa 4. Remojo

A veces se deja la solución en reposo durante cierto tiempo para ayudar a disolver los depósitos.

Etapa 5. Segunda recirculación

Se restablece la circulación para retirar los contaminantes desprendidos.

Etapa 6. Enjuague final

Se elimina completamente el reactivo antes del reinicio de la operación.

Interpretación ingenieril

La secuencia varía según el tipo de ensuciamiento identificado. Cuando predominan los depósitos orgánicos, por ejemplo, se suele hacer primero una limpieza alcalina y después una ácida que elimine los residuos minerales que queden.

7.6.10.6 Diseño del sistema CIP

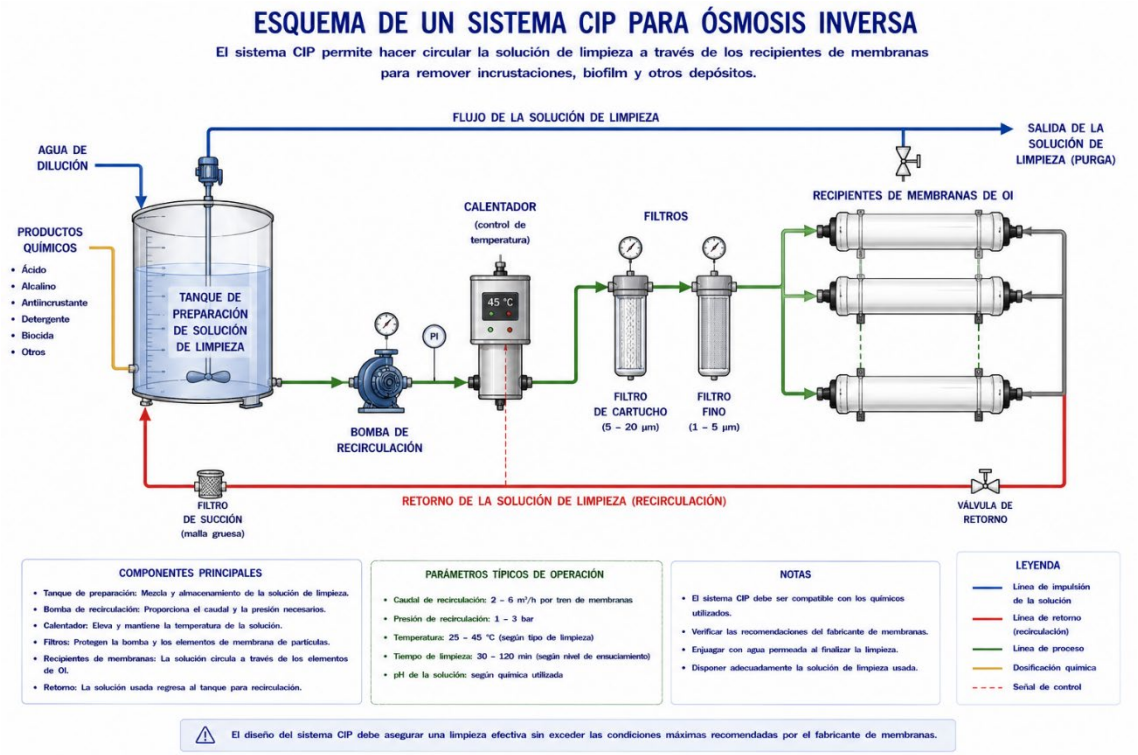
Un sistema CIP está constituido generalmente por:

- tanque de preparación de soluciones;
- bomba de recirculación;
- intercambiador de calor o calentador;
- filtros de seguridad;
- tuberías;
- válvulas;
- instrumentos de presión;
- medidores de caudal;
- sensores de temperatura y pH.

El diseño debe lograr velocidades que basten para arrastrar los depósitos, pero sin sobrepasar los límites hidráulicos que fija el fabricante de las membranas.

Figura 7.30

Esquema de un sistema CIP para ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia con base en manuales de diseño de sistemas de limpieza CIP.

7.6.10.7 Cálculo del volumen de solución de limpieza

El volumen mínimo de solución debe ser suficiente para llenar completamente:

- tuberías;
- recipientes a presión;
- tanque de recirculación;
- líneas de retorno.

Ejemplo 7.15

Supóngase un sistema con:

- volumen interno de recipientes: **0,90 m³**;
- tuberías: **0,25 m³**;
- tanque de recirculación: **0,85 m³**.

El volumen mínimo requerido será:

$$Vc = 0,90 + 0,25 + 0,85$$

$$Vc = 2,00\ m^3$$

Considerando un margen operativo del **20 %**, el volumen recomendado es:

$$Vc = 2,40\ m^3$$

Interpretación ingenieril

La solución debe tener volumen suficiente para circular sin interrupción y sin que ingrese aire al sistema. Lo habitual en proyectos industriales es añadir un margen que cubra lo que se pierde al manipular la solución.

7.6.10.8 Evaluación de la eficacia del CIP

Una vez finalizada la limpieza, deben compararse los indicadores operacionales con los valores previos.

Los principales parámetros son:

- flujo normalizado;
- presión diferencial;
- rechazo de sales;
- conductividad del permeado;
- consumo específico de energía.

La eficacia de la limpieza puede expresarse como:

```
Recuperación del flujo (%) =
(Flujo después del CIP / Flujo inicial de referencia) × 100
```

Ejemplo 7.16

Flujo inicial de referencia:

```
100 m³/h
```

Flujo antes del CIP:

```
86 m³/h
```

Flujo después del CIP:

```
96 m³/h
```

Recuperación del desempeño:

```
96 / 100 × 100 = 96 %
```

La limpieza recuperó la mayor parte del rendimiento hidráulico de la membrana.

Tabla 7.50

Indicadores para evaluar la eficacia del CIP

Indicador	Objetivo esperado
Flujo normalizado	Recuperación significativa

Indicador	Objetivo esperado
Presión diferencial	Disminución respecto al valor previo
Rechazo de sales	Restablecimiento de los valores normales
Conductividad del permeado	Estabilidad o mejora
Consumo específico de energía	Reducción

Nota. Elaboración propia.

7.6.10.9 Errores frecuentes durante el CIP

Los problemas más comunes observados en plantas industriales incluyen:

- iniciar la limpieza demasiado tarde;
- utilizar soluciones incompatibles con la membrana;
- trabajar fuera del intervalo de pH permitido;
- emplear temperaturas superiores a las recomendadas;
- realizar una recirculación insuficiente;
- no controlar el pH durante la limpieza;
- reutilizar soluciones excesivamente contaminadas;
- reiniciar la operación sin un enjuague adecuado.

Estos errores pueden restar eficacia a la limpieza y hasta causar daños irreversibles en las membranas.

Caso de estudio 7.17

Una planta de agua salobre presenta los siguientes síntomas:

- disminución del flujo normalizado del **14 %**;
- incremento de la presión diferencial del **18 %**;
- rechazo de sales prácticamente constante.

El análisis del agua revela un SDI mayor y más materia orgánica natural tras un período de lluvias intensas.

Diagnóstico

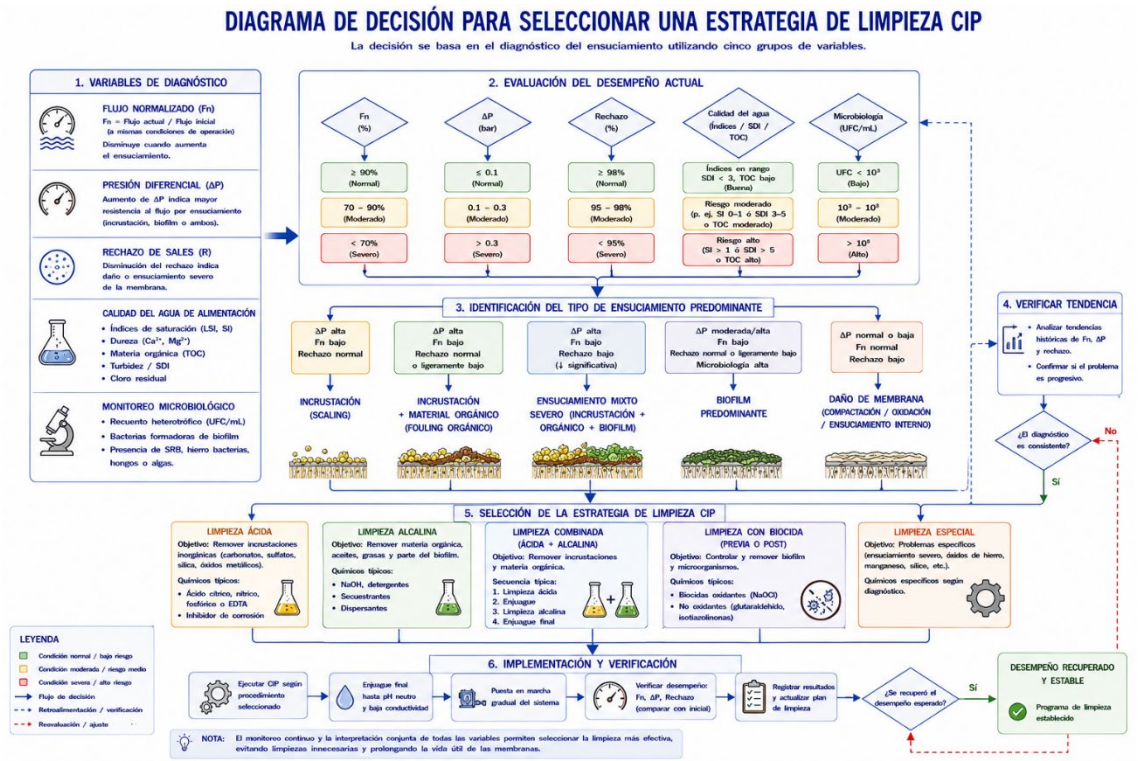
El rechazo de sales se mantiene estable, y eso sugiere que la membrana sigue íntegra. La presión diferencial sube y el flujo baja: es un ensuciamiento superficial, quizá por fouling coloidal combinado con orgánico.

Estrategia de limpieza recomendada

1. Ejecutar un CIP alcalino para remover la materia orgánica y los coloides adheridos.
2. Verificar la recuperación del flujo normalizado.
3. Si persisten evidencias de incrustación mineral, realizar posteriormente un CIP ácido.
4. Examinar cómo rinde el pretratamiento y reajustar los criterios operativos en episodios de turbidez alta.

Figura 7.31

Diagrama de decisión para elegir la estrategia de limpieza CIP según el tipo de ensuciamiento.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Elimelech y Phillip (2011), Strathmann (2011) y manuales técnicos de fabricantes de membranas.

Reflexión ingenieril

Más que reaccionar ante una falla grave, la limpieza química se concibe como mantenimiento guiado por indicadores objetivos. Si el programa de CIP está bien diseñado y se respalda en el flujo normalizado, en la presión diferencial y en la calidad del agua que alimenta la planta, esta rinde más, consume menos energía y sus membranas duran más. Para dar confiabilidad a un sistema de ósmosis inversa conviene unir tres

elementos: pretratamiento eficiente, antincrustantes bien dosificados y limpieza programada con racionalidad.

7.6.11 DIAGNÓSTICO INTEGRAL DE FALLAS POR FOULING Y SCALING

Que una planta de ósmosis inversa opere con éxito depende de saber identificar a tiempo qué mecanismos le están restando rendimiento.

En la práctica industrial, que baje la producción de agua no es un diagnóstico; es apenas un síntoma.

La verdadera labor del ingeniero consiste en determinar si dicho comportamiento se debe a:

- fouling coloidal;
- fouling orgánico;
- biofouling;
- scaling inorgánico;
- deterioro de membranas;
- problemas hidráulicos;
- fallas en bombas;
- errores operacionales.

Por eso el diagnóstico exige una metodología estructurada que considere a la vez los distintos indicadores de operación.

7.6.11.1 Principios generales del diagnóstico

Lo primero es contrastar los valores de operación de hoy con las condiciones de referencia registradas cuando se puso en marcha la planta.

Las variables más importantes son:

- flujo normalizado;
- presión diferencial;
- rechazo normalizado;
- conductividad del permeado;
- temperatura;

- recuperación;
- consumo específico de energía.

Estas variables deben analizarse conjuntamente y no de manera independiente.

Interpretación ingenieril

Un menor flujo puede tener varias causas. Solo al combinar varios indicadores se llega a un diagnóstico confiable.

7.6.11.2 Metodología de diagnóstico

Se recomienda seguir el siguiente procedimiento.

Paso 1. Verificar la calidad de los datos

Antes de formular un diagnóstico deben descartarse errores asociados a:

- sensores descalibrados;
- medidores de caudal;
- transmisores de presión;
- analizadores de conductividad;
- errores de adquisición de datos.

Una interpretación basada en información incorrecta puede conducir a decisiones inadecuadas.

Paso 2. Analizar el flujo normalizado

Comparar el flujo actual con el flujo de referencia corregido por temperatura.

Una disminución sostenida suele indicar:

- fouling;
- scaling;
- compactación de membranas.

Paso 3. Evaluar la presión diferencial

Un incremento progresivo de la presión diferencial generalmente indica acumulación de depósitos.

Dependiendo de su evolución puede sugerir:

- fouling coloidal;

- biofouling;
- obstrucción hidráulica.

Paso 4. Analizar el rechazo de sales

Una disminución del rechazo puede indicar:

- daño químico;
- ruptura de membranas;
- deterioro de juntas tóricas;
- envejecimiento de la capa activa.

Paso 5. Revisar la calidad del agua

Analizar:

- SDI;
- turbidez;
- carbono orgánico;
- ATP;
- alcalinidad;
- dureza;
- sílice.

Estos parámetros ayudan a identificar el origen del problema.

Figura 7.32

Metodología general para el diagnóstico de fallas en plantas de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia.

7.6.11.3 Interpretación de indicadores operacionales

La evolución simultánea de las variables permite identificar patrones característicos.

Caso A

Se observa:

- disminución del flujo;
- incremento de presión diferencial;
- rechazo prácticamente constante.

Este comportamiento suele asociarse con:

- fouling coloidal;
- fouling orgánico;
- biofouling.

Caso B

Se observa:

- disminución del flujo;
- incremento moderado de presión diferencial;
- recuperación difícil después del CIP.

Este comportamiento puede indicar:

- scaling.

Caso C

Se observa:

- flujo prácticamente constante;
- disminución importante del rechazo;
- incremento de la conductividad del permeado.

Este patrón suele indicar:

- daño de membranas;
- oxidación por cloro;
- defectos mecánicos.

Caso D

Se observa:

- incremento del consumo energético;
- reducción gradual de producción;
- presión diferencial estable.

Puede indicar:

- compactación de membranas;
- disminución del rendimiento de bombas;
- aumento de presión osmótica.

Tabla 7.51

Diagnóstico preliminar mediante indicadores operacionales

Síntoma observado	Posible causa
Flujo ↓ + ΔP ↑	Fouling
Flujo ↓ + Rechazo constante	Scaling o fouling
Conductividad ↑ + Flujo estable	Daño de membrana
Consumo energético ↑	Problemas hidráulicos o fouling
ATP ↑ + ΔP ↑	Biofouling

Nota. Elaboración propia.

7.6.11.4 Árbol de decisión para el diagnóstico

El proceso de diagnóstico puede estructurarse mediante un árbol lógico.

Pregunta 1

¿Ha disminuido el flujo normalizado?

- Sí → continuar con la evaluación de la presión diferencial.
- No → revisar rechazo de sales y consumo energético.

Pregunta 2

¿Ha aumentado la presión diferencial?

- Sí → probable acumulación de depósitos.
- No → evaluar compactación o cambios en la calidad del agua.

Pregunta 3

¿Ha disminuido el rechazo?

- Sí → verificar integridad de la membrana.
- No → continuar evaluando fouling y scaling.

Pregunta 4

¿Se observa incremento de ATP o carbono orgánico biodegradable?

- Sí → probable biofouling.
- No → evaluar scaling mediante índices de saturación.

Interpretación ingenieril

Como herramienta, el árbol de decisión orienta las acciones iniciales del diagnóstico, aunque no puede sustituir el juicio profesional.

7.6.11.5 Caso de estudio 1: Fouling coloidal

Situación

Una planta de agua superficial registra:

- SDI = 6,2;
- disminución del flujo normalizado del 11 %;
- incremento de la presión diferencial del 18 %;
- rechazo de sales sin cambios significativos.

Diagnóstico

Un SDI alto junto con una presión diferencial creciente apunta a fouling coloidal por un pretratamiento insuficiente.

Acciones recomendadas

- revisar la coagulación y floculación;
- verificar el desempeño de los filtros multimedia;
- optimizar la ultrafiltración, si está instalada;
- ejecutar un CIP alcalino.

7.6.11.6 Caso de estudio 2: Scaling por carbonato de calcio

Situación

Durante el aumento de la recuperación de 45 % a 55 % se observa:

- disminución gradual del flujo;
- incremento moderado de presión diferencial;
- LSI positivo;
- dosificación insuficiente de antiincrustante.

Diagnóstico

El comportamiento indica una elevada probabilidad de scaling por carbonato de calcio.

Acciones recomendadas

- reducir temporalmente la recuperación;
- ajustar la dosificación del antiincrustante;
- ejecutar una limpieza ácida;
- recalcular el LSI y el S&DSI para las nuevas condiciones de operación.

7.6.11.7 Caso de estudio 3: Biofouling avanzado

Situación

Después de ocho meses de operación se registran:

- incremento continuo del ATP;
- aumento de la presión diferencial;
- recuperación parcial del flujo después de cada CIP;

- incremento de la frecuencia de limpieza.

Diagnóstico

La persistencia de estos síntomas indica el desarrollo de una biopelícula madura.

Acciones recomendadas

- optimizar el pretratamiento biológico;
- revisar la eliminación de materia orgánica biodegradable;
- emplear una secuencia de limpieza específica para biofilms;
- fortalecer el monitoreo microbiológico.

Tabla 7.52

Casos típicos de diagnóstico de fallas en plantas de ósmosis inversa

Caso	Indicadores	Diagnóstico	Acción recomendada
1	SDI alto + ΔP elevada	Fouling coloidal	Mejorar el pretratamiento
2	LSI positivo + recuperación alta	Scaling	Ajustar antiincrustante y limpieza ácida
3	ATP alto + ΔP creciente	Biofouling	Control microbiológico y CIP específico
4	Conductividad alta	Daño de membranas	Inspección y reemplazo de elementos defectuosos

Nota. Elaboración propia.

7.6.11.8 Monitoreo predictivo

Las plantas modernas incorporan herramientas de mantenimiento predictivo basadas en:

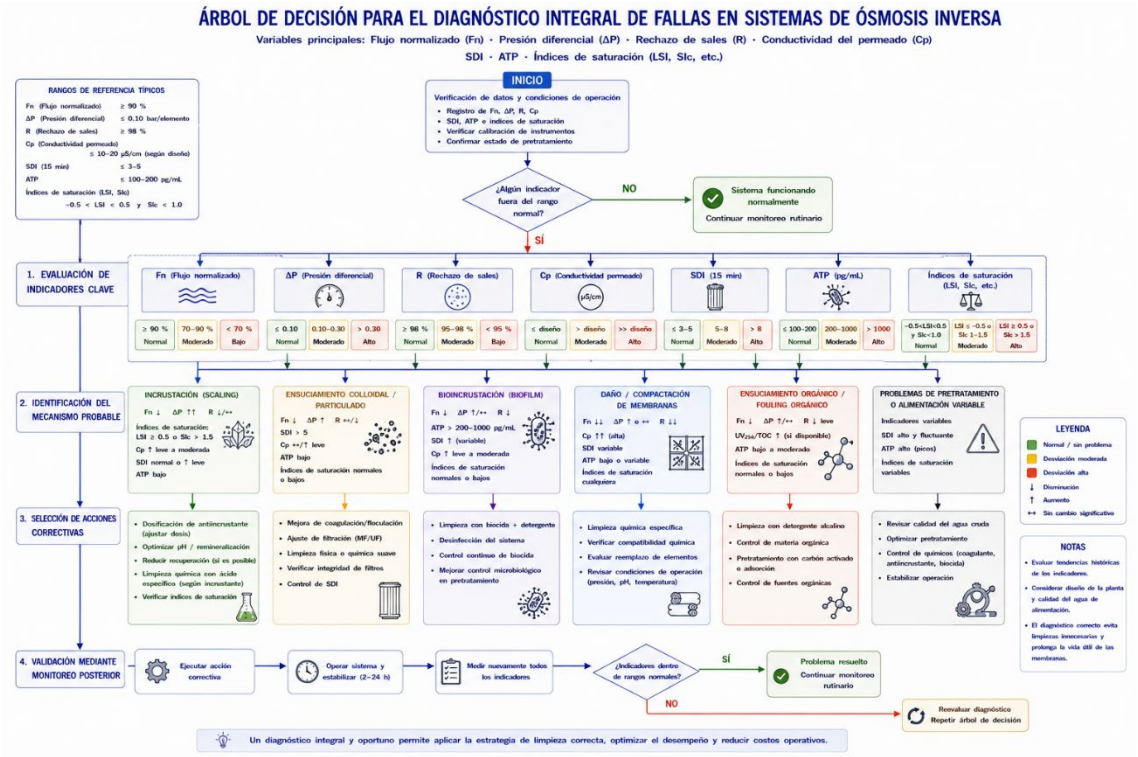
- análisis de tendencias;
- aprendizaje automático (*Machine Learning*);
- inteligencia artificial;
- gemelos digitales (*Digital Twins*);
- plataformas SCADA avanzadas.

Estos sistemas permiten detectar desviaciones antes de que se produzcan pérdidas significativas de producción.

Piénsese en un modelo predictivo: puede captar que el flujo normalizado desciende de modo anómalo, señal de un biofouling incipiente, y sugerir una intervención mientras la biopelícula aún no madura.

Figura 7.33

Árbol de decisión para el diagnóstico integral de fallas en sistemas de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia con base en Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Elimelech y Phillip (2011), Strathmann (2011), Flemming y Wingender (2010) y recomendaciones operacionales de fabricantes de membranas.

Reflexión ingenieril

Para diagnosticar fallas en ósmosis inversa se necesita juntar saberes de hidráulica, microbiología, instrumentación y química del agua. Un indicador suelto jamás revela con certeza qué originó la pérdida de rendimiento. Las decisiones salen mejor, y a tiempo, cuando las variables operacionales se leen como conjunto, con monitoreo continuo y métodos sistemáticos; además así se afinan los planes de mantenimiento y las membranas duran más.

7.6.12 CASOS INTEGRALES DE DISEÑO, OPERACIÓN Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Los casos de estudio que siguen sirven para integrar lo aprendido a lo largo de este capítulo.

Cada caso comprende:

- análisis del agua;

- interpretación de parámetros operacionales;
- diagnóstico técnico;
- cálculos de ingeniería;
- selección de alternativas de solución;
- evaluación económica;
- conclusiones técnicas.

La meta es afinar el juicio profesional con el que se enfrentan los problemas reales de planta.

Caso de estudio 7.18

Caída de producción en una desalinizadora de agua de mar: diagnóstico integral

Planteamiento del problema

Una planta desalinizadora mediante ósmosis inversa produce agua potable para abastecimiento urbano.

El personal detecta, tras dieciocho meses de funcionamiento ininterrumpido, que el permeado baja poco a poco y que la electricidad consumida sube.

Al ingeniero responsable se le pide hallar la causa del problema y plantear una estrategia de recuperación.

Datos de diseño

Producción nominal

`100 000 m³/día`

Recuperación

`45 %`

Número de trenes

`5`

Presión de operación

`64 bar`

Temperatura

`24 °C`

Tipo de membrana

Poliamida de agua de mar

Sistema de recuperación energética

Intercambiadores isobáricos

Condiciones de referencia

Flujo normalizado

100 %

Presión diferencial

0,90 bar

Rechazo de sales

99,75 %

Conductividad del permeado

310 µS/cm

Consumo específico

2,95 kWh/m³

Condiciones actuales

Flujo normalizado

87 %

Presión diferencial

1,62 bar

Rechazo

99,70 %

Conductividad

325 µS/cm

Consumo específico

3,32 kWh/m³

SDI

2,6

ATP

Elevado

LSI

-0,2

Dosificación de antiincrustante

Normal

Paso 1. Comparación con las condiciones de referencia

Se observa:

Disminución del flujo:

100−87=13 %

Incremento de la presión diferencial:

1,62−0,90=0,72 bar

Incremento relativo:

80 %

Incremento del consumo específico:

3,32−2,95=0,37 kWh/m³

Incremento porcentual:

12,5 %

Primera interpretación

Existe un deterioro operacional importante.

Sin embargo, el rechazo prácticamente no ha cambiado.

Por tanto, inicialmente puede descartarse un daño severo de la membrana.

Paso 2. Evaluación del scaling

El valor obtenido para el LSI es:

-0,2

Este resultado indica:

- ausencia de tendencia importante a precipitación de carbonato de calcio;
- bajo riesgo de scaling calcáreo.

Además,

- la dosificación del antiincrustante permanece correcta;
- no existen cambios significativos en la composición química del agua.

Por consiguiente,

el scaling no parece constituir la causa principal.

Paso 3. Evaluación del fouling coloidal

El SDI registrado corresponde a:

2,6

Este valor es compatible con un adecuado pretratamiento.

Por tanto,

el fouling coloidal tampoco constituye la hipótesis principal.

Paso 4. Evaluación microbiológica

Los resultados muestran:

ATP elevado.

Simultáneamente se observa:

- incremento importante de presión diferencial;
- disminución gradual del flujo;
- rechazo prácticamente constante.

Este patrón coincide con el comportamiento típico del biofouling.

Diagnóstico preliminar

Alta probabilidad de desarrollo de biopelículas.

Paso 5. Confirmación del diagnóstico

Se revisa el historial operacional.

Se observa que:

- las limpiezas CIP han recuperado únicamente el 75 % del flujo perdido;
- el intervalo entre limpiezas disminuyó de seis meses a tres meses;
- el consumo de reactivos CIP ha aumentado progresivamente.

Estos antecedentes fortalecen la hipótesis de biofouling avanzado.

Diagnóstico final

El mecanismo predominante corresponde a:

Biofouling con formación de biopelículas maduras.

Estrategia de recuperación

Se propone ejecutar el siguiente programa.

Acciones inmediatas

- realizar un CIP específico para biofilm;
- verificar el pH de las soluciones;
- controlar temperatura de limpieza;
- aumentar el tiempo de remojo.

Acciones de mediano plazo

- revisar la eficiencia del pretratamiento;
- controlar carbono orgánico biodegradable;
- implementar monitoreo rutinario de ATP;
- revisar zonas de bajo flujo.

Acciones permanentes

- establecer indicadores normalizados;
- desarrollar mantenimiento predictivo;
- utilizar tendencias históricas;
- optimizar la frecuencia del CIP.

Evaluación económica

Supóngase:

Costo del CIP:

US$ 18 000

Pérdida diaria de producción:

13 000 m³/día

Valor del agua:

US$ 0,90/m³

Pérdida económica diaria:

13 000×0,90 =US$11 700/día

Período simple de recuperación:

```
18 000 / 11 700 ≈1,5 días
```

Interpretación

La limpieza se recupera económicamente en menos de dos días.

Desde el punto de vista financiero,

no resulta conveniente retrasar la intervención.

Conclusiones técnicas

1. El principal problema corresponde al desarrollo de biofouling.
2. No existen evidencias importantes de scaling.
3. La integridad de las membranas permanece adecuada.
4. La estrategia prioritaria consiste en optimizar el control microbiológico.
5. La intervención resulta económicamente altamente rentable.

Lecciones aprendidas

Este caso demuestra que:

- una disminución del flujo no implica necesariamente daño de membranas;
- si el ATP, el rechazo y la presión diferencial se leen juntos, el biofouling queda bien identificado;
- un monitoreo preventivo evita pérdidas económicas importantes;
- la ingeniería de operación ha de apoyarse en indicadores normalizados y no solo en observaciones cualitativas.

Tabla 7.53

Diagnóstico de planta de RO con pérdida de rendimiento. Caso 7.18

Variable evaluada	Valor observado	Interpretación
Flujo normalizado	87 %	Disminución significativa
Presión diferencial	1,62 bar	Obstrucción progresiva
Rechazo de sales	99,70 %	Membranas íntegras
SDI	2,6	Pretratamiento adecuado
LSI	-0,2	Bajo riesgo de scaling
ATP	Elevado	Actividad microbiológica alta
Diagnóstico final	—	Biofouling avanzado

Nota. Elaboración propia.

Caso de estudio 7.19

Control del scaling para optimizar la recuperación en una planta de ósmosis inversa

Planteamiento del problema

En una empresa minera, una planta de ósmosis inversa trata agua salobre y suministra agua de proceso.

La demanda de producción aumentó, y por eso la empresa quiere una recuperación mayor, que le permita rechazar menos volumen y captar menos agua.

El ingeniero responsable tiene que evaluar si el aumento de recuperación es viable técnicamente y definir qué modificaciones se necesitan para seguir operando con seguridad.

Datos del proyecto

Caudal de alimentación

800 m^3/h

Recuperación actual

75 %

Recuperación propuesta

82 %

Presión de operación

22 bar

Temperatura

25 °C

Conductividad del agua

4 500 µS/cm

Concentración de calcio

140 mg/L

Alcalinidad

170 mg/L como $CaCO_3$

Sílice reactiva

18 mg/L

Dosificación actual de antiincrustante

2,5 mg/L

Objetivo

Determinar si la planta puede operar con una recuperación del **82 %** sin incrementar el riesgo de incrustaciones.

Paso 1. Balance de caudales

Condición actual

Caudal de permeado

$$Qp=800\ (0.75) =600\ m^3/h$$

Caudal de concentrado

$$Qc=800-600=200\ m^3/h$$

Condición propuesta

Caudal de permeado

$$Qp=800(0.82) =656\ m^3/h$$

Caudal de concentrado

$$Qc=800-656=144\ m^3/h$$

Interpretación

Al reducirse el caudal de rechazo, las sales quedarán más concentradas dentro del sistema.

Por consiguiente, aumenta el riesgo de sobresaturación.

Paso 2. Cálculo del factor de concentración

El factor de concentración puede estimarse mediante:

$$FC=1\ /\ 1-R$$

Recuperación actual

$$FC=1\ /\ (1-0.75) =4$$

Recuperación propuesta

$$FC=1\ /\ (1-0.82) =5.56$$

Esto significa que, idealmente, las sales presentes en el concentrado alcanzarán concentraciones aproximadamente **5,6 veces mayores** que las del agua de alimentación.

Interpretación ingenieril

El incremento parece pequeño (de 75 % a 82 %), pero el aumento del factor de concentración es cercano al **39 %**, lo que puede modificar significativamente el equilibrio químico del sistema.

Paso 3. Estimación de la concentración de calcio en el concentrado

Operación actual

$$Ca=140\times4=560\ mg/L$$

Operación propuesta

$$Ca=140\times5.56=778\ mg/L$$

La concentración de calcio aumenta aproximadamente:

39%

respecto de la condición original.

Paso 4. Evaluación del riesgo de incrustación

Se recalculan los índices de saturación mediante un programa especializado.

Los resultados son:

Índice	Recuperación 75 %	Recuperación 82 %
LSI	0,20	1,05
RSI	6,4	5,3
S&DSI	0,10	0,92

Interpretación

Los tres índices muestran un incremento importante del potencial de incrustación.

Especialmente:

- carbonato de calcio;
- sulfato de calcio.

La operación propuesta no resulta recomendable sin implementar medidas adicionales de control.

Paso 5. Evaluación de alternativas

Se analizan cuatro alternativas.

Alternativa 1

Mantener la operación actual.

Ventajas

- operación estable;
- mínimo riesgo.

Desventajas

- elevado volumen de rechazo.

Alternativa 2

Incrementar únicamente la dosis de antiincrustante.

Ventajas

- inversión reducida.

Desventajas

- capacidad limitada para controlar la sobresaturación.

Alternativa 3

Reducir ligeramente el pH de alimentación.

Al disminuir el pH:

- disminuye la tendencia a precipitación del carbonato de calcio;
- mejora el margen de operación.

Sin embargo,

demanda un sistema extra para dosificar ácido y un control de la corrosión más estricto.

Alternativa 4

Incrementar la recuperación e incorporar simultáneamente:

- optimización del antiincrustante;
- ajuste de pH;
- monitoreo continuo del LSI;
- seguimiento de sílice y sulfatos.

Esta alternativa ofrece el mejor equilibrio técnico.

Paso 6. Selección del antiincrustante

El análisis químico muestra riesgo asociado a:

- carbonato de calcio;
- sulfato de calcio.

Se selecciona un copolímero de amplio espectro recomendado para:

- carbonatos;
- sulfatos;
- sílice.

La nueva dosis recomendada por el proveedor es:

```
4 mg/L
```

Paso 7. Incremento del consumo químico

Consumo actual

Caudal diario:

800×24 = 19200 m^3/día

Con:

```
2,5 g/m³
```

Consumo:

19200×2.5 = 48 kg/día

Nueva condición

Con:

```
4 g/m³
```

Consumo:

19200×4 = 76800 g/día = 76.8 kg/día

Incremento diario:

28.8 kg/día

Paso 8. Evaluación económica

Precio del antiincrustante

```
US$4/kg
```

Costo adicional diario

28.8×4 US$115/día

Costo anual

115×365 = US$41975/año

Paso 9. Beneficio obtenido

El incremento de recuperación reduce el volumen de rechazo.

Agua recuperada adicional:

656−600 = 56 m^3/h

Producción anual adicional

56×24×365 = 490560 m^3/año

Si el costo del agua captada es:

US$0,55/m³

Beneficio anual:

490560×0.55 = 269808 US$/año

Beneficio neto aproximado

269808−41975 = US$227833/año

Análisis de ingeniería

Subir la recuperación solo es viable técnicamente si se aplican medidas adicionales que controlen el riesgo de incrustación.

El costo adicional asociado al mayor consumo de antiincrustante representa aproximadamente el **15,6 %** del beneficio económico obtenido por la recuperación adicional de agua.

Por tanto, desde el punto de vista técnico y económico, la modificación resulta conveniente.

Conclusiones

1. El aumento de la recuperación de **75 % a 82 %** incrementa significativamente el factor de concentración de sales y el riesgo de incrustación.
2. La simple elevación de la recuperación sin modificar la estrategia química no es recomendable.
3. Con el ajuste del pH, una dosis mayor de antincrustante y el monitoreo de los índices de saturación, la planta puede operar con seguridad.

4. El beneficio económico de producir más agua supera con holgura el aumento del costo de los productos químicos.
5. Para optimizar la recuperación siempre hay que mirar en conjunto los balances de masa, la química del agua, la hidráulica y los costos operacionales.

Tabla 7.54

Comparación entre la operación original y la optimizada. Caso 7.19

Parámetro	Operación actual	Operación optimizada
Recuperación	75 %	82 %
Factor de concentración	4,00	5,56
Consumo de antiincrustante	48 kg/día	76,8 kg/día
Producción de permeado	600 m³/h	656 m³/h
Beneficio económico anual	—	US$ 227 833

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Es muy habitual, al operar plantas de ósmosis inversa, suponer que recuperar más agua siempre mejora el proceso. Lo cierto es que subir la recuperación altera a la vez la hidráulica, cuánto se concentran las sales, los índices de saturación, el gasto en químicos y el peligro de incrustación. Antes de decidir conviene una evaluación integral con balances de materia, modelado químico, simulación hidráulica y análisis económico; solo así la operación será segura, eficiente y sostenible en el largo plazo.

Caso de estudio 7.20

Optimización energética mediante la incorporación de un intercambiador isobárico de presión

Planteamiento del problema

Una desalinizadora de agua de mar con quince años de antigüedad recupera su energía con turbinas Pelton, un sistema convencional.

Con la electricidad tan encarecida, la operadora estudia reemplazar ese esquema por un intercambiador isobárico de presión de última generación, más moderno.

El ingeniero responsable debe determinar:

- la reducción esperada del consumo energético;
- el ahorro económico anual;
- el período de recuperación de la inversión;

- la conveniencia técnica de la modernización.

  Datos del proyecto

  Producción de permeado

  `80 000 m³/día`

  Recuperación

  `45 %`

  Presión de operación

  `66 bar`

  Sistema actual

  `Turbina Pelton`

  Eficiencia de recuperación actual

  `78 %`

  Sistema propuesto

  `Intercambiador isobárico`

  Eficiencia esperada

  `97 %`

  Consumo específico actual

  `4,20 kWh/m³`

  Consumo específico esperado

  `2,85 kWh/m³`

  Costo de la energía

  `US$0,12/kWh`

  Costo de inversión

  `US$3 600 000`

  Vida útil esperada

  `20 años`

Objetivo

Determinar si la sustitución del sistema de recuperación energética resulta técnica y económicamente conveniente.

Paso 1. Producción anual

Producción diaria

80 000 m^3/día

Producción anual

80 000×365 = 29200000 m^3/año

Esta producción constituye la base para todos los cálculos energéticos.

Paso 2. Consumo energético anual del sistema actual

Consumo específico

4,20 kWh/m^3

Consumo anual

29 200 000×4,20 = 122640000 kWh/año

Es decir,

aproximadamente

122,6 GWh/año

Paso 3. Consumo energético con el nuevo sistema

Consumo específico

2,85 kWh/m³

Consumo anual

29 200 000×2,8529 = 83220000 kWh/año

aproximadamente

83,2 GWh/año

Paso 4. Ahorro anual de energía

La energía ahorrada será

122 640 000−83 220 000 = 39420000 kWh/año

aproximadamente

39,4 GWh/año

Interpretación ingenieril

El ahorro de energía equivale, de manera aproximada, a lo que consumen en un año varios miles de viviendas, según el consumo medio de cada país.

Paso 5. Ahorro económico anual

Precio de la electricidad

`US$ 0,12/kWh`

Entonces,

39 420 000×0,1239 = $ 4730400/año

Paso 6. Período simple de recuperación

La inversión requerida es

`US$3 600 000`

Por tanto,

$$PRS=3\ 600\ 000 / 4\ 730\ 400 = 0{,}76 \text{ años}$$

es decir,

aproximadamente

`9 meses`

Interpretación ingenieril

El proyecto recupera completamente la inversión durante el primer año de operación.

Este resultado representa una excelente rentabilidad para un proyecto de modernización industrial.

Paso 7. Evaluación ambiental

Factor de emisión eléctrica

Supóngase:

`0,42 kg CO₂/kWh`

Reducción anual de emisiones

39 420 000×0,4239 = 16556400 kg CO_2/año

equivalente a

`16 556 toneladas de CO₂/año`

Interpretación

Además del ahorro económico,

la planta mejora significativamente su desempeño ambiental.

Paso 8. Evaluación técnica

Se comparan ambos sistemas.

Parámetro	Turbina Pelton	Intercambiador isobárico
Eficiencia	78 %	97 %
Consumo específico	4,20	2,85 kWh/m³
Componentes rotativos	Muchos	Muy pocos
Mantenimiento	Moderado	Bajo
Vida útil	Alta	Muy alta
Complejidad hidráulica	Media	Baja

Interpretación

El nuevo sistema presenta ventajas en prácticamente todos los indicadores técnicos.

Paso 9. Análisis de sensibilidad

Se analiza el efecto del costo de la electricidad sobre el período de recuperación.

Precio electricidad (US$/kWh)	Payback (años)
0,08	1,14
0,10	0,91
0,12	0,76
0,15	0,61
0,18	0,51

Interpretación ingenieril

Si el precio de la energía sigue subiendo, el cambio de sistema se vuelve todavía más atractivo en términos económicos, ya que el ahorro anual crece con cada alza de tarifa.

Paso 10. Riesgos del proyecto

Antes de ejecutar la modernización deben evaluarse los siguientes aspectos:

- compatibilidad hidráulica con la instalación existente;
- espacio disponible para el nuevo equipo;
- tiempo de parada de la planta;
- disponibilidad de repuestos;
- capacitación del personal de operación;
- integración con el sistema de control y automatización.

Una planificación adecuada reduce significativamente los riesgos asociados a la modernización.

Conclusiones

1. La sustitución de la turbina Pelton por un intercambiador isobárico reduce el consumo específico de energía en aproximadamente un **32 %**.
2. El ahorro anual de energía supera los **39 GWh**, lo que representa un beneficio económico superior a **US$4,7 millones por año**.
3. El período simple de recuperación es inferior a **un año**, lo que convierte la inversión en altamente rentable.
4. Gracias a la modernización, la planta emite menos dióxido de carbono y es más sostenible en lo ambiental.
5. Reemplazar el sistema de recuperación de energía es plenamente recomendable en lo técnico, lo económico y lo ambiental.

Tabla 7.55. Recuperación de energía con intercambiador isobárico. Caso 7.20

Variable	Sistema actual	Sistema modernizado
Producción	80 000 m³/día	80 000 m³/día
Consumo específico	4,20 kWh/m³	2,85 kWh/m³
Consumo anual	122,6 GWh	83,2 GWh
Ahorro anual	—	39,4 GWh
Ahorro económico	—	US$4,73 millones/año
Período de recuperación	—	0,76 años
Reducción de emisiones	—	16 556 t CO_2/año

Nota. Elaboración propia.

Lecciones aprendidas

Lo que enseña este caso es que la eficiencia energética es parte del diseño mismo de una planta de ósmosis inversa. Cambiar los equipos de recuperación de energía por otros más modernos rebaja la factura eléctrica, pero también hace más competitiva a la planta, disminuye los gases de efecto invernadero y hace más sostenible el proceso. Cuando se rehabilitan plantas ya existentes, analizar a la vez lo técnico, lo económico y lo ambiental da una base firme para decidir y para ordenar las inversiones que más impacto tendrán.

Caso de estudio 7.21

Rediseño integral de una planta de ósmosis inversa para incrementar la capacidad de producción

Planteamiento del problema

Hace diez años una empresa agroindustrial instaló una planta de ósmosis inversa para proveerse de agua de proceso.

Su producción se amplió, la demanda de agua subió con fuerza y la planta ya no alcanza para atender lo que ahora se requiere.

Se pide a la consultora una propuesta de optimización para aumentar la producción sin levantar una instalación nueva.

El ingeniero consultor debe evaluar distintas alternativas y escoger la que resulte más conveniente en lo técnico y en lo económico.

Datos de diseño originales

Caudal de alimentación

```
500 m³/h
```

Producción de permeado

```
350 m³/h
```

Recuperación

```
70 %
```

Número de trenes

```
2
```

Número de recipientes por tren

```
20
```

Elementos por recipiente

```
6
```

Membranas

```
8 pulgadas
```

Presión de operación

```
18 bar
```

Consumo específico

```
1,75 kWh/m³
```

Sistema de recuperación energética

`No posee`

Antigüedad

`10 años`

Nuevos requerimientos

Producción requerida

`450 m³/h`

Calidad del permeado

Sin modificaciones.

Disponibilidad anual

`95 %`

Vida útil esperada

`15 años`

Paso 1. Determinación del incremento requerido

Producción actual

`350 m³/h`

Producción requerida

`450 m³/h`

Incremento

$450 - 350 = 100\ m^3/h$

Incremento porcentual

$100350 \times 100 = 28{,}6\%$

Interpretación

La planta debe incrementar aproximadamente un **29 %** su capacidad de producción.

Paso 2. Diagnóstico de la instalación existente

La inspección técnica identifica:

- membranas con diez años de operación;
- aumento progresivo de la presión diferencial;

- disminución del flujo normalizado del 12 %;
- consumo específico superior al valor original;
- sistema de control obsoleto;
- ausencia de variadores de velocidad.

Conclusión

La pérdida de capacidad no se debe únicamente al aumento de la demanda.

También existe un deterioro progresivo del sistema.

Paso 3. Análisis de alternativas

Se plantean cuatro opciones.

Alternativa A

Incrementar la presión de operación.

Ventajas

- inversión reducida.

Desventajas

- mayor consumo energético;
- aceleración del fouling;
- menor vida útil de membranas.

Alternativa B

Reemplazar únicamente las membranas.

Ventajas

- recuperación parcial del rendimiento.

Desventajas

- no incrementa significativamente la capacidad instalada.

Alternativa C

Agregar un nuevo tren de membranas.

Ventajas

- mayor producción.

Desventajas

- elevada inversión;
- ampliación de infraestructura.

Alternativa D

Modernización integral.

Incluye:

- reemplazo de membranas;
- redistribución hidráulica;
- incorporación de un sistema de recuperación de energía;
- automatización del control;
- optimización del pretratamiento.

Esta alternativa ofrece el mayor potencial de mejora.

Paso 4. Verificación hidráulica

Se calcula el flujo específico por membrana.

Número total de elementos

$2 \times 20 \times 6 = 240$

Producción por membrana

$350 / 240 = 1{,}46\ m^3/h$

Nueva producción requerida

$450 / 240 = 1{,}88\ m^3/h$

Incremento del flujo por membrana

29%

Interpretación

Este incremento resulta excesivo para las membranas existentes.

Por tanto,

el simple aumento de presión no constituye una solución adecuada.

Paso 5. Evaluación del consumo energético

Consumo actual

350×1,75350 = 612,5 kWh/h

Consumo esperado sin modificaciones

450×1,75450 = 787,5kWh/h

Si se agrega además un sistema moderno de recuperación de energía, el consumo específico puede bajar hasta:

1,30 kWh/m³

Nuevo consumo

450×1,30450 = 585kWh/h

Interpretación

A pesar del incremento de producción, el consumo horario disminuye.

Este resultado demuestra la importancia de modernizar simultáneamente el sistema energético.

Paso 6. Evaluación económica

Se consideran los siguientes costos:

Concepto	Inversión (US$)
Nuevas membranas	180 000
Automatización	95 000
Sistema de recuperación energética	420 000
Modificaciones hidráulicas	160 000
Ingeniería y puesta en marcha	95 000

Inversión total

US$950 000

Paso 7. Beneficios

Incremento de producción anual

100×24×365 = 876000 m^3/año

Valor del agua producida

US$1,10/m³

Ingreso adicional

876000×1.10

US$963600/año

Ahorro energético anual

US$185000/año

Beneficio anual total

963600+185000 = US$1148600/año

Paso 8. Período simple de recuperación

950000 / 114860 = 0,83años

aproximadamente

10 meses

Paso 9. Evaluación técnica

Tabla 7.56

Comparación de alternativas para incrementar la capacidad de una planta de ósmosis inversa.

Alternativa	Producción	Energía	Inversión	Recomendación
Incrementar presión	Media	Alta	Baja	No recomendable
Cambiar membranas	Media	Media	Media	Parcial
Nuevo tren	Alta	Alta	Muy alta	Condicional
Modernización integral	Alta	Baja	Alta	Recomendada

Nota. Elaboración propia.

Paso 10. Plan de implementación

Se propone ejecutar el proyecto en cinco fases.

Fase 1

Caracterización detallada del agua.

Fase 2

Modelado hidráulico mediante software especializado.

Fase 3

Instalación de nuevos equipos.

Fase 4

Puesta en marcha y pruebas de aceptación.

Fase 5

Seguimiento operacional durante seis meses.

Este enfoque minimiza los riesgos y facilita la validación del desempeño de la planta.

Conclusiones

1. La capacidad requerida puede alcanzarse sin construir una nueva planta mediante una modernización integral.
2. Cambiar las membranas, optimizar la hidráulica e incorporar recuperación de energía, todo a la vez, permite producir más y reducir el consumo específico.
3. El proyecto resulta muy rentable, pues la inversión se recupera, en un período simple, en menos de doce meses.
4. Gracias a la automatización y al monitoreo continuo, la operación es más confiable y las fallas son menos probables.
5. Una evaluación que integre lo técnico, lo económico y lo energético es la base para decidir con solidez en proyectos de ampliación.

Tabla 7.57

Resultados de la modernización de una planta de ósmosis inversa. Caso de estudio 7.21

Parámetro	Situación inicial	Situación optimizada
Producción	350 m³/h	450 m³/h
Recuperación	70 %	70 %
Consumo específico	1,75 kWh/m³	1,30 kWh/m³
Producción anual	3 066 000 m³	3 942 000 m³
Beneficio anual	—	US$ 1 148 600
Período de recuperación	—	0,83 años

Nota. Elaboración propia.

Reflexión ingenieril

Cuando se amplía una planta de ósmosis inversa, casi nunca resulta lo más eficiente subir la presión de operación sin más o cambiar equipos uno por uno. Según la experiencia industrial, el mayor beneficio llega con una optimización integral: membranas renovadas, hidráulica rediseñada, automatización avanzada, mantenimiento predictivo y recuperación de energía. Si se mira el sistema completo, se obtiene la máxima capacidad de producción con el menor gasto de energía, y la instalación se mantiene sostenible técnica y económicamente mientras dure.

Caso de estudio 7.22

Diseño conceptual de una planta desalinizadora de agua de mar de 100 000 m³/día mediante ósmosis inversa

Planteamiento del problema

En una ciudad costera la población crece de manera sostenida y el agua dulce disponible disminuye poco a poco, por la sobreexplotación de los acuíferos y la variabilidad climática.

La autoridad responsable del abastecimiento de agua solicita el diseño conceptual de una planta desalinizadora mediante ósmosis inversa con una capacidad de producción de **100 000 m³/día** de agua potable.

El equipo de ingeniería deberá definir:

- capacidad de captación;
- recuperación óptima;
- número de trenes;
- configuración de membranas;
- sistema de recuperación de energía;
- consumo energético;
- costos preliminares de inversión y operación;
- evaluación económica.

Objetivos del diseño

El proyecto debe cumplir simultáneamente los siguientes criterios:

- producción continua de agua potable;
- disponibilidad superior al 95 %;
- consumo específico inferior a 3 kWh/m³;
- vida útil de diseño de 25 años;
- posibilidad de ampliación futura.

Datos del agua de alimentación

Origen

Agua de mar

Temperatura promedio

23 °C

Conductividad

53 000 µS/cm

Salinidad

35 g/L

pH

8,1

SDI después del pretratamiento

<3

Paso 1. Determinación del caudal de alimentación

Producción requerida

$$Qp = 100\,000\,m^3/día$$

Se adopta una recuperación inicial del 45 %

Entonces,

$$Qa = Qp / 0.45 = 222222\ m^3/día$$

Caudal de rechazo

$$Qc = 222\,222 - 100\,000 = 122222 m^3/día$$

Interpretación ingenieril

Una recuperación del **45 %** representa actualmente un valor ampliamente utilizado en plantas SWRO de gran capacidad, ya que permite mantener un adecuado equilibrio entre producción de agua y control del scaling.

Paso 2. Selección del sistema de captación

Se evalúan dos alternativas.

Alternativa A. Captación abierta

Ventajas

- menor inversión inicial;
- construcción relativamente sencilla.

Desventajas

- mayor variabilidad de calidad;
- mayor contenido de organismos marinos;
- mayor riesgo de biofouling.

Alternativa B. Captación mediante pozos de playa

Ventajas

- excelente calidad del agua;
- menor SDI;
- menor contenido microbiológico;
- reducción del consumo de productos químicos.

Desventajas

- limitada por la geología local;
- mayor costo de perforación.

Selección

Para este caso se selecciona una **captación abierta** con rejillas de baja velocidad de aproximación y un sistema de pretratamiento robusto, debido al elevado caudal requerido.

Paso 3. Selección del pretratamiento

Se propone la siguiente secuencia:

1. Rejas gruesas.
2. Tamices automáticos.
3. Coagulación.
4. Floculación.
5. Flotación por aire disuelto (DAF).
6. Filtración multimedia.
7. Ultrafiltración.
8. Dosificación de antiincrustante.
9. Decloración con bisulfito de sodio.

10. Filtración de seguridad (cartuchos de 5 µm).

Justificación

La incorporación de ultrafiltración proporciona:

- SDI bajo;
- menor biofouling;
- mayor vida útil de membranas;
- menor frecuencia de CIP.

Paso 4. Selección de membranas

Se seleccionan membranas de agua de mar de alta productividad.

Características generales:

- diámetro nominal: **8 pulgadas**;
- longitud: **40 pulgadas**;
- rechazo de sales superior al **99,7 %**;
- presión máxima de operación: **83 bar**;
- elevada resistencia química.

La configuración preliminar adoptada es:

```
7 elementos por recipiente
```

Paso 5. Configuración hidráulica

Producción por tren:

```
20 000 m³/día
```

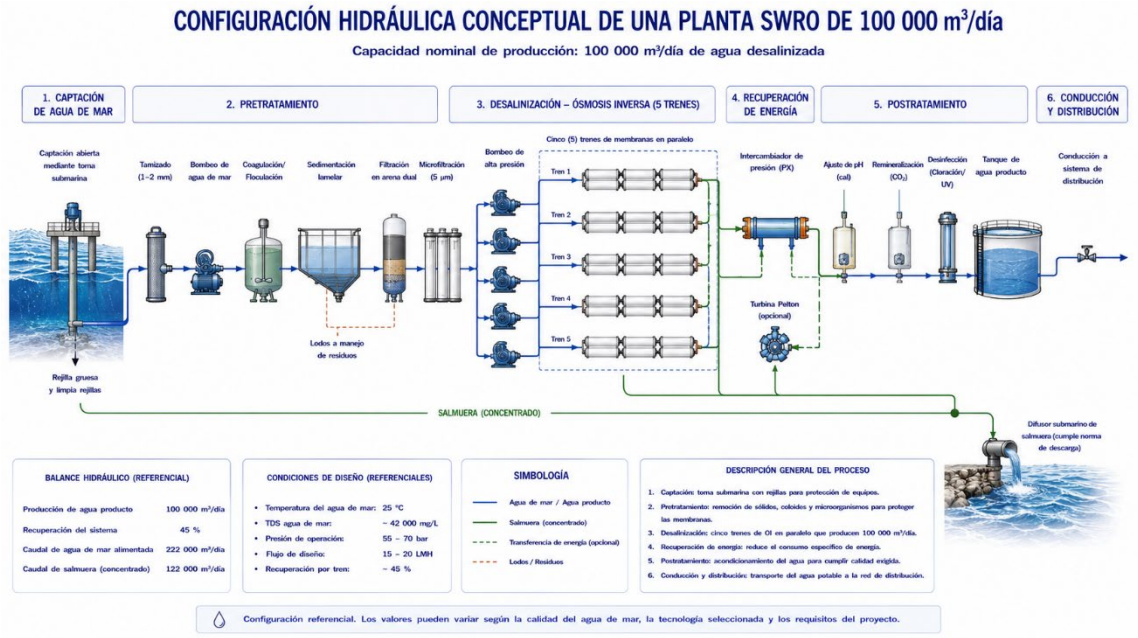
Número de trenes:

100000 / 20000 = 5

Se agregará también un tren de reserva parcial, de modo que el mantenimiento no interrumpa la producción.

Figura 7.34

Configuración hidráulica conceptual de una planta SWRO de 100 000 m³/día.



Nota. Elaboración propia.

Paso 6. Selección del sistema de recuperación energética

Se comparan tres alternativas.

Tecnología	Eficiencia
Turbina Pelton	80 %
Turbocharger	88 %
Intercambiador isobárico	97 %

Se seleccionan **intercambiadores isobáricos de presión** debido a:

- máxima eficiencia;
- bajo mantenimiento;
- menor consumo específico.

Paso 7. Consumo energético

Se adopta:

$$SEC = 2{,}8 \text{ kWh/m}^3$$

Consumo diario

$100000 \times 2.8100000 = 280000$ kWh/día

Consumo anual

$280000 \times 365 = 102200000$ kWh/año

Paso 8. Estimación preliminar del CAPEX

Concepto	Costo estimado (millones US$)
Captación	18
Pretratamiento	24
Sistema RO	48
Recuperación de energía	12
Postratamiento	8
Obras civiles	32
Ingeniería y supervisión	10
Contingencias	18

CAPEX total estimado

US$170 millones

Paso 9. Estimación del OPEX anual

Concepto	Millones US$/año
Energía	12,3
Productos químicos	2,6
Reposición de membranas	1,8
Personal	2,2
Mantenimiento	2,1
Otros	1,5

OPEX anual aproximado

US$22,5 millones/año

Paso 10. Costo unitario del agua

Producción anual

36500000 m^3/año

Costo operativo unitario

$22.5\times10^6 / 36.5\times10^6 = 0.62$ US$/$m^3$

Al sumar la amortización del CAPEX, lo que costará el agua tratada en total variará con el financiamiento, con el plazo de amortización, con la tasa de descuento y con el precio local de la energía.

Paso 11. Evaluación ambiental

Se identifican los principales aspectos ambientales:

Impactos potenciales

- captación de organismos marinos;

- descarga del concentrado;
- consumo energético;
- emisiones indirectas de CO_2;
- generación de residuos químicos.

Medidas de mitigación

- captaciones con baja velocidad de aproximación;
- difusores para la descarga de salmuera;
- recuperación de energía;
- integración con energía solar o eólica;
- monitoreo continuo de la calidad del efluente.

Tabla 7.58

Resumen del diseño conceptual de una planta desalinizadora SWRO

Parámetro	**Valor**
Producción	100 000 m³/día
Recuperación	45 %
Alimentación	222 222 m³/día
Rechazo	122 222 m³/día
Número de trenes	5
Sistema ERD	Intercambiador isobárico
Consumo específico	2,8 kWh/m³
CAPEX estimado	US$170 millones
OPEX anual	US$22,5 millones

Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

1. La capacidad requerida puede alcanzarse mediante una configuración de cinco trenes de ósmosis inversa con recuperación del 45 %.
2. La combinación de ultrafiltración como pretratamiento e intercambiadores isobáricos permite mantener un consumo específico cercano a **2,8 kWh/m³**, compatible con las mejores prácticas internacionales.
3. Tanto el CAPEX estimado como el OPEX anual dejan ver que la energía sigue pesando más que cualquier otro rubro operativo; de ahí que convenga instalar recuperación de energía de alta eficiencia.

4. Se diseñó con redundancia, flexibilidad operativa y espacio para crecer más adelante, y eso favorece que la planta esté disponible casi siempre.
5. Desde la fase conceptual debe incluirse el análisis ambiental, sobre todo respecto de cómo se capta el agua de mar, cómo se descarga la salmuera y cómo se recorta la huella de carbono apelando a energías renovables.

Reflexión ingenieril

Concebir una desalinizadora no es solo elegir membranas ni bombas de alta presión; hay que combinar la hidráulica con la termodinámica, la química del agua, la ingeniería de procesos, el análisis económico, la sostenibilidad ambiental y la gestión del riesgo. Lo que se defina temprano, como la recuperación de diseño o el tipo de captación, marcará por décadas el gasto de energía, la frecuencia con que se limpia, la vida de las membranas y el costo del agua. Por tanto, el enfoque debe ser multidisciplinario y valerse de simulación, análisis de sensibilidad y evaluación económica de ciclo de vida.

Caso de estudio 7.23

Diseño completo de una planta de ósmosis inversa para tratamiento de agua salobre (BWRO)

Planteamiento del problema

Una empresa minera en la costa del Perú cuenta con un pozo cuya agua tiene una salinidad moderadamente alta, que impide usarla directamente en procesos industriales.

Mediante ósmosis inversa se producirá un agua de calidad elevada, que se destinará a:

- calderas;
- sistemas de enfriamiento;
- preparación de reactivos;
- agua de servicios.

Se solicita desarrollar el diseño conceptual de la planta.

Objetivos del diseño

La planta deberá satisfacer simultáneamente los siguientes requisitos.

Producción

25 000 m^3/día

Recuperación mínima

80 %

Disponibilidad

97 %

Conductividad del permeado

<80 µS/cm

Vida útil

25 años

Caracterización del agua

Parámetro	Valor
Conductividad	5 200 µS/cm
SDT	3 350 mg/L
pH	7,6
Calcio	125 mg/L
Magnesio	48 mg/L
Sodio	760 mg/L
Cloruros	1 420 mg/L
Sulfatos	420 mg/L
Sílice	17 mg/L
Hierro	0,08 mg/L
Turbidez	2,4 NTU
SDI	4,1

Paso 1. Determinación del caudal de alimentación

Producción requerida

$$Qp = 25\,000\ m^3/día$$

Recuperación adoptada

80 %

Por tanto,

$$Qa = 25\,000 / 0.80$$

$$Qa = 31\,250\ m3/día$$

Rechazo

$$Qc = 31\,250 - 25\,000 = 6\,250\ m^3/día$$

Interpretación ingenieril

Las plantas BWRO suelen trabajar con recuperaciones más altas que las de agua de mar, porque el agua de alimentación tiene una presión osmótica menor.

Paso 2. Selección del pretratamiento

El análisis del agua muestra:

- SDI relativamente elevado
- presencia de hierro
- dureza moderadamente alta

Por tanto, se propone:

1. Aireación
2. Oxidación del hierro
3. Filtración multimedia
4. Cartuchos de 5 µm
5. Dosificación de antiincrustante

No resulta necesario instalar ultrafiltración debido a la buena calidad inicial del agua.

Paso 3. Selección de membranas

Se seleccionan membranas BWRO de alta productividad.

Características:

Diámetro

```
8 pulgadas
```

Longitud

```
40 pulgadas
```

Rechazo nominal

```
99,5 %
```

Flujo máximo recomendado

```
37 m³/día
```

Presión máxima

```
41 bar
```

Paso 4. Presión de operación

Mediante simulación hidráulica se obtiene:

Presión requerida

```
15 bar
```

Esta presión es significativamente menor que la requerida en agua de mar.

Consecuentemente:

- menor consumo energético;
- menor esfuerzo mecánico;
- mayor vida útil de membranas.

Paso 5. Número de trenes

Se seleccionan

```
4 trenes
```

Cada uno produce

25 0004=6 250 m3/día

Cada tren puede salir temporalmente de servicio sin detener completamente la planta.

Paso 6. Configuración hidráulica

Cada tren contiene

```
2 etapas
```

Relación:

```
2: 1
```

Es decir

Primera etapa

```
40 recipientes
```

Segunda etapa

```
20 recipientes
```

Cada recipiente contiene

```
6 elementos
```

Número total de membranas

4×60×6=14404 \times 60 \times 6 = 14404×60×6=1440

Justificación

La configuración **2:1** permite mantener velocidades hidráulicas adecuadas y controlar el incremento de concentración en la segunda etapa.

Paso 7. Evaluación energética

Consumo específico esperado

`1,15 kWh/m³`

Consumo diario

25 000×1,15=28 750 kWh/día

Consumo anual

28 750×365=10 493 750 kWh/año aproximadamente

`10,5 GWh/año`

Paso 8. Evaluación del scaling

Se calculan los índices.

Índice	Valor
LSI	0,38
RSI	6,1
S&DSI	0,25

Interpretación

Existe:

- riesgo moderado de carbonato de calcio;
- bajo riesgo de sulfatos.

Por tanto,

se recomienda:

- dosificación continua de antiincrustante;
- monitoreo semanal del LSI;
- limpieza preventiva.

Paso 9. Sistema CIP

Se diseña un sistema compuesto por

- tanque de preparación;
- bomba de recirculación;
- calentador;
- filtros;
- instrumentación.

Volumen requerido

7 m^3

Temperatura máxima

35 °C

Velocidad de circulación

Es lo que indican los fabricantes, a fin de no dañar las membranas por exceso de cizallamiento y limpiar con efectividad.

Paso 10. Automatización

El sistema SCADA deberá monitorear continuamente:

- caudal;
- presión;
- conductividad;
- recuperación;
- SDI;
- consumo energético;
- presión diferencial;
- temperatura;
- nivel de productos químicos.

Además,

el software calculará automáticamente:

- flujo normalizado;
- rechazo normalizado;
- consumo específico;

- eficiencia energética.

Paso 11. Estimación del CAPEX

Concepto	Millones US$
Pozos	1,8
Pretratamiento	2,9
Sistema RO	6,8
Bombas	1,4
Sistema CIP	0,8
Automatización	0,9
Obras civiles	3,5
Ingeniería	1,3

CAPEX aproximado

US$19,4 millones

Paso 12. Estimación del OPEX

Concepto	Millones US$/año
Energía	1,25
Productos químicos	0,42
Membranas	0,31
Personal	0,54
Mantenimiento	0,47
Otros	0,26

OPEX anual

US$3,25 millones

Paso 13. Costo del agua

Producción anual

$25\,000 \times 365 = 9\,125\,000\ m^3$

Costo operativo

$3{,}25 \times 10^6 / 9{,}125 \times 10^6 = 0{,}36$ US$/m3

Paso 14. Análisis de sensibilidad

Se estudia la influencia del precio de la energía.

Precio electricidad (US$/kWh)	Costo del agua (US$/m³)
0,08	0,31
0,10	0,34
0,12	0,36

Precio electricidad (US$/kWh)	Costo del agua (US$/m³)
0,15	0,40
0,18	0,44

Interpretación ingenieril

La energía sigue siendo el componente que domina el costo operativo. En las plantas BWRO, no obstante, pesa bastante menos que en las SWRO, pues las presiones de operación son menores.

Paso 15. Evaluación de riesgos

Se identifican los siguientes riesgos técnicos:

Tabla 7.59

Matriz de riesgos técnicos para una planta BWRO de 25 000 m³/día.

Riesgo	Probabilidad	Impacto	Medida de mitigación
Fouling coloidal	Media	Alto	Optimizar filtración y controlar SDI
Scaling por $CaCO_3$	Media	Alto	Dosificación de antiincrustante y seguimiento del LSI
Biofouling	Baja	Medio	Monitoreo microbiológico y limpiezas preventivas
Fallas de bombas	Baja	Alto	Redundancia N+1 y mantenimiento preventivo
Interrupción del suministro eléctrico	Media	Alto	Grupo electrógeno y sistema UPS para control

Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

1. Una recuperación del **80 %** es técnicamente viable para el agua salobre analizada, siempre que se controle el potencial de incrustación mediante un programa adecuado de dosificación de antincrustantes y monitoreo de índices de saturación.
2. La configuración hidráulica de **dos etapas con relación 2:1** proporciona un equilibrio adecuado entre recuperación, pérdidas de carga y distribución del flujo.
3. El consumo específico estimado de **1,15 kWh/m³** sitúa a la planta dentro de los valores de referencia para sistemas BWRO de alta eficiencia.
4. El costo operativo aproximado de **US$ 0,36/m³** evidencia la competitividad de esta tecnología para aplicaciones industriales y mineras.
5. Con un sistema SCADA que use indicadores normalizados y mantenimiento predictivo, la planta gana confiabilidad operacional y se detectan antes las desviaciones.

Reflexión ingenieril

En el diseño de plantas BWRO hay que buscar un equilibrio: recuperar lo más posible, pero controlando el ensuciamiento y la incrustación. Pese a que las presiones de operación son mucho más bajas que en las SWRO, siguen siendo decisivos el pretratamiento optimizado, las membranas bien seleccionadas y la automatización para que la planta responda con confiabilidad durante toda su vida útil.

Caso de estudio 7.24

Diseño de una planta de reúso que trata aguas residuales con UF y ósmosis inversa (UF-RO)

Planteamiento del problema

Una empresa del sector petroquímico genera aproximadamente **30 000 m³/día** de aguas residuales tratadas mediante un sistema biológico de lodos activados.

Aunque el efluente cumple los límites máximos permisibles de descarga, la empresa quiere reutilizar una parte del agua y así consumir menos agua fresca de fuentes superficiales.

Se solicita diseñar una planta avanzada de tratamiento que produzca agua apta para:

- torres de enfriamiento;
- generación de vapor;
- agua de proceso;
- servicios industriales.

El proyecto debe considerar criterios de confiabilidad, eficiencia energética y sostenibilidad ambiental.

Objetivos del diseño

La planta deberá cumplir las siguientes condiciones:

Producción de agua reutilizada

`20 000 m³/día`

Recuperación global mínima

`85 %`

Conductividad del agua producto

```
< 50 µS/cm
```

Carbono orgánico total (TOC)

```
< 0,5 mg/L
```

Disponibilidad anual

```
97 %
```

Vida útil de diseño

```
25 años
```

Caracterización del efluente secundario

Parámetro	Valor
Caudal	30 000 m³/día
pH	7,2
Conductividad	1 650 µS/cm
DBO_5	8 mg/L
DQO	35 mg/L
TOC	9 mg/L
Turbidez	3 NTU
SST	5 mg/L
Sílice	12 mg/L
SDI	5,8

Interpretación ingenieril

La carga orgánica bajó mucho con el tratamiento biológico. Aun así, el efluente conserva un SDI alto y materia orgánica capaz de ensuciar las membranas de ósmosis inversa.

Paso 1. Selección del esquema de tratamiento

Se evaluaron tres alternativas.

Alternativa A

Filtración multimedia + RO.

Ventajas

- Menor inversión inicial.

Desventajas

- Mayor riesgo de fouling.
- Vida útil más corta de las membranas.

Alternativa B

Ultrafiltración + RO.

Ventajas

- Excelente protección de las membranas.
- Menor SDI.
- Mayor estabilidad operacional.

Alternativa C

Microfiltración + UF + RO.

Ventajas

- Máxima seguridad.

Desventajas

- Mayor costo de inversión.

Alternativa seleccionada

Se adopta la configuración:

Tratamiento biológico → Ultrafiltración → Ósmosis inversa → Oxidación UV/H_2O_2 → Almacenamiento

Esta alternativa ofrece un equilibrio adecuado entre confiabilidad, calidad del agua y costos.

Paso 2. Balance de caudales

Caudal de alimentación

$$Qa = 30\,000\ m^3/día$$

Recuperación de la ultrafiltración

95 %

Producción de UF

$30\,000 \times 0{,}95 = 28\,500\ m^3/día$

Recuperación de la ósmosis inversa

85 %

Producción de RO

$28\,500 \times 0{,}85 = 24\,225\ m^3/día$

La producción supera el requerimiento de diseño y permite disponer de un margen operativo.

Paso 3. Diseño de la ultrafiltración

Se seleccionan módulos de fibra hueca de PVDF.

Parámetros de diseño:

Flujo de diseño

```
60 L/m²·h
```

Recuperación

```
95 %
```

Frecuencia de retrolavado

```
30 minutos
```

Limpieza química (CEB)

```
Cada 24 horas
```

Limpieza CIP

```
Cada 2 a 3 meses
```

Justificación

Tras la ultrafiltración el SDI queda por debajo de 3, de modo que el fouling en la ósmosis inversa se vuelve mucho menos probable.

Paso 4. Diseño del sistema de ósmosis inversa

Se seleccionan membranas BWRO de baja presión.

Configuración:

```
Dos etapas (2:1)
```

Recuperación

```
85 %
```

Presión de operación

```
12 bar
```

Rechazo de sales

```
99,5 %
```

Consumo específico

0,95 kWh/m³

Paso 5. Oxidación avanzada

A la salida de la ósmosis inversa hay un proceso de oxidación avanzada, que emplea radiación ultravioleta junto con peróxido de hidrógeno.

Los objetivos son:

- reducir compuestos orgánicos traza;
- degradar contaminantes emergentes;
- disminuir el carbono orgánico residual;
- mejorar la seguridad microbiológica.

Parámetros de diseño

Dosis UV

800 mJ/cm²

Peróxido de hidrógeno

5–10 mg/L

Será preciso afinar estos valores en pruebas piloto, según la calidad propia del agua y las metas del tratamiento.

Paso 6. Sistema de control

El SCADA integrará:

- caudalímetros electromagnéticos;
- medidores de presión;
- conductivímetros;
- analizadores de TOC;
- medidores de SDI;
- sensores de turbidez;
- medidores de pH;
- analizadores de ORP;
- medidores de consumo energético.

Además, calculará automáticamente:

- flujo normalizado;
- recuperación;
- rechazo de sales;
- consumo específico;
- tendencia al fouling.

Paso 7. Evaluación energética

Consumo específico global

`1,20 kWh/m³`

Producción diaria

20 000 m^3/día

Consumo diario

20 000×1,20=24 000 kWh/día

Consumo anual

24 000×365=8 760 000 kWh/año

Paso 8. Estimación preliminar del CAPEX

Concepto	Millones US$
Ultrafiltración	5,2
Ósmosis inversa	6,8
Oxidación avanzada	2,9
Bombas e instrumentación	1,8
Obras civiles	4,6
Automatización	1,2
Ingeniería y supervisión	2,0
Contingencias	2,5

CAPEX estimado

US$ 27,0 millones

Paso 9. Estimación del OPEX

Concepto	Millones US$/año
Energía	1,10
Productos químicos	0,85
Reposición de membranas	0,42
Reposición de lámparas UV	0,18

Concepto	Millones US$/año
Personal	0,65
Mantenimiento	0,55
Otros	0,30

OPEX anual

US$ 4,05 millones

Paso 10. Costo del agua reutilizada

Producción anual

20 000×365=7 300 000 m3/año

Costo operativo

$4{,}05\times10^{6}$ / $7{,}30\times10^{6}$=0,55 US$/m3

La cifra anterior aún no da el costo total del agua producida: falta sumarle el CAPEX anualizado.

Paso 11. Evaluación ambiental

Beneficios

- reducción de la extracción de agua dulce;
- disminución de las descargas al cuerpo receptor;
- menor presión sobre los recursos hídricos;
- contribución a la economía circular.

Riesgos

- gestión del concentrado de la RO;
- manejo seguro de productos químicos;
- consumo energético;
- disposición de membranas fuera de servicio.

Medidas de mitigación

- plan de gestión del concentrado;
- monitoreo continuo de la calidad del agua;
- optimización energética;
- programas de mantenimiento preventivo.

Tabla 7.60

Resumen del diseño conceptual de la planta de reúso industrial UF-RO

Parámetro	Valor
Producción de agua reutilizada	20 000 m³/día
Recuperación global	85 % (RO) con UF previa al proceso
Consumo específico	1,20 kWh/m³
CAPEX estimado	US$ 27,0 millones
OPEX anual	US$ 4,05 millones
Costo operativo del agua	US$ 0,55/m³

Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

1. Al unir ultrafiltración y ósmosis inversa resulta un agua de excelente calidad para usos industriales exigentes; además se ensucian menos las membranas y la operación es más confiable.
2. Al incorporar un proceso de oxidación avanzada, el agua reutilizada resulta más segura, porque se reducen los compuestos orgánicos persistentes y los contaminantes emergentes.
3. El consumo específico estimado de **1,20 kWh/m³** sitúa al sistema dentro de los rangos de referencia para plantas de reúso industrial con membranas.
4. Reutilizar los efluentes tratados reduce lo que se demanda de agua fresca y, bajo una lógica de economía circular, el complejo industrial resulta más sostenible.
5. Antes de dar por bueno el diseño, se necesitan pruebas piloto y un estudio minucioso de la composición del efluente, prestando atención especial al potencial de fouling y scaling y al destino del concentrado de la ósmosis inversa.

Reflexión ingenieril

Reutilizar aguas residuales tratadas es de las estrategias más prometedoras contra el estrés hídrico que sufre la industria. Combinando tratamiento biológico, ultrafiltración, ósmosis inversa y oxidación avanzada se logra agua de gran calidad; eso sí, el pretratamiento debe estar muy bien diseñado, las membranas vigiladas sin pausa y el concentrado manejado con responsabilidad. Desde la ingeniería química y la ingeniería del agua, son un buen ejemplo de innovación que suma eficiencia operativa, cuidado ambiental y seguridad en el abastecimiento.

Caso de estudio 7.25

Diseño de un sistema Zero Liquid Discharge (ZLD) para una planta industrial

Planteamiento del problema

Una planta química genera aproximadamente **12 000 m³/día** de efluentes industriales con elevada concentración de sales disueltas.

La empresa debe poner fin a toda descarga líquida al ambiente, pues así lo imponen las nuevas exigencias ambientales.

Se propone implementar un sistema **Zero Liquid Discharge (ZLD)** que permita:

- recuperar la mayor cantidad posible de agua;
- concentrar progresivamente las sales;
- producir residuos sólidos cristalizados para su disposición o valorización.

El equipo de ingeniería deberá desarrollar el diseño conceptual del sistema.

Objetivos del diseño

El sistema deberá cumplir los siguientes requisitos:

Recuperación global de agua

`≥95 %`

Descarga líquida

`0 m³/día`

Disponibilidad

`95 %`

Vida útil

`25 años`

Operación continua

`24 horas/día`

Caracterización del efluente

Parámetro	Valor
Caudal	12 000 m³/día
Conductividad	32 000 µS/cm
SDT	21 g/L
pH	7,5

Parámetro	Valor
Sílice	45 mg/L
Calcio	310 mg/L
Sulfatos	1 650 mg/L
Cloruros	7 500 mg/L
DQO	70 mg/L

Interpretación ingenieril

Con una salinidad tan elevada, una sola etapa de ósmosis inversa no es viable para el tratamiento.

Será necesario incorporar procesos térmicos para alcanzar la descarga líquida cero.

Paso 1. Selección del esquema de proceso

Se analizan tres alternativas.

Alternativa A

Evaporación completa.

Ventajas

- alta recuperación.

Desventajas

- enorme consumo energético.

Alternativa B

Ósmosis inversa seguida de evaporación.

Ventajas

- reducción importante del consumo de vapor.

Alternativa C

Ósmosis inversa + concentrador de salmuera + cristalizador.

Ventajas

- máxima recuperación;
- menor consumo energético global;
- recuperación de sales.

Alternativa seleccionada

Se adopta la siguiente secuencia:

```
Pretratamiento → Ósmosis inversa → Concentrador de salmuera → Cristalizador → Filtro de cristales
```

Paso 2. Balance de agua

Caudal inicial

$$Qa = 12\,000\,m^3/día$$

Recuperación en RO

```
80 %
```

Permeado

$12\,000 \times 0.80 = 9\,600\,m^3/día$

Concentrado

$2\,400\,m^3/día$

Concentrador de salmuera

Recuperación

```
75 %
```

Agua recuperada

$2\,400 \times 0.75 = 1\,800\ m^3/día$

Concentrado

$600\,m^3/día$

Cristalizador

Toda el agua remanente es evaporada.

Agua recuperada

$600\,m^3/día$

Sales sólidas

```
Producción continua
```

Recuperación global

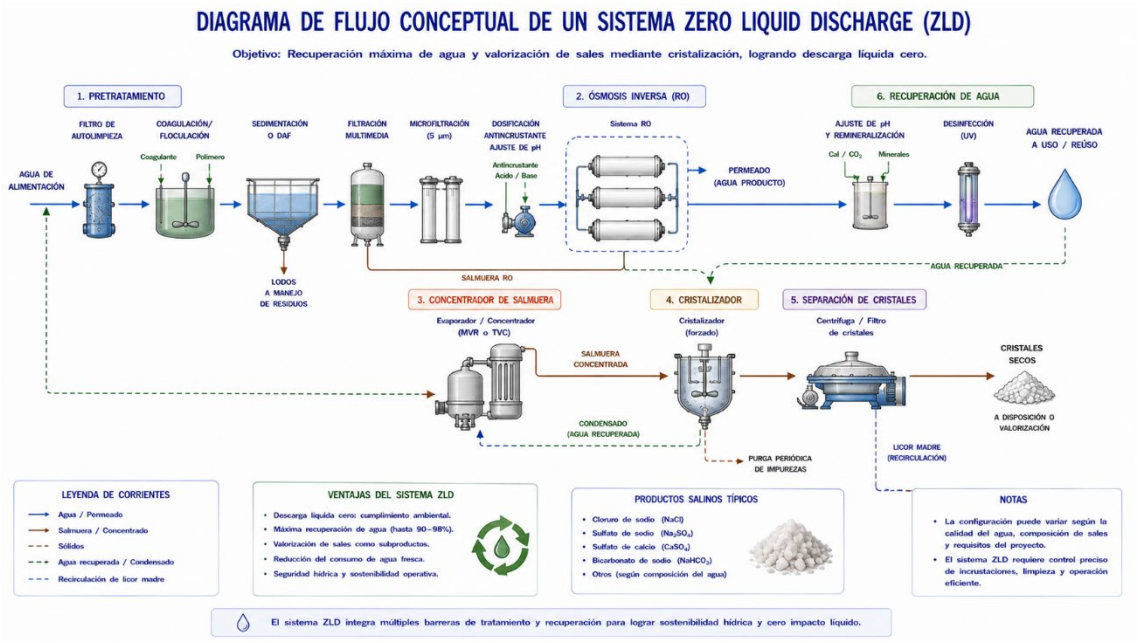
Agua recuperada

$9\,600+1\,800+600=12\,0009\backslash,600 + 1\backslash,800 + 600 = 12\backslash,0009600+1800+600=12000$

En la práctica, las pérdidas se reducen a la humedad residual de los cristales y a purgas menores, así que el sistema se acerca a recuperar toda el agua.

Figura 7.35

Esquema conceptual de flujo para Zero Liquid Discharge (ZLD): tras el pretratamiento vienen la ósmosis inversa, el concentrador de salmuera y el cristalizador; después se separan los cristales y el agua recuperada se recircula.



Nota**.** Elaboración propia.

Paso 3. Diseño del sistema de ósmosis inversa

Presión de operación

```
28 bar
```

Recuperación

```
80 %
```

Consumo específico

```
1,9 kWh/m³
```

Número de trenes

```
3
```

Paso 4. Concentrador de salmuera

El concentrador incrementa la concentración salina mediante evaporación al vacío.

Características principales:

Temperatura de operación

```
60–75 °C
```

Presión

```
Vacío parcial
```

Tecnología

```
Evaporación de múltiple efecto (MEE)
```

La utilización de múltiples efectos reduce significativamente el consumo de vapor.

Paso 5. Cristalizador

El cristalizador tiene como finalidad producir sales sólidas mediante evaporación final.

Tipos disponibles:

- circulación forzada;
- película descendente;
- cristalizador DTB (Draft Tube Baffle).

El proyecto emplea un cristalizador de circulación forzada, que resiste bien los efluentes con muchos sólidos.

Paso 6. Producción de sales

Concentración media de sólidos

```
21 kg/m³
```

Producción diaria

12 000×21=252 000 kg/día

Producción

```
252 toneladas/día
```

Habrá que caracterizar estas sales para saber si pueden valorizarse o si deben enviarse a un relleno de seguridad.

Paso 7. Evaluación energética

Consumo específico estimado

Etapa	kWh/m³ de alimentación
Ósmosis inversa	1,9
Concentrador	7,5
Cristalizador	11,0

Consumo global

`20,4 kWh/m³`

Interpretación ingenieril

La mayor parte de la energía se va en los procesos térmicos; por eso se justifica instalar recuperación de calor y optimizar el uso de energía.

Paso 8. Estimación del CAPEX

Concepto	Millones US$
Pretratamiento	6
Ósmosis inversa	11
Concentrador	20
Cristalizador	24
Manejo de sólidos	6
Automatización	4
Obras civiles	11
Ingeniería	6

CAPEX estimado

US$88 millones

Paso 9. Estimación del OPEX

Concepto	Millones US$/año
Energía	12,5
Vapor	6,8
Productos químicos	1,6
Membranas	0,9
Personal	1,8
Mantenimiento	2,3
Otros	1,2

OPEX anual

US$27,1 millones

Paso 10. Economía circular

El proyecto permite:

- recuperar prácticamente toda el agua del proceso;

- disminuir la captación de agua fresca;
- reducir las descargas líquidas;
- recuperar determinadas sales cuando exista un mercado para ellas;
- minimizar el impacto ambiental de la operación.

Que las sales puedan valorizarse dependerá de su composición química, su pureza y la demanda industrial.

Paso 11. Evaluación de riesgos

Tabla 7.61

Matriz de riesgos para un sistema Zero Liquid Discharge.

Riesgo	Probabilidad	Impacto	Medidas de mitigación
Scaling en RO	Media	Alto	Antincrustantes y control de recuperación
Incrustación en evaporadores	Alta	Alto	Limpiezas químicas y control de sobresaturación
Corrosión	Media	Alto	Selección adecuada de materiales
Ensuciamiento del cristalizador	Media	Medio	Control de sólidos y purgas
Alto consumo energético	Alta	Alto	Integración térmica y recuperación de calor

Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

1. Gracias a la ósmosis inversa, a la concentración de salmuera y a la cristalización se logra descargar cero líquido, pues casi toda el agua del efluente se recupera.
2. Se depende bastante menos de fuentes de agua externas, y la instalación industrial resiste mejor las crisis hídricas.
3. Son los procesos térmicos los que más aportan a la energía consumida y al costo de operación; la viabilidad económica depende, entonces, de integrar el calor y optimizar el sistema.
4. Conviene considerar las sales cristalizadas ya en la etapa conceptual del diseño y analizar si pueden valorizarse, siempre que su composición y pureza lo permitan.
5. En industrias situadas donde los recursos hídricos están muy presionados, o que enfrentan normas ambientales severas, los sistemas ZLD son una solución estratégica.

Reflexión ingenieril

Los sistemas **Zero Liquid Discharge** representan la evolución de la ingeniería del agua hacia modelos de economía circular y sostenibilidad. Su diseño exige integrar operaciones de separación por membranas, procesos térmicos, cristalización, análisis energético y gestión de residuos sólidos. Aunque la inversión inicial y el consumo energético son superiores a los de una planta convencional de ósmosis inversa, la eliminación de las descargas líquidas, la recuperación de agua y el cumplimiento de estándares ambientales cada vez más exigentes convierten al ZLD en una alternativa estratégica para sectores industriales de alto consumo hídrico como la minería, la industria química, la generación eléctrica y la manufactura avanzada.

Caso de estudio 7.26

Diseño de una planta desalinizadora inteligente mediante gemelo digital (Digital Twin) e inteligencia artificial

Planteamiento del problema

Una empresa de servicios de agua proyecta la construcción de una planta desalinizadora de agua de mar con una capacidad de **200 000 m³/día** para abastecer una zona metropolitana.

El cliente establece que la planta deberá incorporar tecnologías de **Industria 4.0**, incluyendo monitoreo en tiempo real, mantenimiento predictivo, optimización energética y un sistema de **gemelo digital (Digital Twin)** que reproduzca virtualmente el comportamiento del proceso.

Se espera que el equipo de ingeniería elabore un diseño conceptual donde la ósmosis inversa convencional conviva con inteligencia artificial y con análisis avanzado de datos.

Objetivos del proyecto

La planta deberá cumplir los siguientes criterios:

Producción de agua potable

$200\ 000\ m^3/día$

Disponibilidad operacional

$\geq 98\ \%$

Consumo específico máximo

```
2,6 kWh/m³
```

Recuperación global

```
45 %
```

Vida útil del proyecto

```
30 años
```

Sistema de monitoreo

```
Tiempo real (24/7)
```

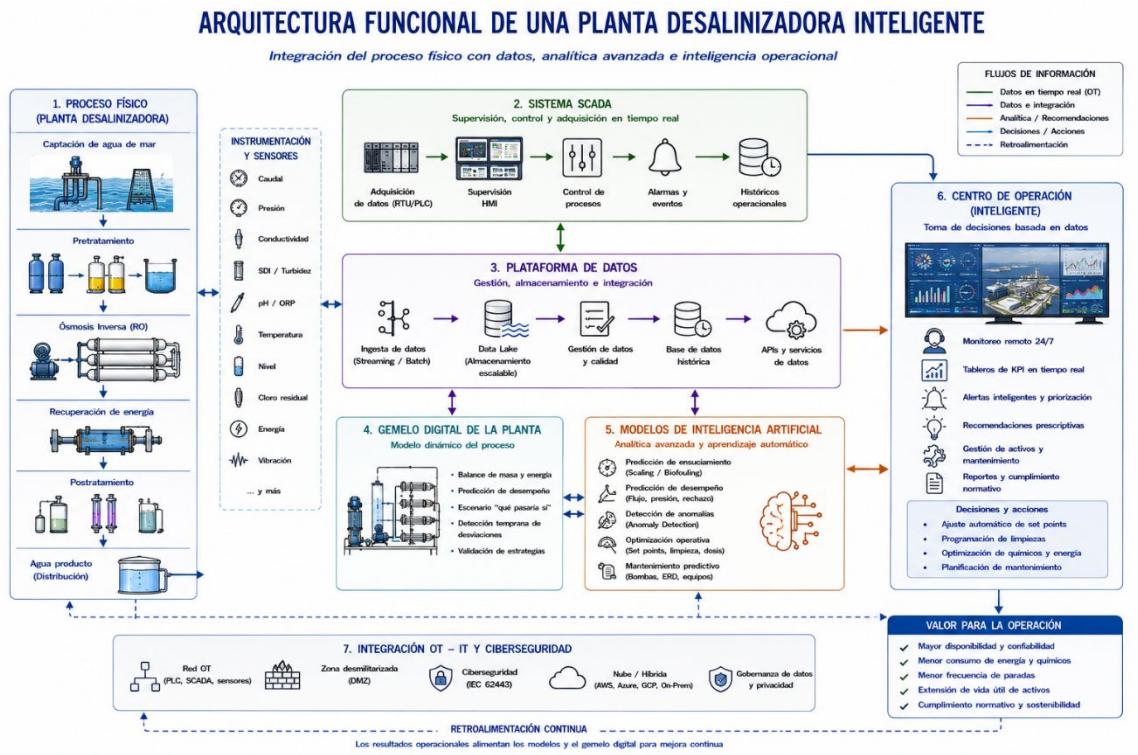
Arquitectura general del sistema

El proyecto comprende los siguientes subsistemas:

1. Captación de agua de mar.
2. Pretratamiento mediante DAF y ultrafiltración.
3. Ósmosis inversa en cinco trenes de producción.
4. Recuperación de energía mediante intercambiadores isobáricos.
5. Postratamiento y remineralización.
6. Sistema SCADA.
7. Plataforma de análisis de datos.
8. Gemelo digital.
9. Plataforma de inteligencia artificial.
10. Centro de operación remota.

Figura 7.36

Arquitectura funcional de una planta desalinizadora inteligente.



Nota. Elaboración propia.

Paso 1. Diseño del sistema de adquisición de datos

Cada tren incorpora sensores para medir:

Variables hidráulicas

- presión de alimentación;
- presión del concentrado;
- presión del permeado;
- presión diferencial;
- caudal de alimentación;
- caudal de permeado;
- caudal de rechazo.

Variables físico-químicas

- conductividad;
- pH;
- ORP;
- temperatura;

- turbidez;
- SDI;
- ATP;
- TOC.

Variables energéticas

- potencia eléctrica;
- consumo específico;
- eficiencia de bombas;
- eficiencia de recuperación energética.

Todos los datos son transmitidos mediante una red industrial redundante al sistema SCADA.

Paso 2. Construcción del gemelo digital

El gemelo digital constituye una representación matemática del comportamiento de la planta.

Integra:

- balances de materia;
- balances de energía;
- hidráulica de membranas;
- modelos de fouling;
- modelos de scaling;
- curvas de bombas;
- eficiencia de intercambiadores de presión.

Cada pocos segundos el modelo recibe información desde la planta real.

Posteriormente:

- actualiza sus parámetros;
- compara el desempeño esperado con el observado;
- identifica desviaciones.

Interpretación ingenieril

Un gemelo digital no hace las veces de la planta física: su tarea es prever cómo se comportará el sistema y respaldar las decisiones de operación.

Paso 3. Modelos de inteligencia artificial

Se desarrollan cuatro modelos principales.

Modelo 1. Predicción de fouling

Variables de entrada:

- SDI;
- ATP;
- TOC;
- presión diferencial;
- temperatura.

Variable de salida:

```
Probabilidad de fouling (%)
```

Modelo 2. Predicción del scaling

Entradas:

- LSI;
- S&DSI;
- recuperación;
- temperatura;
- concentración de calcio;
- concentración de sílice.

Salida:

```
Riesgo de scaling
```

Modelo 3. Optimización energética

Variables:

- presión;
- recuperación;

- temperatura;
- eficiencia del intercambiador.

Salida:

```
Consumo mínimo de energía
```

Modelo 4. Mantenimiento predictivo

Variables:

- vibración;
- temperatura de rodamientos;
- corriente eléctrica;
- horas de operación.

Salida:

```
Probabilidad de falla
```

Paso 4. Entrenamiento del modelo

Base de datos histórica

```
8 años
```

Número de registros

```
18 millones
```

Frecuencia de adquisición

```
1 minuto
```

Las variables son depuradas mediante:

- eliminación de valores atípicos;
- tratamiento de datos faltantes;
- normalización;
- selección de características.

Posteriormente se divide el conjunto de datos en:

- entrenamiento;
- validación;
- prueba.

Paso 5. Optimización automática

Cada cinco minutos el sistema calcula:

- presión óptima;
- recuperación óptima;
- dosificación óptima de antiincrustante;
- frecuencia esperada de CIP.

El operador recibe recomendaciones antes de modificar cualquier parámetro.

Ejemplo

Recuperación actual

```
45 %
```

Recuperación sugerida

```
46,8 %
```

Ahorro energético esperado

```
2,5 %
```

Incremento del riesgo de scaling

```
No significativo
```

En este caso, el sistema recomienda implementar el cambio.

Paso 6. Detección temprana de anomalías

El sistema compara continuamente:

Valor esperado

vs.

Valor observado.

Si la diferencia supera un límite previamente establecido, se genera una alarma.

Ejemplo

Presión diferencial prevista

```
0,90 bar
```

Presión medida

```
1,18 bar
```

Desviación

```
31 %
```

El sistema identifica un posible inicio de fouling y recomienda inspección preventiva.

Paso 7. Evaluación económica

Implementación del sistema digital

Concepto	Millones US$
Sensores inteligentes	2,8
SCADA	2,1
Servidores	1,2
Plataforma IA	3,5
Gemelo digital	4,0
Capacitación	0,6

Inversión

US$14,2 millones

Beneficios estimados

Concepto	Beneficio anual
Reducción energética	US$2,8 millones
Menor consumo químico	US$0,7 millones
Menor reemplazo de membranas	US$0,9 millones
Menor tiempo fuera de servicio	US$1,3 millones

Beneficio anual

US$5,7 millones

Período simple de recuperación

14,2 / 5,7=2,5 años

Paso 8. Ciberseguridad

El diseño incorpora:

- segmentación de redes OT e IT;
- autenticación multifactor;
- cifrado de comunicaciones;
- respaldo automático;
- monitoreo de eventos de seguridad;

- plan de recuperación ante incidentes.

Estas medidas reducen el riesgo de accesos no autorizados y mejoran la continuidad operacional.

Paso 9. Indicadores clave de desempeño (KPIs)

Tabla 7.62

Indicadores clave de desempeño para una planta desalinizadora inteligente.

Indicador	**Meta**
Disponibilidad	≥98 %
Consumo específico	≤2,6 kWh/m³
Recuperación	45 %
Frecuencia de CIP	≤4 limpiezas/año por tren
Vida útil de membranas	≥7 años
Tiempo medio entre fallas (MTBF)	≥8 000 h
Tiempo medio de reparación (MTTR)	≤8 h

Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

1. Si a un gemelo digital se le suman modelos de inteligencia artificial, es posible prever problemas de fouling y scaling, o averías mecánicas, antes de que lleguen a perjudicar la producción.
2. Con monitoreo continuo y optimización automática se consume menos energía y menos productos químicos, y se hacen menos mantenimientos correctivos.
3. La inversión adicional en infraestructura digital se recupera en un período aproximado de **2,5 años**, gracias a los ahorros operativos obtenidos.
4. Proteger la infraestructura crítica y mantener el servicio sin interrupciones obliga a pensar en ciberseguridad desde el diseño.
5. Las plantas inteligentes reúnen automatización, procesos, inteligencia artificial y ciencia de datos, y marcan el siguiente paso lógico en la evolución de la desalación como ingeniería.

Reflexión ingenieril

La transformación digital cambia la forma de diseñar y operar las plantas que tratan agua. Quien ejerza la ingeniería en el futuro necesitará los fundamentos de hidráulica, química del agua y membranas, pero también deberá dominar el análisis de datos, la simulación y la automatización. Al unirse la ingeniería de procesos con la

inteligencia artificial, las plantas serán eficientes, resilientes y sostenibles en mayor grado, y se adaptarán en tiempo real a los cambios de calidad del agua, de demanda y de condiciones operacionales. Así arranca una nueva generación de infraestructuras hídricas con inteligencia propia.

Caso de estudio 7.27

Proyecto integral de diseño de una planta desalinizadora mediante ósmosis inversa para abastecimiento urbano

Planteamiento del problema

Una ciudad costera presenta una población actual de **650 000 habitantes**, con una tasa de crecimiento anual del **2,1 %**. La disponibilidad de agua proveniente de fuentes superficiales y subterráneas resulta insuficiente para cubrir la demanda futura.

La autoridad de agua decide desarrollar una nueva planta desalinizadora de agua de mar mediante ósmosis inversa que garantice el abastecimiento durante los próximos **30 años**.

El proyecto conceptual que prepare el equipo de ingeniería ha de abarcar lo técnico, lo ambiental, lo económico y lo operacional.

Objetivos del proyecto

La planta deberá cumplir los siguientes requisitos:

Producción inicial

$120\ 000\ m^3/día$

Horizonte de diseño

30 años

Disponibilidad operacional

$\geq 98\ \%$

Consumo específico

$\leq 2{,}7\ kWh/m^3$

Recuperación global

$45\ \%$

Satisfacer la normativa nacional sobre agua potable y atender, además, lo que recomienda la OMS (Organización Mundial de la Salud).

Paso 1. Proyección de la demanda de agua

Se adopta una dotación promedio de:

```
180 L/hab·día
```

Demanda actual

650 000×180=117 000 000 L/día

Aplicando un factor por pérdidas en la red del **15 %**, la producción requerida asciende aproximadamente a **135 000 m³/día**, lo que justifica un diseño inicial de **120 000 m³/día** con posibilidad de ampliación modular.

Interpretación ingenieril

Al planificar no basta mirar la demanda de hoy: hay que prever que la población crecerá, que la red de distribución perderá agua y que se necesita holgura para el mantenimiento y para situaciones extraordinarias.

Paso 2. Selección del sistema de captación

Se comparan tres alternativas:

Alternativa	Ventajas	Desventajas
Captación abierta	Menor costo inicial	Mayor variabilidad de calidad
Pozos de playa	Excelente calidad del agua	Limitación geológica y menor capacidad
Galerías filtrantes	Baja turbidez y SDI	Alta inversión y complejidad constructiva

Para este proyecto se selecciona una **captación abierta**, complementada con un sistema robusto de pretratamiento debido al elevado caudal requerido.

Paso 3. Diseño del pretratamiento

El tren de pretratamiento comprende:

1. Rejas de gruesos.
2. Tamices automáticos.
3. Estación de bombeo de baja presión.
4. Coagulación.
5. Floculación.
6. Flotación por aire disuelto (DAF).
7. Filtración multimedia.
8. Ultrafiltración.

9. Dosificación de antiincrustante.
10. Decloración con bisulfito de sodio.
11. Filtros cartucho de 5 µm.

Justificación técnica

Esta configuración proporciona un agua de alimentación con:

- SDI inferior a 3;
- turbidez inferior a 0,2 NTU;
- reducción significativa del potencial de biofouling.

Paso 4. Diseño de la planta de ósmosis inversa

Caudal de alimentación

$$Qa=120\,000 / 0.45 = 266\,667\ m^3/día$$

Caudal de rechazo

$266\,667 - 120\,000 = 146\,667\ m^3/día$

La planta se divide en:

```
6 trenes de producción
```

Cada tren produce aproximadamente:

$20\,000\ m^3/día$

Esta configuración facilita las labores de mantenimiento sin afectar significativamente el suministro.

Paso 5. Sistema de recuperación de energía

Se seleccionan intercambiadores isobáricos de presión con una eficiencia superior al **96 %**.

Beneficios:

- reducción del consumo específico;
- menor potencia instalada;
- disminución de emisiones de CO_2;
- mayor confiabilidad.

Paso 6. Postratamiento

Hay que remineralizar el permeado, a fin de darle estabilidad química y de cuidar la red de distribución.

El sistema incluye:

- contacto con calcita;
- dosificación de dióxido de carbono;
- ajuste de pH;
- desinfección final.

Parámetros objetivo

Parámetro	Valor
pH	7,2–8,0
Alcalinidad	40–80 mg/L como $CaCO_3$
Dureza	60–100 mg/L como $CaCO_3$
Cloro residual libre	0,2–0,5 mg/L

Paso 7. Automatización y control

La planta incorpora un sistema de automatización distribuido (DCS) integrado con SCADA.

Se monitorean continuamente:

- caudales;
- presiones;
- conductividad;
- temperatura;
- SDI;
- ATP;
- consumo específico de energía;
- presión diferencial;
- calidad del agua producto.

Además, el sistema genera reportes automáticos de indicadores de desempeño y mantenimiento.

Paso 8. Balance energético

Consumo específico adoptado:

2,6 kWh/m³

Consumo diario:

120 000×2,6=312 000 kWh/día

Consumo anual:

312 000×365=113 880 000 kWh/año

Paso 9. Estimación del CAPEX

Concepto	Millones US$
Captación	20
Pretratamiento	28
Sistema RO	55
Recuperación de energía	14
Postratamiento	10
Automatización	8
Obras civiles	38
Ingeniería y gestión	15
Contingencias	22

CAPEX estimado

US$210 millones

Paso 10. Estimación del OPEX

Concepto	Millones US$/año
Energía	13,8
Productos químicos	3,0
Membranas	2,0
Personal	2,8
Mantenimiento	2,7
Laboratorio y monitoreo	0,9
Otros	1,3

OPEX anual aproximado

US$26,5 millones

Paso 11. Gestión ambiental

El estudio ambiental identifica como aspectos críticos:

- captación de organismos marinos;
- descarga de salmuera;
- consumo energético;

- emisiones indirectas de gases de efecto invernadero;
- generación de residuos químicos.

Medidas de mitigación

- captación con baja velocidad de aproximación;
- difusores para la descarga de salmuera;
- monitoreo oceanográfico continuo;
- integración con energía fotovoltaica;
- programa de vigilancia ambiental.

Paso 12. Gestión de riesgos

Se elabora una matriz de riesgos considerando:

Tabla 7.63

Matriz preliminar de riesgos del proyecto.

Riesgo	Probabilidad	Impacto	Nivel
Biofouling	Media	Alto	Alto
Scaling	Media	Alto	Alto
Floraciones algales	Baja	Muy alto	Alto
Falla de bombas de alta presión	Baja	Alto	Medio
Corte del suministro eléctrico	Media	Muy alto	Alto
Ciberataques al sistema SCADA	Baja	Alto	Medio

Nota. Elaboración propia.

Paso 13. Evaluación de sostenibilidad

Se evalúan indicadores alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

Indicador	Objetivo
Reducción del déficit hídrico	>90 %
Consumo específico	≤2,7 kWh/m³
Reutilización interna de agua	>95 %
Disponibilidad operacional	≥98 %
Integración de energías renovables	≥30 % del consumo eléctrico

Gracias a esta evaluación, resulta más sencillo introducir criterios ESG (Environmental, Social and Governance) cuando se planifica el proyecto.

Paso 14. Cronograma general del proyecto

Etapa	Duración
Ingeniería conceptual	6 meses
Ingeniería FEED	8 meses
Ingeniería de detalle	10 meses
Construcción	30 meses
Puesta en marcha	6 meses

Duración total estimada:

```
60 meses
```

Tabla 7.64

Resumen técnico del proyecto de desalinización con Ósmosis Inversa

Parámetro	Valor
Producción	120 000 m³/día
Recuperación	45 %
Alimentación	266 667 m³/día
Trenes RO	6
Consumo específico	2,6 kWh/m³
CAPEX	US$ 210 millones
OPEX	US$ 26,5 millones/año
Vida útil	30 años

Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

1. Seis trenes de ósmosis inversa en un diseño modular dan gran confiabilidad, hacen más fácil el mantenimiento y permiten crecer en capacidad más adelante.
2. El consumo específico baja y la operación gana estabilidad cuando el diseño suma automatización avanzada, ultrafiltración y recuperación de energía.
3. Para que el proyecto sea sostenible durante su vida útil, los análisis ambientales y de riesgos deben entrar desde la ingeniería conceptual.
4. Avanzar escalonadamente, de la ingeniería conceptual a la puesta en marcha, aminora las incertidumbres técnicas y ayuda a vigilar costos y plazos.
5. Los proyectos de desalación de hoy son multidisciplinarios, y eso se observa en cómo se conjugan en ellos los criterios ambientales, económicos, energéticos, químicos e hidráulicos.

Reflexión ingenieril

Una planta desalinizadora para abastecer a una ciudad no se reduce a dimensionar equipos. Es infraestructura estratégica, y de ella dependerá la seguridad hídrica de la población por muchas décadas. Por eso el ingeniero necesita articular procesos e hidráulica con química del agua, automatización, sostenibilidad, riesgos y la economía de todo el ciclo de vida. Hoy pocas competencias pesan tanto en la ingeniería del agua como la de armonizar esos factores.

7.7 TENDENCIAS FUTURAS Y PERSPECTIVAS DE LA ÓSMOSIS INVERSA

7.7.1 INTRODUCCIÓN

Durante las últimas cinco décadas, la ósmosis inversa ha experimentado una evolución extraordinaria.

Las primeras plantas comerciales presentaban:

- recuperaciones reducidas;
- elevado consumo energético;
- baja vida útil de las membranas;
- costos muy elevados de producción.

Hoy, con los nuevos materiales, los sistemas de recuperación de energía, la inteligencia artificial y la automatización, la ósmosis inversa es la tecnología dominante en desalación y reúso de agua.

Sin embargo, la demanda mundial de agua sigue creciendo y trae nuevos desafíos relacionados con:

- sostenibilidad;
- eficiencia energética;
- economía circular;
- cambio climático;
- reducción de emisiones de carbono.

Hoy distintas tecnologías emergentes están cambiando cómo se diseñan y operan las plantas modernas.

7.7.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA

La evolución tecnológica puede resumirse en cinco generaciones.

Primera generación (1960–1980)

Características:

- membranas de acetato de celulosa;
- baja recuperación;
- elevado consumo energético;
- limitada estabilidad química.

Aplicaciones:

- plantas piloto;
- abastecimiento militar;
- pequeñas comunidades.

Segunda generación (1980–2000)

Innovaciones:

- membranas de poliamida;
- módulos espirales;
- mayor rechazo de sales;
- desarrollo de antincrustantes modernos.

La desalación comenzó a expandirse comercialmente.

Tercera generación (2000–2015)

Principales avances:

- intercambiadores isobáricos;
- ultrafiltración;
- sistemas SCADA;
- mejores modelos hidráulicos.

El consumo energético disminuyó considerablemente.

Cuarta generación (2015–2030)

Características:

- inteligencia artificial;
- gemelos digitales;
- mantenimiento predictivo;
- sensores inteligentes;
- análisis masivo de datos.

La operación deja de ser reactiva y pasa a ser predictiva.

Quinta generación (2030–2050)

Se espera la incorporación generalizada de:

- membranas biomiméticas;
- grafeno;
- nanotecnología;
- inteligencia artificial autónoma;
- plantas energéticamente autosuficientes.

Figura 7.37

Evolución tecnológica de la ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia con base en la evolución histórica de la tecnología de membranas y desalación.

7.7.3 MEMBRANAS BIOMIMÉTICAS

Las membranas biomiméticas reproducen mecanismos presentes en organismos vivos.

Su principal componente son proteínas especializadas denominadas:

acuaporinas.

Estas proteínas permiten:

- transporte extremadamente rápido de agua;
- elevado rechazo de sales;
- bajo consumo energético.

Ventajas

- mayor permeabilidad;
- menor presión de operación;
- menor fouling;
- menor consumo energético.

Actualmente representan una de las áreas más prometedoras de investigación.

7.7.4 MEMBRANAS DE GRAFENO

El grafeno posee:

- espesor atómico;
- extraordinaria resistencia mecánica;
- elevada conductividad térmica;
- gran estabilidad química.

Las membranas de grafeno llevan nanoporos que dejan pasar únicamente moléculas de agua.

Beneficios potenciales

- incremento importante del flujo;
- reducción de presión;
- menor consumo eléctrico;
- elevada resistencia al ensuciamiento.

Quedan por resolver la fabricación a gran escala y la estabilidad, pero la investigación en este campo tiene un potencial alto.

7.7.5 NANOTUBOS DE CARBONO

Los nanotubos presentan canales internos extremadamente lisos.

Como consecuencia,

la fricción hidráulica disminuye notablemente.

Se espera que permitan:

- mayor productividad;
- menor presión;
- elevada selectividad.

7.7.6 SISTEMAS HÍBRIDOS

El futuro de la desalación no dependerá únicamente de la ósmosis inversa.

Se desarrollan sistemas híbridos que combinan varias tecnologías.

RO + Forward Osmosis

Ventajas:

- menor fouling;
- menor presión.

RO + Electrodiálisis

Adecuado para:

- aguas salobres;
- recuperación de sales.

RO + Destilación por membranas

Especialmente útil para:

- altas salinidades;
- ZLD;
- aprovechamiento de calor residual.

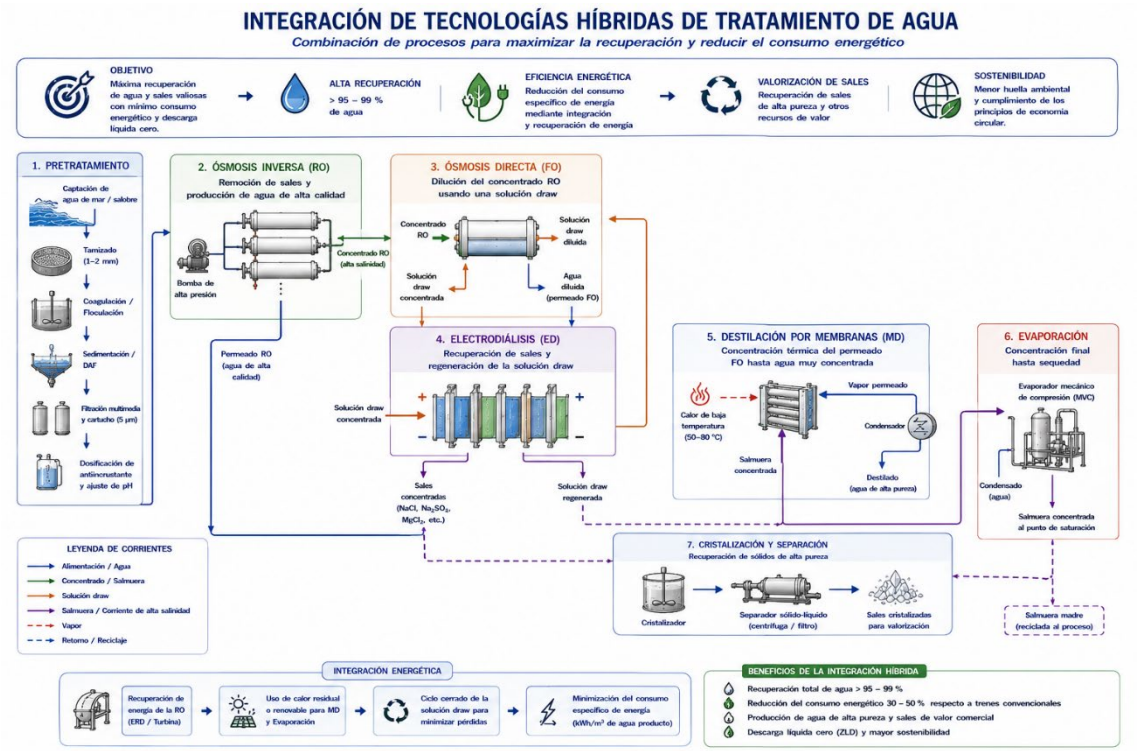
RO + Evaporación mecánica

Permite:

- recuperación cercana al 100 %;
- descarga líquida cero.

Figura 7.38

Integración de tecnologías híbridas de tratamiento de agua.



Nota. Elaboración propia.

7.7.7 INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los algoritmos modernos permiten:

- predecir fouling;
- estimar scaling;
- detectar fallas;
- optimizar presión;
- optimizar recuperación;
- reducir consumo energético.

En el futuro próximo,

la inteligencia artificial no sustituirá al ingeniero,

sino que actuará como un sistema avanzado de apoyo para la toma de decisiones.

7.7.8 GEMELOS DIGITALES

Los Digital Twins permiten:

- simular la planta en tiempo real;

- identificar anomalías;
- probar escenarios sin afectar la operación;
- optimizar mantenimiento.

Actualmente constituyen una de las principales herramientas de la Industria 4.0.

7.7.9 INTEGRACIÓN CON ENERGÍAS RENOVABLES

Uno de los mayores desafíos continúa siendo el consumo energético.

Las principales líneas de investigación incluyen:

- energía solar fotovoltaica;
- energía eólica;
- energía undimotriz;
- energía mareomotriz;
- hidrógeno verde;
- almacenamiento mediante baterías.

Juntas, estas tecnologías harán posible que las plantas desalinizadoras emitan bastante menos carbono.

7.7.10 ECONOMÍA CIRCULAR

Las plantas modernas dejan atrás la idea de tratamiento y avanzan hacia la de recuperación de recursos.

Las tendencias incluyen:

- recuperación de agua;
- recuperación de sales;
- recuperación de minerales críticos;
- reutilización de concentrados;
- valorización de residuos.

Este enfoque transforma el agua residual en una fuente de recursos.

7.7.11 DESALINIZACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático incrementará:

- la frecuencia de sequías;

- la salinización de acuíferos;
- la variabilidad hidrológica.

Para asegurar el abastecimiento de agua en el futuro, la desalación y el reúso irán ganando cada vez más importancia en los años que vienen.

Aun así, habrá que bajar el consumo de energía y reducir los impactos ambientales de la captación y de la descarga de salmuera.

7.7.12 COMPETENCIAS DEL INGENIERO DEL FUTURO

El profesional especializado en ingeniería del agua deberá integrar conocimientos de:

- hidráulica;
- química del agua;
- ingeniería de membranas;
- modelado matemático;
- simulación de procesos;
- programación (Python, MATLAB);
- análisis de datos;
- inteligencia artificial;
- automatización industrial;
- ciberseguridad en infraestructuras críticas;
- evaluación ambiental;
- análisis económico y financiero.

Quien diseñe u opere plantas avanzadas tendrá que contar con formación interdisciplinaria.

Tabla 7.65

Tecnologías emergentes en desalación y tratamiento avanzado de agua

Tecnología	Nivel de madurez	Beneficio principal	Principales desafíos
Membranas biomiméticas	Medio	Mayor permeabilidad	Fabricación y durabilidad
Membranas de grafeno	Bajo-Medio	Reducción de presión	Producción a escala industrial

Tecnología	Nivel de madurez	Beneficio principal	Principales desafíos
Nanotubos de carbono	Bajo	Alta selectividad	Costos y estabilidad
Gemelos digitales	Alto	Optimización en tiempo real	Integración de datos
Inteligencia artificial	Alto	Mantenimiento predictivo	Calidad y gobernanza de datos
Sistemas híbridos RO–FO	Medio	Mayor recuperación	Complejidad operativa
ZLD avanzado	Alto	Descarga líquida cero	Elevado consumo energético
Integración con energías renovables	Alto	Reducción de emisiones	Intermitencia y almacenamiento

Nota. Elaboración propia.

Conclusiones del capítulo

De tecnología de laboratorio, la ósmosis inversa pasó a ser el proceso predominante en desalación y reúso de agua, tanto en la industria como en las ciudades. La impulsaron los materiales de membrana, la recuperación de energía, la automatización y el control, y gracias a ello el consumo específico de energía bajó mucho y la confiabilidad operacional subió.

Aun así, la sostenibilidad, el cambio climático y una demanda de agua que no deja de crecer reclaman soluciones tecnológicas de nueva generación. Con energías renovables, gemelos digitales, sistemas híbridos, membranas avanzadas e inteligencia artificial, las instalaciones serán más eficientes, dejarán menor huella ambiental y resistirán mejor las crisis.

Dominar estas tecnologías exigirá a quien ejerza la ingeniería química o la del agua una formación en varias disciplinas: a los fundamentos de la ingeniería de procesos habrá que sumar modelado, gestión de proyectos, automatización y análisis de datos.

CAPÍTULO 8

BIORREACTORES DE MEMBRANAS (MBR): FUNDAMENTOS, DISEÑO, OPERACIÓN Y MODELAMIENTO

8.1. INTRODUCCIÓN

Los biorreactores de membranas, conocidos como MBR (Membrane Bioreactors), integran en una misma línea de tratamiento un proceso biológico y una etapa de separación mediante membranas. La combinación permite sustituir, total o parcialmente, la separación convencional de biomasa mediante sedimentación secundaria por una separación física mediante membranas.

Los lodos activados convencionales funcionan así: el reactor biológico genera biomasa y, enseguida, un sedimentador aparta el lodo del agua tratada. Con un MBR, es la membrana la que separa sólidos y líquido. De esa manera se pueden mantener muchos sólidos dentro del reactor y, hasta cierto punto, el tiempo de retención hidráulica deja de depender del de sólidos.

Judd plantea el diseño de un MBR como la integración de tres componentes estrechamente relacionados:

1. diseño del proceso de membranas;
2. diseño del proceso biológico;
3. diseño del sistema de aireación.

Esta distinción importa, ya que el comportamiento de la membrana no puede derivarse del todo de principios fundamentales, mientras que gran parte del proceso biológico sí se resuelve con balances de materia, estequiometría y cinética.

Este capítulo no pretende revisar todos los tipos de MBR que existen. Su meta es que el lector logre:

- identificar las variables principales de diseño;
- calcular el HRT, el SRT, F/M, el flujo de permeado y el área de membrana;
- realizar balances de materia;

- estimar la producción de biomasa;
- determinar requerimientos aproximados de oxígeno;
- comprender la relación entre MLSS, flujo, aireación y fouling;
- establecer un modelo simplificado de operación;
- interpretar un modelo dinámico;
- realizar una primera calibración y validación;
- evaluar alternativas para aguas residuales municipales e industriales.

8.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MBR

Un MBR combina:

Tratamiento biológico + separación por membrana

La alimentación entra al reactor biológico, donde microorganismos consumen la materia orgánica y pueden transformar nitrógeno y otros componentes.

El licor mezcla contiene:

- microorganismos;
- sólidos suspendidos;
- materia orgánica particulada;
- materia orgánica soluble;
- productos microbianos;
- sales;
- agua.

La membrana permite el paso del agua y de las especies suficientemente pequeñas para atravesarla, mientras retiene esencialmente la biomasa y los sólidos suspendidos.

La ventaja fundamental es que la separación sólido-líquido deja de depender principalmente de las propiedades de sedimentación del lodo.

Por ello, el MBR puede trabajar con concentraciones de MLSS superiores a las utilizadas habitualmente en sistemas convencionales.

Sin embargo, esta ventaja genera una consecuencia importante: **la membrana pasa a ser un elemento crítico del proceso y el fouling se convierte en una variable central de diseño y operación**.

Judd explica que el rendimiento de la separación se define por el juego entre flujo, concentración de sólidos y qué tan bien actúen el crossflow o la aireación que limpia la superficie de la membrana.

8.3. CONFIGURACIONES PRINCIPALES DE MBR

Existen dos configuraciones principales.

8.3.1. MBR SUMERGIDO

En el MBR sumergido, las membranas van dentro del reactor, o bien en un tanque aparte que se conecta con el reactor biológico.

Lo habitual es extraer el permeado por vacío o por presión de succión.

La aireación cumple dos funciones:

1. proporcionar oxígeno a los microorganismos;
2. generar turbulencia y cizallamiento sobre la superficie de la membrana.

Esta configuración es particularmente atractiva para tratamiento municipal debido a su bajo requerimiento de bombeo del licor mezcla.

8.3.2. MBR EXTERNO O SIDESTREAM

Aquí el licor mezcla sale del biorreactor mediante bombeo hacia módulos de membrana ubicados fuera de él.

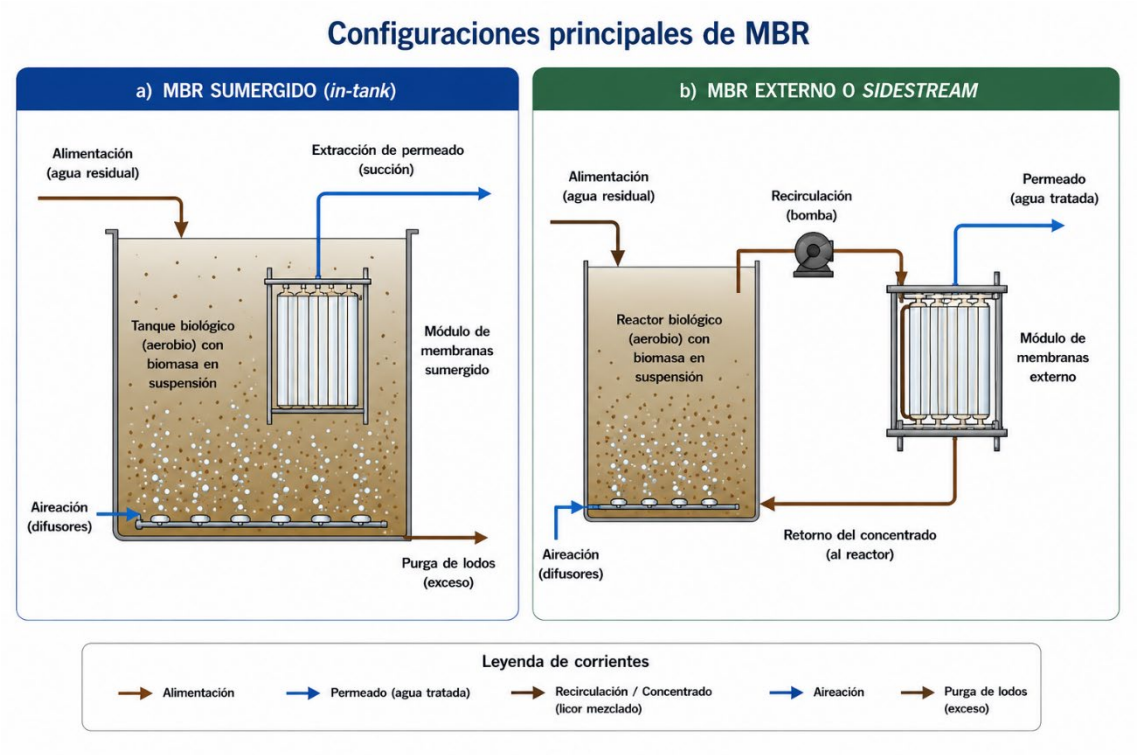
El flujo tangencial elevado proporciona el esfuerzo cortante necesario para controlar la acumulación de sólidos.

Su ventaja principal es que da más control hidráulico sobre la membrana, a cambio de un mayor consumo de energía por el bombeo.

La revisión de Jijingi et al. diferencia explícitamente los sistemas sumergidos y externos y señala que la selección debe considerar las características del agua residual, las necesidades de tratamiento, el espacio disponible y las condiciones de operación.

Figura 8.1

Configuraciones principales de biorreactores de membranas



Nota. Elaboración propia basada en Judd (2011) y Jijingi et al. (2024).

8.4. VARIABLES FUNDAMENTALES DE OPERACIÓN

Antes de diseñar un MBR es necesario dominar un conjunto relativamente pequeño de variables.

8.4.1. CAUDAL

$$Q = \text{caudal de alimentación, m3/d}$$

Para un sistema aproximadamente estacionario:

$$Q_{entrada} \approx Q_{permeado} + Q_{purga} + Q_{otras\ salidas}$$

En muchos cálculos preliminares puede despreciarse Qpurga frente al caudal tratado para realizar el balance hidráulico, pero no debe ignorarse en el balance de sólidos.

8.4.2. FLUJO DE PERMEADO

$$J = Qp / A$$

donde:

$$J = \text{flujo de permeado, m3/(m2·d)}$$

$$Qp = \text{caudal de permeado, m3/d}$$

$$A = \text{área efectiva de membrana, m2}$$

Una unidad práctica frecuente es:

$$LMH = L/(m2·h)$$

La conversión es:

1 LMH = 0.001 m3/(m2·h)

o:

1 LMH = 0.024 m3/(m2·d)

Precisamente la revisión de 2024 define el flujo como la relación entre el caudal de permeado y el área de membrana.

8.4.3. PRESIÓN TRANSMEMBRANA

Para un sistema donde pueda representarse mediante diferencia de presiones:

$$TMP = Pin - Pp$$

donde:

TMP = presión transmembrana, Pa

Pin = presión del lado de alimentación, Pa

Pp = presión del lado de permeado, Pa

Cuando se trata de un MBR sumergido, la lectura se adapta al sistema de succión y a la presión hidrostática.

La TMP es de las variables básicas para evaluar cómo está la membrana.

8.4.4. PERMEABILIDAD

La permeabilidad puede expresarse como:

$$K = J / TMP$$

donde:

K = permeabilidad hidráulica, m/(Pa·s)

J = flujo de permeado, m/s

TMP = presión transmembrana, Pa

Como la viscosidad del agua depende de la temperatura, en operación real casi siempre se corrige la permeabilidad para llevarla a una temperatura de referencia.

Strathmann destaca que el flujo no depende únicamente de la membrana; las resistencias adicionales producidas por capas superficiales pueden modificar sustancialmente la resistencia hidráulica.

8.5. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA, HRT

El tiempo de retención hidráulica se define como:

$$HRT = V / Q$$

donde:

HRT = tiempo de retención hidráulica, d

V = volumen del reactor, m3

Q = caudal de alimentación, m3/d

Si se desea expresar en horas:

$$HRT(h) = 24V/Q$$

El HRT controla el tiempo disponible para las reacciones biológicas.

Sin embargo, una de las ventajas fundamentales del MBR es que **HRT y SRT pueden ser controlados de manera relativamente independiente**.

La revisión de Jijingi et al. utiliza:

$$HRT = Vreactor / Qin$$

como uno de los parámetros fundamentales de evaluación del desempeño.

8.6. TIEMPO DE RETENCIÓN DE SÓLIDOS, SRT

El SRT, o edad del lodo, figura entre las variables más importantes de un MBR.

Una forma simplificada de expresarlo es:

SRT = masa de sólidos en el sistema / masa de sólidos purgada por día

Si se considera solamente el reactor:

$$SRT = V X / (Qw Xw)$$

donde:

SRT = tiempo de retención de sólidos, d

V = volumen del reactor, m3

X = concentración de sólidos en el reactor, kg/m3

Qw = caudal de purga de lodos, m3/d

Xw = concentración de sólidos en la corriente de purga, kg/m3

Si $X \approx Xw$:

$$SRT \approx V/Qw$$

En sistemas MBR, el SRT puede ser considerablemente superior al HRT.

Esta característica permite mantener microorganismos de crecimiento lento, especialmente nitrificantes.

Judd muestra que los largos tiempos de residencia disponibles en MBR resultan particularmente favorables para la nitrificación.

8.7. RELACIÓN ENTRE HRT Y SRT

Una comparación sencilla permite entender la principal ventaja del MBR.

Supóngase:

$$Q = 10\ 000\ m3/d$$

$$V = 5\ 000\ m3$$

Entonces:

$$HRT = 5\ 000/10\ 000 = 0.5\ d$$

$$HRT = 12\ h$$

Si simultaneamente:

$$SRT = 20\ d$$

el sistema mantiene la biomasa durante 20 días mientras que el agua permanece aproximadamente 12 horas.

Por tanto:

$$SRT/HRT = 20/0.5 = 40$$

De esta relación se desprende que el sistema logra retener a los microorganismos mucho más tiempo que el tiempo hidráulico.

Esta separación es particularmente útil para nitrificación y para procesos en los que se requiere conservar biomasa especializada.

Figura 8.2

Relación entre HRT, SRT, MLSS y purga de lodos en un MBR

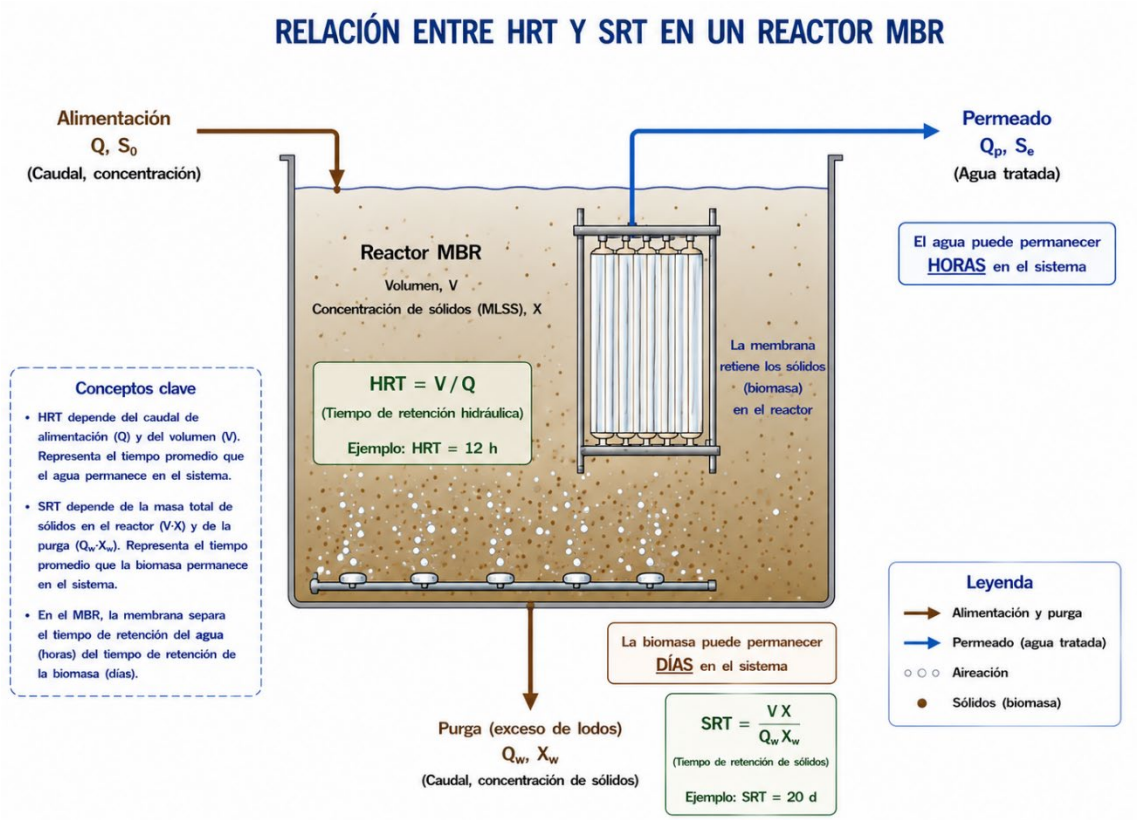


Figura: Relación conceptual entre tiempo de retención hidráulica (HRT), tiempo de retención de sólidos (SRT), concentración de sólidos suspendidos del licor mezcla (MLSS) y purga de biomasa en un MBR.

Nota. Elaboración propia basada en Judd (2011).

8.8. CONCENTRACIÓN DE MLSS

MLSS significa Mixed Liquor Suspended Solids.

Se expresa normalmente como:

$$\text{MLSS} = \text{kg/m3}$$

o:

$$\text{MLSS} = \text{mg/L}$$

Recordando que:

1 mg/L = 0.001 kg/m3

Por ejemplo:

8 000 mg/L = 8 kg/m3

La concentración de MLSS tiene consecuencias simultáneas sobre:

- volumen del reactor;
- producción de lodos;

- transferencia de oxígeno;
- viscosidad;
- comportamiento hidráulico;
- filtrabilidad;
- fouling.

Por ello, **aumentar MLSS no constituye automáticamente una mejora del proceso**.

Judd muestra que el aumento de sólidos afecta la transferencia de oxígeno y que los MBR, debido a sus mayores SRT, pueden presentar una demanda de oxígeno mayor que sistemas convencionales.

8.9. RELACIÓN ALIMENTO/MICROORGANISMOS, F/M

Una forma simplificada de calcular la relación F/M es:

F/M = Q S0 / (V X)

donde:

F/M = relación alimento/microorganismo, d^-1

Q = caudal de alimentación, m3/d

S0 = concentración de sustrato biodegradable en la alimentación, kg/m3

V = volumen biológico, m3

X = concentración de biomasa, kg/m3

Hay que fijarse en las unidades y en cómo se define X, que según la metodología puede ser MLSS, MLVSS o biomasa activa.

La revisión reciente de MBR industrial presenta esta misma estructura para el cálculo de F/M.

8.10. CINÉTICA DE CRECIMIENTO: MODELO DE MONOD

Si el sustrato es limitante, la velocidad específica de crecimiento queda representada así:

mu = mumax S / (Ks + S)

donde:

mu = velocidad específica de crecimiento, d^-1

mumax = velocidad específica máxima de crecimiento, d^-1

S = concentración del sustrato limitante, kg/m3

Ks = constante de saturación, kg/m3

Cuando:

S >> Ks

entonces:

mu ≈ mumax

Cuando:

S << Ks

entonces:

mu ≈ mumax S/Ks

Esta ecuación constituye una herramienta fundamental para relacionar la concentración de sustrato con el crecimiento biológico.

Judd utiliza explícitamente la cinética de Monod para diseñar sistemas biológicos MBR y señala que, combinada con balances de materia y constantes biocinéticas, permite estimar degradación de sustrato, crecimiento de biomasa, nitrificación y producción de lodos.

8.11. RELACIÓN ENTRE SRT Y CRECIMIENTO BIOLÓGICO

En una aproximación simplificada, para una población que debe mantenerse en el sistema:

1/SRT ≈ mu - kd

donde:

SRT = edad de sólidos, d

mu = velocidad específica de crecimiento, d^-1

kd = coeficiente de decaimiento endógeno, d^-1

De aquí:

mu ≈ 1/SRT + kd

Esta relación permite interpretar el SRT como una variable de selección de microorganismos.

Para organismos de crecimiento lento, como los nitrificantes, se requiere un SRT suficientemente elevado.

Judd recomienda determinar el SRT aerobio a partir de la velocidad de crecimiento de los nitrificantes y aplicar un factor de seguridad.

8.12. BALANCE SIMPLIFICADO DE SUSTRATO

Para un reactor perfectamente mezclado:

Entrada - salida - consumo = acumulación

En estado estacionario:

$Q\ S0 - Q\ Se - V\ rS = 0$

por tanto:

$Q(S0 - Se) = V\ rS$

Si:

$$rS = mumax\ S\ X / [Y(Ks + S)]$$

entonces:

$Q(S0 - Se) = V\ mumax\ S\ X / [Y(Ks + S)]$

Partiendo de esta ecuación se llega a una estimación del volumen biológico.

Sin embargo, para un diseño real de eliminación de nutrientes, esta formulación simplificada no es suficiente.

Judd señala que el diseño mediante estequiometría constituye un buen punto de partida, pero que la interacción entre procesos biológicos hace recomendable utilizar modelos dinámicos ASM para un diseño y optimización más rigurosos.

8.13. PRODUCCIÓN DE BIOMASA

Una aproximación inicial para la producción de biomasa es:

$$Px = Y\ Q\ (S0 - Se)$$

donde:

Px = producción de biomasa, kgVSS/d

Y = coeficiente de rendimiento, kgVSS/kg sustrato

Q = caudal, m3/d

S0 = concentración de sustrato en la alimentación, kg/m3

Se = concentración de sustrato en el efluente, kg/m3

En un diseño real deben incorporarse:

- decaimiento endógeno;
- sólidos inertes;
- biomasa no biodegradable;
- nitrificación;
- desnitrificación;
- sólidos provenientes del influente.

Judd muestra que los sólidos inertes y no biodegradables pueden ser una parte considerable de toda la producción de lodos, así que el diseño no debe pasarlos por alto.

8.14. DISEÑO PRELIMINAR DE LA MEMBRANA

Una vez seleccionado el flujo de diseño:

$$A = Qp / J$$

donde:

A = área de membrana, m2

Qp = caudal de permeado, m3/d

J = flujo de permeado, m3/(m2·d)

Ejemplo 8.1. Área de membrana

Una planta debe tratar:

$$Q = 10\,000 \text{ m3/d}$$

Se selecciona:

$$J = 20 \text{ LMH}$$

Conversión:

$$J = 20 \times 0.024 = 0.48 \text{ m3/(m2·d)}$$

Entonces:

$$A = 10\,000/0.48$$

$$A = 20\,833 \text{ m2}$$

Por tanto, el área requerida es aproximadamente:

$A \approx 20\,800$ m2

Aunque parece un cálculo sencillo, es de los más importantes en el diseño de un MBR.

Pero debe utilizarse el **flujo neto**, no necesariamente el flujo instantáneo, cuando existen periodos de relajación, backwash, limpieza o indisponibilidad.

Judd utiliza precisamente el concepto de flujo neto y diferencia entre flujo neto de diseño y flujo pico. En uno de sus ejemplos de diseño, un aumento del caudal pico incrementa significativamente el área de membrana requerida y, por tanto, el CAPEX y OPEX.

8.15. FLUJO PROMEDIO Y FLUJO PICO

Si:

$Q_{pico} > Q_{promedio}$

el diseñador tiene dos alternativas principales:

1. diseñar toda el área de membrana para el caudal pico;
2. utilizar ecualización hidráulica para reducir el pico.

El área para el flujo pico es:

$A_{pico} = Q_{pico}/J_{pico}$

No necesariamente:

$A_{pico} = Q_{pico}/J_{promedio}$

porque el sistema puede admitir un flujo transitorio superior al flujo de diseño durante periodos limitados.

En el ejemplo de Judd, se utiliza:

$Q_{pico} = 2Q$

y:

$J_{net,\ pico} = 1.4\ J_{net}$

lo que modifica sustancialmente el área requerida.

8.16. DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE MEMBRANAS

Una vez determinada el área:

$$V_m = A/\rho A$$

donde:

Vm = volumen mínimo del tanque de membranas, m3

A = área de membrana, m2

ρA = densidad de empaquetamiento, m2/m3

Por ejemplo, si:

A = 20 800 m2

ρA = 45 m2/m3

entonces:

Vm = 20 800/45

Vm = 462 m3

El volumen real debe considerar:

- geometría del módulo;
- espacio libre;
- circulación del licor;
- aireación;
- accesibilidad;
- limpieza;
- mantenimiento.

Judd señala que el tamaño del tanque de membranas debe mantenerse normalmente pequeño para limitar costos, acumulación de sólidos y volumen de reactivos de limpieza.

8.17. RECIRCULACIÓN DEL LICOR MEZCLA

En configuraciones con tanque de membranas separado se requiere una elevada recirculación.

Definimos:

rm = Qmr/Q

donde:

rm = relación de recirculación de membranas, -

Qmr = caudal de recirculación hacia el tanque de membranas, m3/d

Q = caudal tratado, m3/d

Entonces:

$$Qmr = rm\ Q$$

Por ejemplo, si:

$$Q = 10\ 000\ m3/d$$

$$rm = 4$$

entonces:

$$Qmr = 40\ 000\ m3/d$$

Este caudal puede ser varias veces superior al caudal de permeado.

No basta con transportar biomasa: también se quiere controlar la concentración de sólidos e impedir que se acumulen en el tanque de membranas.

Judd señala que una retención excesiva de sólidos en el tanque de membranas puede favorecer el ensuciamiento y que las relaciones de recirculación deben incorporarse al diseño.

8.18. BALANCE GLOBAL DE NITRÓGENO

Cuando se requiere nitrificación y desnitrificación, el cálculo debe separar:

- nitrógeno amoniacal;
- nitrógeno orgánico;
- nitrato;
- biomasa;
- nitrógeno eliminado por purga.

Una aproximación preliminar consiste en calcular el nitrógeno oxidado:

$$NOx = TKN - Ne - Nincorporado$$

donde:

NOx = nitrógeno oxidado a nitrato, kg/d

TKN = nitrógeno total Kjeldahl de alimentación, kg/d

Ne = nitrógeno residual en el efluente, kg/d

Nincorporado = nitrógeno incorporado a biomasa, kg/d

Para la desnitrificación:

NO3 eliminado = NO3 que entra a la zona anóxica - NO3 que sale

El caudal de recirculación interna se escoge según la concentración de nitrato que se quiera alcanzar.

Judd plantea una metodología iterativa: estimar la recirculación, determinar la carga de nitrato, calcular la capacidad de desnitrificación y modificar el HRT anóxico hasta alcanzar una capacidad compatible con la carga.

8.19. DEMANDA DE OXÍGENO

La demanda de oxígeno debe considerar al menos:

1. oxidación de materia orgánica;
2. nitrificación;
3. eventualmente otros consumos;
4. recuperación por desnitrificación.

Una aproximación de diseño puede expresarse como:

$$MO = MOC + MON - MOden$$

donde:

$$MO = \text{demanda neta de oxígeno, } kgO2/d$$

$$MOC = \text{demanda por oxidación de carbono, } kgO2/d$$

$$MON = \text{demanda por nitrificación, } kgO2/d$$

$MOden$ = equivalente de oxígeno recuperado por desnitrificación, $kgO2/d$

En la metodología de Judd aparece una expresión estequiométrica del tipo:

$$MO = Q\,(S - Se) - 1.42\,Mx,bio + 4.33\,Q\,NOx - 2.86\,Q\,(NO3 - NOe)$$

con las magnitudes expresadas consistentemente en kg/d.

La importancia de esta ecuación para Ingeniería Química es que **el diseño de la membrana no puede separarse del diseño de aireación**.

8.20. AIREACIÓN: FUNCIÓN BIOLÓGICA Y FUNCIÓN DE CONTROL DE FOULING

En un MBR sumergido existen dos demandas de aireación conceptualmente diferentes:

Aireación biológica

Su función principal es transferir oxígeno a los microorganismos.

Aireación de membrana

Su función principal es:

- generar turbulencia;
- producir cizallamiento;
- disminuir la deposición de sólidos;
- controlar el fouling.

Una parte del oxígeno de la aireación de membrana puede contribuir al proceso biológico, pero Judd advierte que una estimación simplificada puede sobreestimar esta contribución y que una representación más rigurosa requiere modelos dinámicos.

8.21. DEMANDA ESPECÍFICA DE AIREACIÓN

Para evaluar cómo marcha la operación se emplea además la demanda específica de aireación.

Una forma de expresarla es:

$$SADp = Qa/Qp$$

donde:

SADp = demanda específica de aireación respecto al permeado

Qa = caudal de aire, Nm3/h

Qp = caudal de permeado, m3/h

Debe indicarse cuidadosamente la definición y las unidades utilizadas, porque en la literatura aparecen diferentes formulaciones de SAD.

La revisión reciente de MBR utiliza SAD como parámetro de desempeño asociado a la aireación de membrana.

8.22. RELACIÓN ENTRE FLUJO, MLSS Y FOULING

El flujo no puede seleccionarse independientemente de la concentración de sólidos.

El comportamiento puede conceptualizarse como:

Flujo ↑ → carga sobre membrana ↑ → probabilidad de fouling ↑

MLSS ↑ → sólidos disponibles para depositarse ↑

Aireación ↑ → cizallamiento ↑ → acumulación superficial ↓

Aireación ↑ → consumo energético ↑

Por tanto, existe un problema de optimización:

obtener la máxima producción de permeado y la mejor calidad del agua, con el mínimo fouling y gasto energético posible.

Judd afirma de forma expresa que el flujo sostenible lo fijan la carga de sólidos y la eficacia del air scour o del crossflow.

Figura 8.3

Interacción entre flujo de permeado, MLSS, aireación, TMP y fouling



Nota. Elaboración propia basada en Judd (2011), Strathmann (2011) y Meng et al. (2009).

8.23. FOULING EN MBR

El fouling figura entre los factores que más limitan a los MBR.

Meng et al. identifican como elementos importantes:

- sólidos;
- EPS;
- SMP;
- características de los flóculos;
- propiedades de la membrana;

- concentración de biomasa;
- condiciones hidráulicas.

Meng et al. concluyen en su revisión que el fouling y el costo de las membranas frenan en gran medida la expansión de los MBR, y examinan las estrategias de control y el desarrollo de materiales nuevos.

8.24. RESISTENCIA TOTAL A LA FILTRACIÓN

La formulación básica de resistencias en serie es:

$$J = \Delta P / [\mu(Rm + Rf)]$$

donde:

J = flujo de permeado, m/s

ΔP = presión transmembrana efectiva, Pa

μ = viscosidad dinámica, Pa·s

Rm = resistencia hidráulica de la membrana, 1/m

Rf = resistencia adicional producida por fouling, 1/m

Puede ampliarse:

$$Rt = Rm + Rcp + Rf + Rc$$

donde:

Rt = resistencia total, 1/m

Rm = resistencia intrínseca de la membrana, 1/m

Rcp = resistencia asociada a polarización/concentración, 1/m

Rf = resistencia de fouling, 1/m

Rc = resistencia de cake o capa superficial, 1/m

Strathmann presenta la interpretación de las resistencias de membrana y capa superficial como resistencias en serie.

8.25. POLARIZACIÓN Y CAPA DE SÓLIDOS

Strathmann muestra que cuando se forma una capa superficial, aumentar la presión puede producir inicialmente un incremento del flujo, pero posteriormente la acumulación de material aumenta la resistencia y el flujo puede volver a disminuir.

Una representación conceptual útil para el MBR es:

Bulk → capa límite → capa de sólidos → membrana → permeado

El diseñador debe distinguir entre:

polarización por concentración

y:

fouling irreversible o parcialmente reversible.

Esta distinción será fundamental cuando estudiemos el Capítulo 10.

8.26. FLUJO CRÍTICO Y FLUJO SOSTENIBLE

No debe interpretarse que el mayor flujo posible sea necesariamente el mejor flujo de diseño.

Podemos distinguir:

Flujo crítico

Valor de flujo desde el cual la deposición o el fouling se aceleran.

Flujo sostenible

Flujo que puede mantenerse durante un periodo operativo aceptable sin una acumulación de fouling económicamente inaceptable.

Para diseño:

Jdiseño < Jsostenible

debe ser una regla conceptual básica.

El valor de diseño debe determinarse mediante ensayos piloto, información del fabricante y experiencia con aguas de características semejantes.

8.27. LIMPIEZA Y RECUPERACIÓN DE PERMEABILIDAD

La operación de un MBR incluye generalmente:

- relajación;
- backwash;
- limpieza de mantenimiento;
- limpieza de recuperación.

Judd documenta que los protocolos de limpieza dependen de la configuración y de las condiciones de operación. Por ejemplo, presenta para plantas municipales intervalos y concentraciones diferentes para hipoclorito y ácido cítrico.

Por ello no es recomendable presentar una única "receta de limpieza" en un libro de diseño.

La estrategia correcta es:

1. identificar la causa del fouling;
2. determinar si es reversible;
3. seleccionar el método de limpieza;
4. establecer concentración;
5. establecer tiempo;
6. evaluar recuperación;
7. analizar el costo;
8. verificar impacto sobre la membrana.

8.28. MODELAMIENTO DE MBR

El modelamiento puede dividirse en tres niveles.

Nivel 1. Modelo algebraico

Utiliza:

- balances;
- ecuaciones de flujo;
- relaciones empíricas;
- ecuaciones cinéticas simplificadas.

Es adecuado para:

- predimensionamiento;
- hojas de cálculo;
- análisis preliminar;
- docencia.

Nivel 2. Modelo dinámico

Utiliza ecuaciones diferenciales:

dMx/dt = transporte + conversión

donde:

Mx = masa del componente x en el sistema, kg

t = tiempo, d

"Transporte" representa entradas, salidas, recirculaciones y transferencia.

"Conversión" representa las reacciones biológicas.

Judd presenta esta estructura general para los modelos dinámicos de MBR.

Nivel 3. Modelo ASM

Los modelos ASM permiten representar simultáneamente:

- materia orgánica;
- biomasa heterótrofa;
- biomasa autótrofa;
- NH4;
- NO3;
- PO4;
- oxígeno disuelto;
- procesos de crecimiento;
- decaimiento;
- nitrificación;
- desnitrificación.

Judd señala que ASM1, ASM2, ASM2d y ASM3 se han aplicado a MBR, aunque también advierte que la aplicabilidad directa de parámetros desarrollados para lodos activados convencionales debe analizarse cuidadosamente.

8.29. ESTRUCTURA DE UN MODELO DINÁMICO

Para cada componente:

Acumulación = entrada - salida + generación - consumo

Por ejemplo, para el sustrato soluble:

V dS/dt = Q (S0 - S) - V rS

Para biomasa:

V dX/dt = producción - decaimiento + entrada - salida

Para oxígeno:

V dDO/dt = transferencia de O2 - consumo biológico + entrada - salida

Estas ecuaciones constituyen la base de una simulación.

8.30. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Un modelo no debe considerarse validado simplemente porque produce una curva razonable.

Judd recomienda una secuencia de calibración que comienza con:

1. balance de sólidos;
2. modelo de aireación;
3. nitrificación;
4. desnitrificación;
5. eliminación de fósforo.

Calibrar es ajustar los parámetros del modelo hasta que reproduzca los datos que se observan en la planta.

8.31. VALIDACIÓN

Una vez calibrado el modelo debe probarse con datos diferentes de los utilizados para calibrarlo.

Por ejemplo:

Datos A → calibración

Datos B → validación

No debe hacerse:

Datos A → calibración

Datos A → validación

porque eso no constituye una validación independiente.

8.32. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Una vez construido el modelo, el ingeniero debe determinar qué parámetros afectan más el resultado.

Por ejemplo:

Cambiar SRT ±20 %

Cambiar MLSS ±20 %

Cambiar flujo ±10 %

Cambiar temperatura ±5 °C

Cambiar aireación ±20 %

y observar:

- COD;
- NH4;
- NO3;
- TMP;
- permeabilidad;
- consumo energético.

La sensibilidad permite identificar qué variables deben ser controladas con mayor precisión.

8.33. EJEMPLO INTEGRADO DE PREDIMENSIONAMIENTO

Consideremos una planta con:

$$Q = 10\,000\ m^3/d$$

$$COD = 500\ mg/L$$

BOD biodegradable = 250 mg/L

$$TKN = 40\ mg/L$$

$$MLSS = 8\ kg/m^3$$

$$HRT = 8\ h$$

$$SRT = 20\ d$$

$$J = 20\ LMH$$

Paso 1. Volumen biológico

$$V = Q\ HRT/24$$

$$V = 10\,000 \times 8/24$$

$$V = 3\,333\ m^3$$

Paso 2. Área de membrana

$$J = 20\ LMH$$

$$J = 0.48\ m3/(m2 \cdot d)$$

$$A = 10\ 000/0.48$$

$$A = 20\ 833\ m2$$

Paso 3. Masa de MLSS

$$MMLSS = V\ X$$

$$MMLSS = 3\ 333 \times 8$$

$$MMLSS = 26\ 664\ kg$$

Paso 4. Carga de BOD

$$LBOD = Q\ S$$

$$LBOD = 10\ 000 \times 0.250$$

$$LBOD = 2\ 500\ kg\ BOD/d$$

Paso 5. F/M

$$F/M = 2\ 500/26\ 664$$

$$F/M = 0.094\ d^{-1}$$

Este resultado muestra una condición de baja relación F/M, coherente con un sistema que trabaja con una masa de sólidos elevada.

Paso 6. SRT y purga aproximada

Si suponemos, como primera aproximación, que la masa de sólidos purgada por día es:

$$Mpurga = MMLSS/SRT$$

$$Mpurga = 26\ 664/20$$

$$Mpurga = 1\ 333\ kg/d$$

Si:

$$Xpurga = 10\ kg/m3$$

entonces:

$$Qw = 1\ 333/10$$

$$Qw = 133\ m3/d$$

Este resultado es solamente preliminar porque el balance real debe incluir sólidos inertes, producción de biomasa, decaimiento y corrientes adicionales.

8.34. INTERPRETACIÓN INGENIERIL DEL EJEMPLO

El ejemplo permite observar algo fundamental:

El área de membrana se determina principalmente por:

Q/J

mientras que el volumen biológico se relaciona con:

Q × HRT

y la masa de biomasa con:

V × MLSS

Por tanto, un MBR posee **tres dimensiones de diseño interrelacionadas**:

1. dimensión hidráulica;
2. dimensión biológica;
3. dimensión de separación por membranas.

No debe diseñarse cada una independientemente.

8.35. MBR PARA AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

El MBR no se debe analizar solo desde el ámbito municipal.

En aguas industriales pueden aparecer:

- aceites;
- grasas;
- hidrocarburos;
- compuestos fenólicos;
- metales;
- altas concentraciones de COD;
- compuestos tóxicos;
- variaciones bruscas de carga.

Jijingi et al. destacan en su revisión el empleo del MBR en aguas residuales industriales; según ellos, para tener éxito se requiere caracterizar el influente, pretratar, seleccionar la membrana, controlar el MLSS, airear bien y definir estrategias de limpieza.

En consecuencia:

MBR no significa que pueda omitirse el pretratamiento.

Por el contrario, para determinados efluentes industriales el pretratamiento es crítico.

8.36. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA UN MBR INDUSTRIAL

Antes de seleccionar un MBR debe analizarse:

Caracterización hidráulica

- Qpromedio
- Qmáximo
- variabilidad horaria
- variabilidad diaria

Caracterización química

- COD
- BOD
- TKN
- NH4
- fósforo
- salinidad
- pH
- temperatura
- toxicidad

Caracterización física

- TSS
- tamaño de partículas
- aceites y grasas
- coloides

Caracterización biológica

- biodegradabilidad;

- inhibición;
- actividad microbiana.

En la revisión de 2024 se subraya que la tecnología debe ajustarse a las características particulares del agua industrial y que, cuando haga falta, se use pretratamiento.

8.37. VENTAJAS Y LIMITACIONES

Ventajas

- alta calidad del permeado;
- elevada retención de sólidos;
- posibilidad de trabajar con SRT elevado;
- menor requerimiento de espacio;
- buena nitrificación;
- posibilidad de reutilización del agua;
- separación sólido-líquido independiente de la sedimentabilidad.

Los trabajos recientes destacan, entre las ventajas, una menor huella espacial y un agua tratada de alta calidad.

Limitaciones

- fouling;
- consumo energético;
- necesidad de aireación;
- limpieza;
- reemplazo de membranas;
- sensibilidad a determinadas características del influente;
- complejidad operacional.

Por tanto, el MBR no debe presentarse como "superior en todos los casos".

La pregunta de ingeniería correcta es:

¿Es el MBR la alternativa con menor costo total y mejor desempeño para las características específicas del agua residual?

8.38. ENERGÍA

Para un MBR sumergido:

Etotal = Eaeración + Ebombeo + Eotros

Una aproximación de energía de bombeo es:

$$P = Q \Delta P / \eta$$

donde:

P = potencia, W

Q = caudal, m3/s

ΔP = incremento de presión, Pa

η = eficiencia global de bombeo, -

La energía diaria:

$$E = P t$$

donde:

E = energía, J

t = tiempo, s

En MBR sumergidos, la aireación puede representar una fracción importante del OPEX. Judd señala que la aireación cumple simultáneamente la función de mantener la biomasa suspendida y controlar la membrana, y que la energía de aireación constituye un componente importante de los costos operacionales.

8.39. OPTIMIZACIÓN DEL MBR

El problema de optimización puede plantearse conceptualmente como:

Minimizar:

Costo total = CAPEX + OPEX

sujeto a:

CODefluente ≤ límite

NH4, efluente ≤ límite

NO3, efluente ≤ límite

TMP ≤ TMPmáxima

J ≥ Jmínimo

calidad del permeado ≥ especificación

Una función objetivo simplificada podría ser:

Ctotal = Cmem + Caer + Cpump + Cchem + Csludge + Cmaintenance

donde cada término representa el costo correspondiente.

Esto transforma el MBR de una simple unidad de tratamiento en un **problema de optimización de procesos**.

8.40. MBR Y ECONOMÍA CIRCULAR

Una tendencia importante es dejar de considerar el MBR únicamente como una tecnología de eliminación de contaminantes.

Puede formar parte de una estrategia de:

agua residual → tratamiento → reutilización → recuperación de recursos

Los recursos potencialmente recuperables incluyen:

- agua;
- nutrientes;
- biogás en sistemas anaerobios;
- energía;
- determinados compuestos de interés.

La revisión de aplicaciones industriales señala explícitamente el potencial de los MBR dentro de estrategias de reutilización del agua y recuperación de recursos.

8.41. TECNOLOGÍAS EMERGENTES

Las tecnologías emergentes deben presentarse en este libro como una **extensión del conocimiento**, no como sustitutos de los fundamentos.

Entre ellas se encuentran:

- AnMBR;
- MBR anaerobio;
- MBR híbridos;
- FO-MBR;
- MD-MBR;

- membranas modificadas;
- materiales nanocompuestos;
- procesos electroquímicos acoplados;
- control avanzado;
- modelos de aprendizaje automático.

La literatura reciente muestra que existe investigación activa en configuraciones híbridas, materiales avanzados y estrategias de reducción de fouling.

Pero para el ingeniero que debe diseñar una planta, la prioridad sigue siendo:

balance → cinética → membrana → aireación → fouling → energía → costo.

8.42. PROCEDIMIENTO GENERAL DE DISEÑO DE UN MBR

Recomiendo que el estudiante utilice la siguiente secuencia como algoritmo de diseño.

Paso 1. Caracterizar el agua

Determinar:

Q, COD, BOD, TSS, TKN, NH4, NO3, P, pH, temperatura.

Paso 2. Definir calidad del permeado

Establecer límites de:

COD, BOD, TSS, NH4, NO3, microorganismos.

Paso 3. Seleccionar configuración

- sumergido;
- externo.

Paso 4. Seleccionar membrana

- HF;
- placa plana.

Paso 5. Seleccionar flujo

Jdiseño

Paso 6. Calcular área

$$A = Qp/J$$

Paso 7. Seleccionar HRT

$$V = Q\ HRT$$

Paso 8. Seleccionar MLSS

X

Paso 9. Calcular masa de sólidos

$$M = VX$$

Paso 10. Determinar SRT

$$SRT = \text{masa de sólidos / purga diaria}$$

Paso 11. Comprobar F/M

$F/M = QS/(VX)$

Paso 12. Comprobar nitrificación

Utilizar Monod y SRT.

Paso 13. Diseñar desnitrificación

Determinar:

- recirculación;
- volumen anóxico;
- carga de nitrato.

Paso 14. Calcular oxígeno

MO = demanda carbonácea + demanda de nitrificación - recuperación por desnitrificación

Paso 15. Diseñar aireación

Separar:

- aireación biológica;
- aireación de membranas.

Paso 16. Verificar fouling

Analizar:

- flujo;
- MLSS;
- aireación;

- resistencia;
- TMP.

Paso 17. Calcular energía

$$E = Eaer + Epump + Eaux$$

Paso 18. Evaluar costos

CAPEX + OPEX.

Paso 19. Simular

Modelo estacionario → modelo dinámico.

Paso 20. Calibrar y validar

Comparar con datos experimentales o de planta.

Figura 8.4

Metodología integrada para el diseño, simulación y validación de un MBR

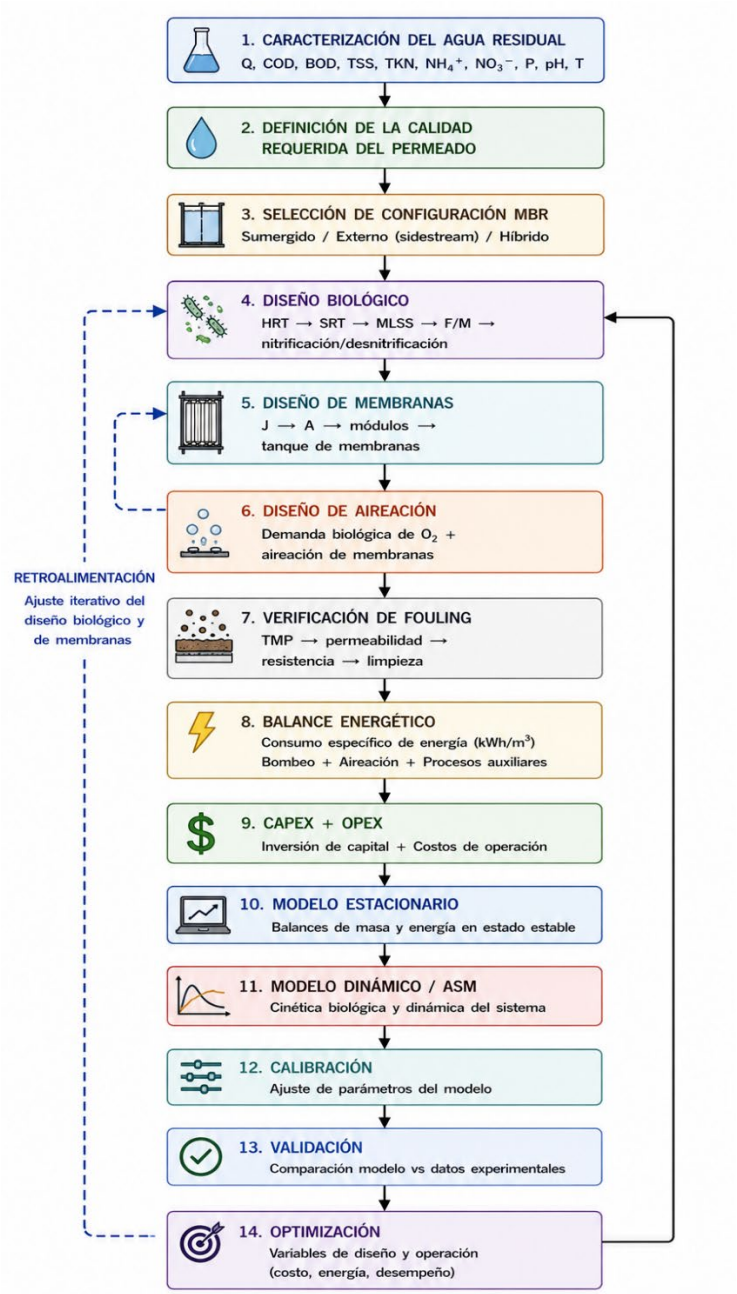


Figura: Metodología integrada para el diseño, modelamiento, calibración, validación y optimización de un biorreactor de membranas.

Nota. Elaboración propia basada en Judd (2011) y Strathmann (2011).

8.43. ERRORES FRECUENTES EN EL DISEÑO DE MBR

1. Diseñar la membrana únicamente con el caudal promedio.
2. Utilizar flujo instantáneo en lugar de flujo neto.
3. Confundir HRT con SRT.
4. Suponer que aumentar MLSS siempre mejora el proceso.

5. Ignorar la viscosidad y sus efectos sobre transferencia y permeabilidad.
6. No considerar el efecto del fouling sobre la resistencia total.
7. Diseñar el reactor biológico sin considerar la capacidad de aireación.
8. Utilizar parámetros cinéticos sin verificar su aplicabilidad.
9. Calibrar un modelo y llamarlo inmediatamente "validado".
10. Diseñar un MBR industrial sin caracterizar toxicidad e inhibición.
11. No considerar los sólidos inertes del influente.
12. Seleccionar la membrana antes de caracterizar el agua.
13. Minimizar CAPEX aumentando excesivamente el flujo.
14. Reducir aireación para ahorrar energía sin verificar el efecto sobre fouling.
15. Mirar nada más la calidad del permeado, sin incluir el costo total de todo el ciclo de vida.

8.44. PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 8.1. Área de membrana

Una planta procesa 15 000 m3/d. El flujo neto de diseño es 18 LMH.

Determinar:

a) flujo en m3/(m2·d);

b) área de membrana;

c) área extra si el factor de diseño aplicado es de 15 %.

Problema 8.2. HRT

Una planta tiene:

$$Q = 12\,000 \text{ m3/d}$$

$$V = 4\,000 \text{ m3}$$

Calcular el HRT en horas.

Problema 8.3. SRT

Un reactor contiene:

$$V = 5\,000 \text{ m3}$$

$$X = 8 \text{ kg/m3}$$

La purga contiene:

$$Qw = 100 \text{ m3/d}$$

$$Xw = 10 \text{ kg/m3}$$

Calcular el SRT.

Problema 8.4. F/M

Una planta recibe:

$$Q = 8\,000 \text{ m3/d}$$

$S0 = 0.30$ kg/m3

$$V = 3\,000 \text{ m3}$$

$$X = 8 \text{ kg/m3}$$

Determinar F/M.

Problema 8.5. Diseño integrado

Para una planta con:

$$Q = 20\,000 \text{ m3/d}$$

$$HRT = 8 \text{ h}$$

$$SRT = 20 \text{ d}$$

$$MLSS = 8 \text{ kg/m3}$$

$$J = 20 \text{ LMH}$$

determinar:

a) volumen biológico;

b) masa de MLSS;

c) área de membrana;

d) F/M si BOD = 250 mg/L.

8.45. PREGUNTAS DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Por qué un MBR puede operar con SRT elevado y HRT relativamente bajo?
2. ¿Cuál es la diferencia conceptual entre HRT y SRT?
3. ¿Cómo se calcula el área de membrana?
4. ¿Por qué debe utilizarse flujo neto en lugar de flujo instantáneo para ciertos cálculos?
5. ¿Cómo afecta MLSS al diseño?

6. ¿Qué representa F/M?
7. ¿Por qué los nitrificantes requieren especial atención en el diseño?
8. ¿Qué diferencia existe entre un MBR sumergido y uno externo?
9. ¿Por qué el aumento del flujo puede aumentar el fouling?
10. ¿Qué función tiene la aireación de membrana?
11. ¿Por qué la aireación constituye simultáneamente una herramienta de transferencia de oxígeno y de control de fouling?
12. ¿Qué representa la resistencia total de filtración?
13. ¿Cuál es la diferencia entre polarización por concentración y fouling?
14. ¿Por qué un modelo dinámico puede ser superior a un modelo estacionario?
15. ¿Qué significa calibrar un modelo?
16. ¿Qué significa validar un modelo?
17. ¿Por qué los parámetros ASM deben utilizarse con precaución?
18. ¿Qué variables deberían incluirse en un análisis de sensibilidad?
19. ¿Por qué el MBR puede ser atractivo para aguas residuales industriales?
20. ¿Por qué el pretratamiento puede ser crítico antes de un MBR industrial?

8.46. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

El diseño de un MBR puede resumirse mediante la siguiente cadena:

Caracterización del agua → balance de materia → cinética biológica → HRT → SRT → MLSS → F/M → área de membrana → flujo → aireación → fouling → energía → costos → simulación → calibración → validación.

La principal enseñanza de este capítulo es que **un MBR no es simplemente un reactor biológico al que se le ha agregado una membrana**.

Es un sistema integrado en el que:

biología + hidráulica + transferencia de masa + separación por membranas + aireación + control de fouling + energía

deben diseñarse conjuntamente.

CAPÍTULO 9

ELECTRODIÁLISIS, ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE Y ELECTRODEIONIZACIÓN

9.1. INTRODUCCIÓN

En la electrodiálisis (ED), un campo eléctrico impulsa los iones de una solución acuosa a través de membranas de intercambio iónico; se trata de un proceso de separación con membranas que funciona con electricidad. La ósmosis inversa y otros procesos movidos por presión separan principalmente según el tamaño molecular. La ED no opera así: separa por carga eléctrica y por cuán selectivas son las membranas frente a ciertos iones.

Bajo el campo eléctrico, los cationes se desplazan al cátodo y los aniones al ánodo. Las membranas catiónicas dejan pasar sobre todo cationes; las aniónicas, sobre todo aniones. Colocarlas de forma alterna crea compartimentos donde la solución se desmineraliza y otros donde se concentra.

Esta característica permite plantear la electrodiálisis desde una perspectiva de ingeniería química mediante balances de materia, balances de carga, transporte iónico, resistencia eléctrica, corriente, densidad de corriente, área de membrana, número de pares de celdas, consumo energético y recuperación de agua.

Este capítulo no busca repasar todas las aplicaciones de la electrodiálisis. Lo que se quiere es que el estudiante de maestría y el profesional interesado respondan una pregunta de ingeniería de mayor peso:

Si se conocen las características del agua de alimentación y la calidad que debe tener el agua producto, ¿cómo se estima si ED, EDR o EDI son técnicamente viables, y cuáles son las variables principales de diseño y operación?

La electrodiálisis tiene especial interés para aguas salobres, corrientes industriales y procesos de recuperación de especies iónicas. Sin embargo, solamente remueve especies iónicas y no constituye por sí misma una barrera para microorganismos ni para compuestos orgánicos no ionizados. Por ello, la selección de ED debe realizarse

considerando conjuntamente la composición del agua, el pretratamiento, la calidad requerida y los costos de operación y mantenimiento.

9.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA ELECTRODIÁLISIS

Entre una membrana de intercambio catiónico (CEM) y otra de intercambio aniónico (AEM) queda un compartimento de solución; así se arma la unidad elemental de electrodiálisis.

Cuando se aplica una diferencia de potencial:

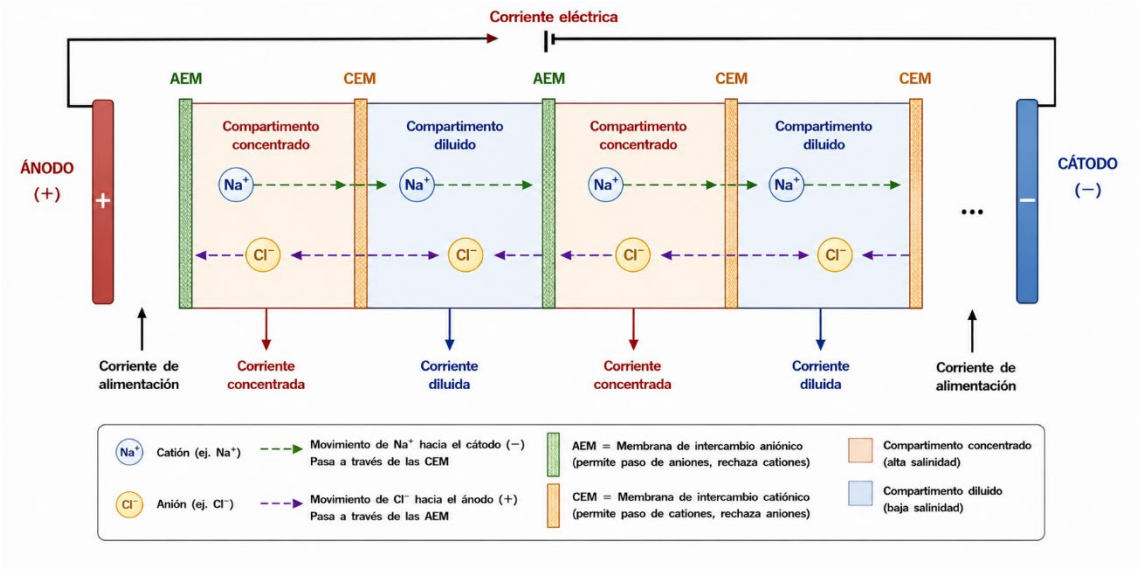
- los cationes migran hacia el cátodo;
- los aniones migran hacia el ánodo;
- la CEM permite el transporte preferente de cationes;
- la AEM permite el transporte preferente de aniones.

La repetición de esta disposición produce un conjunto de compartimentos alternados de diluido y concentrado.

Una pila industrial puede contener cientos de membranas. Eléctricamente, membranas y soluciones suman una resistencia total; para el transporte, en cambio, cada par de membranas es una unidad que se repite. Según Bernardes et al., lo ideal son membranas de poca resistencia, y la solución diluida puede aportar buena parte de la resistencia del sistema.

Figura 9.1

Principio de funcionamiento de una pila de electrodiálisis



Nota. Elaboración propia basada en Bernardes et al. (2014).

9.3. MEMBRANAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

Las membranas utilizadas en ED pueden considerarse como resinas de intercambio iónico conformadas como películas. Se clasifican principalmente en:

Membranas de intercambio catiónico (CEM)

Permiten el paso preferente de cationes y rechazan los aniones.

Membranas de intercambio aniónico (AEM)

Permiten el paso preferente de aniones y rechazan los cationes.

Una CEM puede contener grupos funcionales negativos, por ejemplo, grupos sulfónicos, mientras que una AEM puede contener grupos funcionales positivos, como grupos de amonio cuaternario. Los grupos fijos determinan qué especies funcionan como contraiones y cuáles son excluidas como coiones.

Para seleccionar una membrana interesan particularmente:

- permselectividad;
- resistencia eléctrica;
- capacidad de intercambio;
- estabilidad química;
- estabilidad mecánica;
- resistencia al ensuciamiento;
- estabilidad frente a pH;

- temperatura de operación.

Al diseñar, la capacidad de intercambio no basta para decidir qué membrana usar. Una resistencia eléctrica alta en la membrana puede elevar mucho el gasto de energía de la pila.

9.4. ESTRUCTURA DE UNA PILA DE ELECTRODIÁLISIS

Una pila ED está constituida por:

- placas terminales;
- electrodos;
- membranas CEM;
- membranas AEM;
- espaciadores;
- distribuidores y colectores;
- sistema de alimentación eléctrica;
- sistemas hidráulicos de alimentación y recirculación.

El elemento repetitivo se denomina **par de celdas**.

Una disposición simplificada puede representarse como:

AEM + espaciador de concentrado + CEM + espaciador de diluído

La repetición de este conjunto permite incrementar la capacidad de tratamiento.

Bernardes et al. plantean que, en teoría, cada Faraday que atraviesa un par de membranas moviliza cerca de un equivalente de electrolito, desde el compartimento diluido hacia el concentrado. De ahí que cuántos pares de celdas tenga la pila se vincule directamente con su capacidad de transporte iónico.

Los espaciadores tienen una doble función: mantener separadas las membranas y establecer condiciones hidráulicas apropiadas. Los diseños de flujo laminar o de trayectoria tortuosa modifican la velocidad, la caída de presión y la transferencia de masa. En el material de Bernardes et al., las velocidades indicadas para determinados diseños están en el intervalo de aproximadamente 2–4 cm/s para flujo tipo lámina y 6–12 cm/s para trayectorias tortuosas.

9.5. TRANSPORTE IÓNICO Y NÚMERO DE TRANSPORTE

El transporte eléctrico de una especie iónica puede expresarse mediante su número de transporte.

Para un ion j:

$t_j^m = z_j F J_j^m / i$

donde:

t_j^m: el número de transporte que corresponde al ion j dentro de la membrana

z_j = carga del ion

F = constante de Faraday

J_j^m: flujo molar con el que el ion j cruza la membrana, en unidades molares

i = densidad de corriente

La expresión vincula en forma directa la materia transportada con la carga transportada.

En un ensayo donde se conocen el volumen de solución, la variación de concentración, el área de membrana y el tiempo, se puede aplicar lo siguiente:

$J_j^m = V (C_{j, f} - C_{j,0}) / (A t)$

donde los signos se interpretan según la dirección de transporte que se haya elegido.

La combinación de estas ecuaciones permite determinar experimentalmente el número de transporte de una especie.

9.6. PERMSELECTIVIDAD

La permselectividad indica en qué medida una membrana transporta de preferencia sus contraiones y rechaza los coiones.

Una expresión empleada para evaluarla es:

$$P = (t_j^m - t_j^m)/(1 - t_j^s)$$

donde:

P = permselectividad

t_j^m = número de transporte del ion en la membrana

t_j^s = número de transporte del ion en la solución.

Esta relación permite comprender por qué una membrana no puede considerarse ideal. La corriente real puede incluir contribuciones de diferentes especies y, por tanto, la corriente eléctrica no se transforma completamente en transferencia de la sal de interés.

9.7. BALANCE DE MATERIA EN UN PROCESO DE ELECTRODIÁLISIS

Para una operación continua, el balance global de agua puede expresarse como:

$$Qf = Qd + Qc + Qp$$

dependiendo de la configuración específica y de si existen corrientes adicionales.

Como aproximación sencilla, donde se toman en cuenta la alimentación, el diluido y el concentrado:

$$Qf = Qd + Qc$$

El balance de una sal puede escribirse como:

$$Qf\,Cf = Qd\,Cd + Qc\,Cc$$

donde:

Qf = caudal de alimentación

Qd = caudal de diluido

Qc = caudal de concentrado

Cf = concentración de sal en la alimentación

Cd = concentración de sal en el diluido

Cc = concentración de sal en el concentrado.

Esta ecuación constituye uno de los puntos de partida del diseño.

Ejemplo 9.1. Balance de materia

Se desea tratar:

$$Qf = 100\ m3/d$$

con:

$$Cf = 2.0\ g/L$$

y obtener un diluido:

$$Cd = 0.50\ g/L.$$

Si se supone que el caudal del diluido es:

$$Qd = 90\ m3/d$$

determinar el caudal del concentrado y su concentración media.

Del balance de agua:

$$Qc = 100 - 90 = 10 \text{ m3/d}$$

Balance de sal:

$100(2.0) = 90(0.50) + 10Cc$

$200 = 45 + 10Cc$

$$Cc = 15.5 \text{ g/L}$$

Por tanto:

Qd = 90 m3/d

Qc = 10 m3/d

Cc = 15.5 g/L

Este cálculo es preliminar. En un diseño real deben considerarse transferencia de agua, electroósmosis, ósmosis, fugas hidráulicas y las características reales del concentrado.

9.8. EXTRACCIÓN DE SAL

La extracción porcentual de una especie i puede calcularse mediante:

$E_i\ (\%) = [(M_i, 0 - M_i, t)/M_i, 0] \times 100$

donde:

$M_i, 0$ = masa inicial de la especie

M_i, t = masa final de la especie.

Esta métrica sirve a Bernardes et al. para valorar cómo rinde el tratamiento por electrodiálisis.

Para un sistema continuo, una expresión equivalente basada en caudales es:

$E_i\ (\%) = [(Qf\ Cf - Qd\ Cd)/(Qf\ Cf)] \times 100$

suponiendo que las demás corrientes no aportan al balance de esa especie.

9.9. CORRIENTE ELÉCTRICA REQUERIDA

La ley de Faraday permite establecer una primera estimación de la corriente necesaria para transportar una determinada cantidad de carga.

La carga eléctrica es:

$$Qe = I\ t$$

y:

$n_e = I\,t/F$

donde:

Qe = carga eléctrica

I = corriente

t = tiempo

n_e = cantidad de equivalentes transportados

F = constante de Faraday.

Si se desea transportar una cantidad de sal equivalente a N_{eq}:

$I_{teórica} = N_{eq}\,F/t$

En una pila real debe introducirse la eficiencia de corriente:

$I_{real} = I_{teórica}/\eta c$

donde:

ηc = eficiencia de corriente expresada como fracción.

Por ejemplo, para una eficiencia de 85 %:

$\eta c = 0.85$

y:

$I_{real} = I_{teórica}/0.85$

Esto muestra inmediatamente por qué la eficiencia de corriente es una variable económica fundamental.

9.10. EFICIENCIA DE CORRIENTE

En una pila real, no toda la corriente contribuye al transporte de la sal de interés.

Las causas incluyen:

- selectividad imperfecta de las membranas;
- corrientes parásitas;
- transferencia de agua;
- electroósmosis;
- ósmosis;

- transporte de H+ y OH−;
- reacciones asociadas con polarización.

Para Bernardes et al., la eficiencia de corriente es la relación entre el electrolito efectivamente transferido y la carga eléctrica aplicada.

Para un proceso por lotes puede expresarse, de manera general, como:

$$\eta c = F(V0\ C0 - Vf\ Cf)/(n\ I\ \Delta t)$$

donde:

V0 = volumen inicial del diluido

Vf = volumen final del diluido

C0 = concentración inicial expresada en equivalentes/L

Cf = concentración final expresada en equivalentes/L

n = número de pares de membranas

I = corriente

Δt = tiempo.

Esta ecuación es particularmente útil para interpretar resultados experimentales.

Ejemplo 9.2. Eficiencia de corriente

Supóngase:

V0 = 100 L

Vf = 100 L

C0 = 0.020 eq/L

Cf = 0.005 eq/L

n = 20 pares

I = 10 A

Δt = 3600 s

La cantidad de equivalentes retirados es:

$$\Delta N_{eq} = 100(0.020 - 0.005)$$

$$\Delta N_{eq} = 1.5\ eq$$

La carga teórica correspondiente es:

$$Q_{teórica} = 1.5(96485)$$

$$Q_{teórica} = 144728\ C$$

La carga aplicada es:

Qaplicada = 10(3600)

Qaplicada = 36000 C

Aquí se observa que los datos hipotéticos planteados son incompatibles con la interpretación de la ecuación si se pretende atribuir los 1.5 eq a solo 20 pares durante una hora y 10 A. Por tanto, **el cálculo también funciona como prueba de consistencia de datos experimentales**.

Esta observación es importante para el estudiante de maestría: antes de calcular una eficiencia, debe verificarse que los datos de concentración, volumen, número de pares, corriente y tiempo sean físicamente compatibles.

9.11. POLARIZACIÓN DE CONCENTRACIÓN

En ED, la polarización de concentración es de las restricciones operativas principales.

La corriente en la solución la llevan cationes y aniones, pero dentro de la membrana mandan los contraiones. Como los números de transporte difieren, aparecen gradientes de concentración pegados a las superficies de las membranas.

Se forman así capas límite de difusión.

En el compartimento diluido:

$C_m < C_b$

donde:

C_m = concentración próxima a la superficie de la membrana

C_b = concentración en el seno de la solución.

Cuando la densidad de corriente aumenta, C_m puede aproximarse a cero. El valor de corriente correspondiente se denomina **densidad de corriente límite**.

9.12. DENSIDAD DE CORRIENTE LÍMITE

La expresión presentada por Marder y Pérez Herranz en Bernardes et al. es:

$i_{lim} = C0\ D\ z_j\ F / [\delta(t_j^m - t_j^s)]$

donde:

i_{lim} = densidad de corriente límite

C0 = concentración del electrolito

D = coeficiente de difusión

z_j = carga del ion

F = constante de Faraday

δ = espesor de la capa límite

t_j^m = número de transporte del ion en la membrana

t_j^s = número de transporte del ion en la solución.

Esta ecuación permite obtener una conclusión de diseño fundamental:

Si mejora la transferencia de masa hacia la membrana, sube i_lim; si se engrosa la capa límite, i_lim baja.

Por esa razón, una mayor velocidad de flujo puede subir la densidad de corriente límite, pues la polarización de concentración disminuye.

Criterio práctico de operación

No debe seleccionarse simplemente:

$$i = i_{lim}$$

como criterio automático de diseño.

Una primera aproximación de ingeniería puede utilizar:

$i_{operación} = f\, i_{lim}$

donde:

$f < 1$

y f debe definirse con base en ensayos, en las propiedades del agua y de las membranas, y en el margen de seguridad operacional.

9.13. ¿QUÉ OCURRE CUANDO SE SUPERA LA CORRIENTE LÍMITE?

Al superar la región límite pueden aparecer:

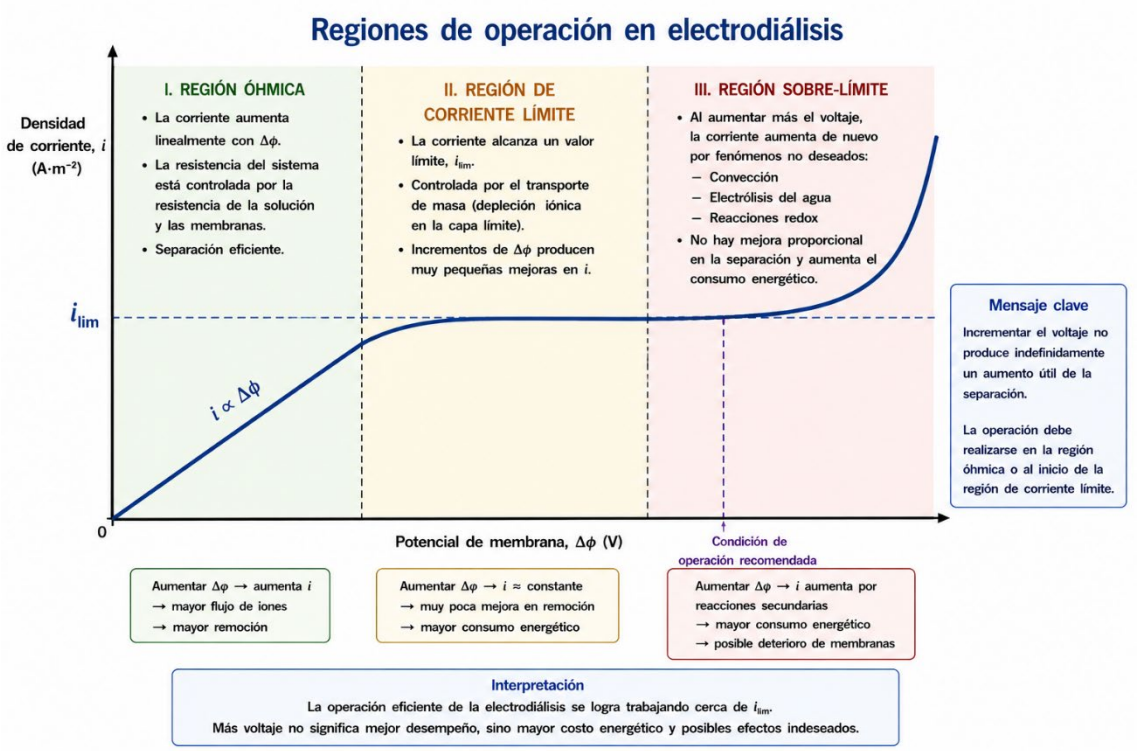
- incremento importante de resistencia;
- disociación del agua;
- generación de H^+ y OH^-;
- modificaciones locales de pH;

- precipitación de hidróxidos;
- electroconvección;
- disminución de eficiencia;
- deterioro de membranas.

Bernardes et al. muestran que la región posterior al límite puede involucrar disociación del agua, efectos de exaltación, convección gravitacional y electroconvección.

Figura 9.2

Curva corriente–potencial y densidad de corriente límite



Nota. Elaboración propia basada en Marder y Pérez Herranz, en Bernardes et al. (2014).

La Figura 4.2 de Bernardes et al. constituye el antecedente directo de esta representación y muestra precisamente las tres regiones características de la relación corriente-potencial.

9.14. INFLUENCIA DEL FLUJO

El aumento de la velocidad de flujo puede:

- reducir el espesor de la capa límite;
- aumentar la transferencia de masa;

- disminuir la polarización;
- incrementar la densidad de corriente límite.

Pero existe una contrapartida:

- aumenta la caída de presión;
- aumenta la potencia de bombeo;
- puede aumentar los costos de operación.

Por tanto:

mayor velocidad ≠ siempre mejor operación.

La selección debe realizarse mediante una optimización conjunta de:

transferencia de masa + consumo eléctrico + potencia de bombeo + calidad del producto.

Los datos de Bernardes et al. muestran claramente esta relación: las configuraciones de flujo tortuoso pueden ofrecer velocidades mayores y mejor control de polarización, pero también presentan mayores pérdidas de presión.

9.15. ENSUCIAMIENTO Y SCALING

Los principales problemas que afectan las membranas incluyen:

- materia suspendida;
- coloides;
- materia orgánica;
- microorganismos;
- metales;
- Ca2+;
- Ba2+;
- Sr2+;
- carbonatos;
- hidróxidos;
- silicatos.

La precipitación puede aumentar la resistencia eléctrica de la pila y también incrementar la pérdida de presión hidráulica. Los aniones orgánicos y coloides pueden afectar especialmente las membranas aniónicas.

Por ello, el pretratamiento debe diseñarse específicamente para la alimentación.

Un esquema conceptual es:

Agua de alimentación

→ eliminación de sólidos

→ reducción de coloides

→ control de materia orgánica

→ control de especies precipitables

→ filtración de seguridad

→ ED/EDR

El pretratamiento no debe ser idéntico al de RO por definición. Una de las ventajas de ED/EDR es que, en determinadas aplicaciones, puede requerir menor pretratamiento que RO.

9.16. ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE (EDR)

La electrodiálisis reversible modifica periódicamente la polaridad eléctrica y simultáneamente invierte las corrientes hidráulicas.

Durante un ciclo:

diluido → producto

y concentrado → rechazo.

Después de la inversión:

el antiguo diluido se convierte en concentrado y el antiguo concentrado en diluido.

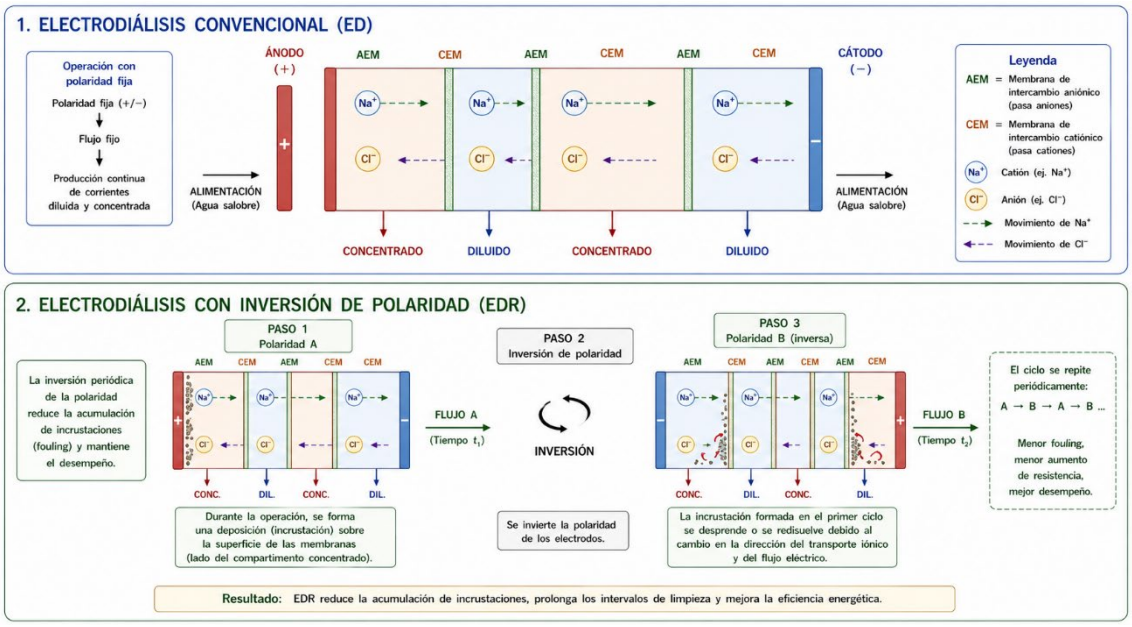
La inversión ayuda a remover depósitos y controlar fouling y scaling. Bernardes et al. explican que, al invertir la polaridad, las especies previamente depositadas sobre la membrana pueden movilizarse nuevamente hacia la solución.

La conmutación requiere unos segundos y genera un pequeño período durante el cual el agua puede no cumplir la especificación del producto. Bernardes et al. reportan una pérdida de productividad del orden de 1–3 % asociada a esta operación.

En aplicaciones reales, la frecuencia de inversión depende del equipo y de la calidad del agua. El material de Bernardes et al. describe sistemas con cambios aproximadamente cada 30–60 minutos, mientras que otra sección del mismo material describe sistemas automáticos con cambios más frecuentes. Por ello, **no debe fijarse una frecuencia universal en el libro**; debe considerarse una variable del diseño y del fabricante.

Figura 9.3

Comparación entre ED y EDR



Nota. Elaboración propia basada en Bernardes et al. (2014).

9.17. CONSUMO ENERGÉTICO

El consumo energético de ED tiene dos componentes principales:

$$E_{total} = E_{eléctrica} + E_{bombeo}$$

La energía eléctrica asociada al proceso puede calcularse mediante:

$$E_{eléctrica} = U\ I\ t$$

donde:

U = diferencia de potencial

I = corriente

t = tiempo.

La energía específica puede expresarse como:

$$SEC = E_{total}/V_{producto}$$

Por ejemplo:

SEC = kWh/m3

También puede expresarse por masa de ion recuperado:

SEC_ion = E_total/m_ion

En este último caso:

SEC_ion = kWh/kg

o:

SEC_ion = kWh/mol.

Bernardes et al. indican que, según las condiciones de operación, la concentración de la alimentación y el diseño del sistema, puede predominar la energía eléctrica o la de bombeo, alternándose entre una y otra.

9.18. EFECTO DE LA TEMPERATURA

La conductividad de las soluciones aumenta con la temperatura y la viscosidad disminuye. Esto puede favorecer el transporte iónico y reducir la resistencia eléctrica y las pérdidas hidráulicas.

Sin embargo, una temperatura mayor también puede:

- acelerar determinadas reacciones;
- modificar la solubilidad;
- aumentar la precipitación de algunas especies;
- acelerar el deterioro de membranas y espaciadores.

Bernardes et al. señalan que la conductividad puede variar aproximadamente 2–3 % por °C en determinadas soluciones y que el aumento de temperatura puede incrementar la densidad de corriente límite. Estos valores deben entenderse como referencias experimentales y no como constantes universales.

9.19. DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE UNA UNIDAD ED

Un procedimiento práctico de cálculo puede organizarse de la siguiente manera:

Paso 1. Caracterizar la alimentación

Determinar:

Qf

TDS

Na+

Ca2+

Mg2+

Cl−

SO4^2−

HCO3−

pH

temperatura

sólidos suspendidos

materia orgánica.

Paso 2. Definir el producto

Cdeseada

Qproducto

recuperación.

Paso 3. Calcular la carga iónica que debe eliminarse

$$\Delta N = Qf\ Cf - Qd\ Cd$$

Paso 4. Convertir la eliminación en equivalentes

$$N_{eq} = \Sigma |z_i|\ n_i$$

Paso 5. Calcular la corriente teórica

$$I_{teórica} = N_{eq}\ F/t$$

Paso 6. Corregir por eficiencia de corriente

$$I_{real} = I_{teórica}/\eta c$$

Paso 7. Seleccionar densidad de corriente

$$i < i_{lim}$$

Paso 8. Calcular área efectiva

$$A = I_{real}/i$$

Paso 9. Determinar número de pares de celdas

Npares = A/Apar

donde Apar es el área efectiva por par de celdas o por unidad repetitiva, según la configuración utilizada.

Paso 10. Verificar hidráulica

Comprobar:

velocidad

Reynolds

caída de presión

distribución de flujo.

Paso 11. Calcular energía

$$E = UIt + Epumping$$

Paso 12. Calcular costo

Costo = CAPEX anualizado + OPEX

Este procedimiento es deliberadamente preliminar. El diseño industrial requiere datos experimentales o del fabricante sobre transferencia de masa, selectividad, resistencia, área efectiva y comportamiento del concentrado.

9.20. EJEMPLO 9.3. DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR

Considérese un agua salobre:

$$Qf = 100\ m3/d$$

con una concentración equivalente aproximada:

$$Cf = 2.0\ g/L\ NaCl$$

y se desea:

$$Cd = 0.50\ g/L\ NaCl.$$

Supóngase:

$$Qd = 90\ m3/d$$

$\eta c = 0.85$

$$i = 150\ A/m2$$

y una tensión media:

$$U = 100\ V.$$

La sal eliminada diariamente es:

$$m_{sal} = Q_f C_f - Q_d C_d$$

Utilizando kg/d:

$$m_{sal} = 100000(0.002) - 90000(0.0005)$$

$$m_{sal} = 200 - 45$$

$$m_{sal} = 155\ kg/d$$

Para NaCl:

$$M_{NaCl} = 58.44\ g/mol$$

$$n_{NaCl} = 155000/58.44$$

$$n_{NaCl} \approx 2652\ mol/d$$

Para NaCl monovalente, los equivalentes son aproximadamente iguales a los moles:

$$N_{eq} \approx 2652\ eq/d$$

La carga teórica diaria es:

$$Q_e = 2652(96485)$$

$$Q_e \approx 2.56 \times 10^8\ C/d$$

La corriente teórica media es:

$$I_{teórica} = Q_e/86400$$

$$I_{teórica} \approx 2965\ A$$

Considerando 85 % de eficiencia:

$$I_{real} = 2965/0.85$$

$$I_{real} \approx 3488\ A$$

Con una densidad de corriente de:

$$i = 150\ A/m2$$

el área efectiva preliminar sería:

$$A = 3488/150$$

$$A \approx 23.3\ m2$$

Este resultado es **una primera estimación de ingeniería**, no un dimensionamiento definitivo.

La siguiente pregunta sería:

¿cuántos pares de celdas necesito?

Si cada par aporta, por ejemplo, 0.50 m2 de área efectiva:

Npares = 23.3/0.50

Npares ≈ 47 pares.

El valor real lo determinarán el módulo elegido, el área efectiva de cada membrana, la configuración hidráulica y la capacidad real de transferencia.

Este ejemplo es particularmente útil porque muestra el camino completo:

calidad de agua → balance → masa de sal eliminada → equivalentes → corriente → densidad de corriente → área → pares de celdas.

9.21. DE ED A EDI

La electrodeionización (EDI) combina dos mecanismos:

intercambio iónico + electrodiálisis.

En EDI se incorporan resinas de intercambio iónico dentro de los compartimentos de la unidad. La función de las resinas es proporcionar una vía altamente conductora para el transporte iónico en soluciones muy diluidas.

Khan et al. describen EDI como una tecnología híbrida que combina las propiedades de las resinas de intercambio iónico y las membranas selectivas de ED.

Alvarado y Chen igualmente presentan EDI como una tecnología de separación iónica relacionada directamente con ED e intercambio iónico.

La ventaja fundamental es que EDI puede operar continuamente y regenerar electroquímicamente las resinas, evitando la regeneración química convencional.

9.22. CONFIGURACIÓN DE EDI

Una configuración simplificada contiene:

ánodo → AEM → AER/CER → CEM → AER/CER → AEM → ... → cátodo

Los componentes principales son:

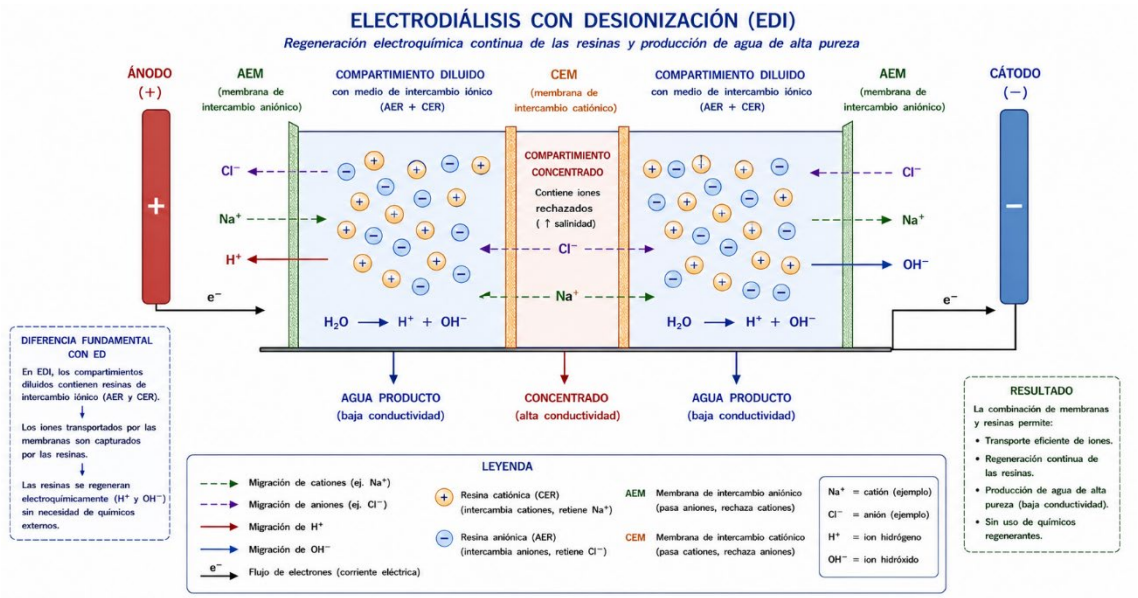
- CEM;

- AEM;
- resina catiónica (CER);
- resina aniónica (AER);
- electrodos;
- compartimentos de producto;
- compartimentos de concentrado.

Las resinas de la EDI hacen de vías de conducción para los iones. Khan et al. explican que el transporte se da mayormente por ellas, ya que conducen mejor que la solución muy diluida.

Figura 9.4

Estructura y mecanismo de transporte de una unidad EDI



Nota. Elaboración propia basada en Alvarado y Chen (2014) y Khan et al. (2023).

La Figura 2 de Khan et al. constituye la base conceptual apropiada para esta representación y muestra CEM, AEM, CER, AER, electrodos, agua purificada y corrientes concentradas.

9.23. MECANISMO DE REGENERACIÓN DE LAS RESINAS

La regeneración electroquímica constituye una de las características esenciales de EDI.

El campo eléctrico produce transporte de iones y, en determinadas regiones, favorece la disociación del agua:

$H2O \rightleftharpoons H+ + OH-$

Los H+ y OH− pueden regenerar las resinas:

$R-Na+ + H+ \rightarrow R-H + Na+$

$R+Cl- + OH- \rightarrow R+OH- + Cl-$

De esta forma, la resina puede volver a sus formas H+ y OH− sin necesidad de añadir continuamente ácido y base.

Khan et al. explican que el H+ y OH− generado por la disociación del agua reemplaza los iones retenidos en las resinas y permite su regeneración continua.

Alvarado y Chen muestran además que el estudio de EDI requiere considerar difusión, migración, corriente y regeneración in situ de las resinas.

9.24. ¿POR QUÉ EDI PUEDE TRATAR AGUA MUY DILUIDA?

En la ED convencional, si la concentración de la solución baja mucho, su conductividad eléctrica cae y la resistencia sube.

En EDI, la presencia de resinas de intercambio iónico proporciona una vía conductora adicional.

Gracias a ello, el sistema sigue transportando iones incluso cuando la fase acuosa tiene una concentración muy baja.

Por eso, en general, antes de la EDI se hace un pretratamiento y a menudo ósmosis inversa; así se consigue agua de alta pureza.

9.25. VARIABLES DE DISEÑO DE EDI

Las principales variables son:

- concentración de alimentación;
- conductividad;
- caudal;
- área;
- corriente;
- diferencia de potencial;
- tipo de resina;

- tamaño de partícula;
- configuración de la resina;
- propiedades de las membranas;
- espesor del lecho;
- temperatura;
- presión.

Khan et al. señalan específicamente que concentración inicial, voltaje, caudal, tipo y configuración de resina son variables fundamentales para evaluar el desempeño de EDI.

9.26. MÉTRICAS DE DESEMPEÑO DE EDI

Remoción

La eficiencia de remoción puede expresarse como:

$\eta r\ (\%) = [(Ci - C0)/Ci] \times 100$

donde:

Ci = concentración de entrada

C0 = concentración de salida.

Khan et al. la cuentan entre las métricas principales.

Recuperación de agua

Una expresión general es:

$\text{Recovery}\ (\%) = (V_{desalinated}/V_{processed}) \times 100$

La definición debe aplicarse consistentemente con las corrientes consideradas en el sistema.

Flujo de eliminación iónica

Khan et al. presentan:

$$J = Q(Ci - C0)/A$$

donde:

J = flujo de eliminación

Q = caudal

Ci = concentración de entrada

C0 = concentración de salida

A = área efectiva.

Esta expresión es particularmente útil para comparar diferentes diseños.

9.27. RESISTENCIA ELÉCTRICA EN EDI

Para una geometría simple, la resistencia de un compartimento puede expresarse como:

$$R = L/(\kappa A)$$

donde:

R = resistencia eléctrica

L = longitud de transporte

κ = conductividad

A = área.

Khan et al. utilizan esta relación para la resistencia del compartimento diluido.

Para la resina puede emplearse de manera análoga:

$\kappa_resina = L/(R_m\ A)$

donde:

R_m = resistencia medida del lecho.

Esta relación permite al estudiante comprender inmediatamente la importancia de:

- disminuir la distancia de transporte;
- aumentar el área;
- aumentar la conductividad.

9.28. VELOCIDAD INTERSTICIAL EN EDI

Cuando el compartimento contiene partículas de resina, la velocidad intersticial puede estimarse mediante:

$$Ue = Q/(\varepsilon v,avg\ A)$$

o:

$$Ue = U/\varepsilon v,\ avg$$

donde:

Ue = velocidad intersticial

U = velocidad superficial

εv, avg = fracción de vacío promedio.

Interesa esta variable porque cambia tanto la transferencia de masa como la caída de presión.

9.29. Consumo energético de EDI

El consumo energético puede expresarse como:

$$E = UIt$$

y el consumo específico:

$$SEC = E/V_{producto}$$

Khan et al. presentan una expresión para consumo específico de EDI en kWh/m3 basada en potencial, corriente, tiempo y producción de agua.

Una forma general y más fácil de utilizar en diseño es:

$$SEC = (U\ I\ t)/(V_{producto})$$

si:

U está en V

I está en A

t está en h

Vproducto está en m3,

entonces:

SEC está en kWh/m3.

Ejemplo 9.4. Consumo energético

Una unidad EDI opera con:

$$U = 100\ V$$

$$I = 5\ A$$

durante:

$$t = 10\ h$$

y produce:

Vproducto = 2.0 m3.

La energía consumida es:

$$E = 100(5)(10)$$

$$E = 5000 \text{ Wh}$$

$$E = 5.0 \text{ kWh}$$

Por tanto:

$$SEC = 5.0/2.0$$

$$SEC = 2.5 \text{ kWh/m3}.$$

Este valor representa únicamente la contribución eléctrica considerada en el ejemplo. En una evaluación de planta deben añadirse bombeo, pretratamiento, instrumentación y otros consumos.

9.30. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDI

Khan et al. definen la eficiencia energética mediante:

$\eta e\ (\%) = (Emin/Eactual) \times 100$

donde:

Emin = energía mínima teórica requerida

Eactual = energía suministrada al proceso.

Sin embargo, para un diseño de ingeniería de una planta real, el concepto más práctico suele ser comparar:

kWh/m3 de producto y:

kWh/kg de ion eliminado o recuperado.

Esto permite comparar ED, EDR, EDI, RO y otros procesos bajo una base común, siempre que las calidades de alimentación y producto sean comparables.

9.31. EL PAPEL DE LA DISOCIACIÓN DEL AGUA EN EDI

La disociación del agua tiene un papel dual.

Por una parte:

$H2O \rightarrow H+ + OH-$

permite regenerar las resinas.

Por otra parte, una fracción de la corriente eléctrica puede utilizarse en este proceso en lugar de transportar la especie objetivo.

Por ello:

más disociación del agua no significa necesariamente mejor eficiencia energética.

Según Khan et al., cuando la concentración de alimentación es muy baja, la disociación del agua gana peso y una parte considerable de la energía puede atribuirse a ese fenómeno.

Este aspecto debe diferenciarse claramente de ED convencional.

9.32. EDI: CORRIENTE, VOLTAJE Y EFICIENCIA

El aumento del voltaje puede incrementar la remoción iónica, pero también puede aumentar el consumo energético.

Por ello, el objetivo de operación no es:

V máximo

sino:

V óptimo

que permita alcanzar la calidad requerida con un consumo energético razonable.

Khan et al. destacan precisamente el compromiso entre remoción, consumo energético y eficiencia de corriente.

9.33. SELECCIÓN DE LA RESINA

Las resinas pueden organizarse como:

- lecho mixto;
- capas separadas;
- configuraciones bipolares;
- resinas inmovilizadas en *wafers*.

Tanto el transporte iónico como la hidráulica varían según el tamaño de las partículas y su distribución granulométrica.

Khan et al. reportan que las resinas con distribución granulométrica más estrecha pueden presentar mejor transporte iónico y menor resistencia del sistema, mientras que el uso de *resin wafers* puede disminuir problemas de aglomeración y canalización.

9.34. PRETRATAMIENTO DE EDI

EDI requiere agua de alimentación relativamente limpia.

Entre los problemas importantes se encuentran:

- sólidos;
- materia orgánica;
- microorganismos;
- Ca2+;
- Fe;
- Mn;
- CO2;
- especies que pueden precipitar.

Khan et al. recopilan valores operacionales reportados para determinados sistemas comerciales y experimentales, pero advierten indirectamente que el desempeño depende de las condiciones específicas. Por ello, **estos valores no deben convertirse en límites universales de diseño**.

Una configuración industrial frecuente puede representarse conceptualmente como:

Pretratamiento

→ MF/UF cuando sea necesario

→ RO

→ EDI

→ agua ultrapura.

La función de RO es reducir sustancialmente la carga iónica antes de EDI; EDI realiza la desmineralización profunda.

9.35. COMPARACIÓN DE ED, EDR Y EDI

Característica	ED	EDR	EDI
Fuerza impulsora	Campo eléctrico	Campo eléctrico reversible	Campo eléctrico
Membranas	CEM + AEM	CEM + AEM	CEM + AEM
Resinas en compartimento diluido	No	No	Sí

Característica	ED	EDR	EDI
Regeneración química de resina	No aplica	No aplica	No
Inversión de polaridad	No	Sí	Puede existir en variantes
Aplicación principal	Desalinización iónica	Desalinización con mayor control de depósitos	Desmineralización profunda
Agua muy diluida	Limitada	Limitada	Muy favorable
Producto ultrapuro	Limitado	Limitado	Muy favorable
Problema crítico	Polarización	Polarización/scaling	Regeneración, polarización interna y alimentación
Variable energética clave	I, U, i	I, U, i	U, I, eficiencia

Bernardes et al. destacan que EDR puede ser especialmente interesante en determinadas aguas salobres y que ED presenta limitaciones cuando se requiere una desmineralización extrema.

EDI, por su parte, combina intercambio iónico y electrodiálisis y está orientada especialmente a la producción continua de agua de alta pureza.

9.36. EJEMPLO INTEGRADOR 9.5. SELECCIÓN PRELIMINAR DE TECNOLOGÍA

Considérese tres aguas:

Agua A

$$TDS = 500 \text{ mg/L}$$

Producto requerido = 100 mg/L.

Agua B

$$TDS = 5000 \text{ mg/L}$$

Producto requerido = 500 mg/L.

Agua C

Agua previamente tratada por RO:

$TDS < 50$ mg/L

Producto requerido = agua ultrapura.

Una selección preliminar sería:

Agua A → evaluar ED/EDR y otras alternativas.

Agua B → comparar ED/EDR con RO considerando energía, recuperación y composición.

Agua C → EDI puede ser una alternativa apropiada para desmineralización final.

Esta decisión no puede realizarse únicamente a partir del TDS. Deben analizarse:

- composición iónica;
- sílice;
- materia orgánica;
- dureza;
- temperatura;
- recuperación;
- calidad del producto;
- energía;
- CAPEX;
- OPEX.

9.37. CRITERIO DE DISEÑO ECONÓMICO

Bernardes et al. señalan que los costos de ED comprenden costos fijos asociados al capital y costos operativos. El área de membrana constituye una variable importante del capital, mientras que energía, mantenimiento y operación contribuyen al costo operativo.

Esto genera una relación de compromiso:

mayor densidad de corriente

→ menor área

→ menor CAPEX

pero:

→ mayor voltaje

→ mayor energía

→ mayor OPEX.

Por tanto, el punto económicamente óptimo no coincide necesariamente con el máximo flujo de iones.

9.38. METODOLOGÍA RECOMENDADA PARA RESOLVER UN PROBLEMA DE ED/EDR/EDI

Ante cualquier problema de diseño, el estudiante debería seguir esta secuencia:

1. Caracterizar el agua

↓

2. Identificar las especies iónicas relevantes

↓

3. Establecer calidad de producto

↓

4. Hacer balance de agua

↓

5. Hacer balance de sal

↓

6. Calcular equivalentes eliminados

↓

7. Calcular corriente teórica

↓

8. Corregir por eficiencia de corriente

↓

9. Determinar densidad de corriente límite

↓

10. Seleccionar densidad de operación

↓

11. Calcular área de membrana

↓

12. Determinar número de pares de celdas

↓

13. Verificar transferencia de masa

↓

14. Verificar hidráulica

↓

15. Calcular consumo energético

↓

16. Evaluar ensuciamiento/scaling

↓

17. Analizar CAPEX + OPEX

↓

18. Comparar ED, EDR, EDI y otras tecnologías.

Este procedimiento convierte el capítulo en una herramienta de diseño y no solamente en una descripción de tecnologías.

9.39. CONSIDERACIONES AVANZADAS PARA INVESTIGACIÓN

Para un estudiante de maestría, las variables anteriores pueden convertirse en problemas de investigación.

Por ejemplo:

Optimización de densidad de corriente

minimizar:

SEC

sujeto a:

$Cd \leq Cd, max$

$i < i_lim$

Optimización de caudal

minimizar:

SEC_total

considerando simultáneamente:

transferencia de masa + caída de presión.

Optimización de EDI

minimizar:

SEC

sujeto a:

conductividad del producto ≤ valor especificado.

Khan et al. señalan que la evaluación de EDI requiere considerar simultáneamente concentración, densidad de corriente, resistencia del sistema, configuración de resina y morfología de las membranas.

9.40. ERRORES FRECUENTES QUE DEBE EVITAR EL DISEÑADOR

Error 1. Utilizar TDS como única variable

ED y EDI responden a la composición iónica, no simplemente al TDS.

Error 2. Suponer que toda la corriente elimina sal

La eficiencia de corriente puede ser inferior al 100 %.

Error 3. Operar automáticamente a la corriente límite

La corriente límite constituye una condición de transición, no necesariamente una condición óptima de operación.

Error 4. Ignorar el concentrado

La eliminación de sal del diluido implica su transferencia al concentrado.

Error 5. Ignorar el bombeo

La energía de bombeo puede constituir una fracción importante del consumo total.

Error 6. Confundir ED con EDI

EDI no es simplemente una ED con más membranas. La presencia y función de las resinas modifica el transporte y permite regeneración electroquímica.

Error 7. Utilizar límites de fabricante como leyes universales

Los límites de presión, temperatura, conductividad, Ca^{2+}, CO_2, Fe y Cl^- dependen del diseño y fabricante. Los valores publicados deben emplearse como referencias para una evaluación preliminar, no como especificaciones universales.

9.41. PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 9.1

Una alimentación de 50 m3/d contiene 1500 mg/L de NaCl. Se desea obtener un diluido de 300 mg/L con un caudal de 45 m3/d.

Determinar:

a) masa de NaCl eliminada;

b) concentración aproximada de NaCl en el concentrado;

c) porcentaje de extracción.

Problema 9.2

Una pila opera a:

$$I = 250\ A$$

$$U = 80\ V$$

durante 8 h.

El volumen producido es 20 m3.

Calcular:

a) energía eléctrica;

b) consumo específico;

c) potencia eléctrica media.

Problema 9.3

Una membrana presenta:

C0 = 0.020 mol/L

$$D = 1.5 \times 10^{-9}\ m^2/s$$

$$z = 1$$

$\delta = 100\ \mu m$

$t_m = 0.95$

$t_s = 0.40$.

Estimar la densidad de corriente límite mediante:

$i_{lim} = C0\ D\ z\ F/[\delta(t_m - t_s)]$

Prestar especial atención a la conversión de unidades.

Problema 9.4

Una unidad EDI trata 1.5 m3/h. La concentración de entrada de un ion es 10 mg/L y la de salida es 0.05 mg/L.

Calcular:

a) porcentaje de remoción;

b) masa eliminada por hora;

c) flujo de eliminación si el área efectiva es 10 m2.

Problema 9.5

Una unidad EDI trabaja a 120 V y 4 A y produce 0.8 m3/h.

Calcular:

a) potencia eléctrica;

b) energía específica en kWh/m3.

Problema 9.6

Comparar dos alternativas:

Alternativa A

$$i = 100 \text{ A/m2}$$

$\eta c = 0.90$

$$U = 80 \text{ V}$$

Alternativa B

$$i = 180 \text{ A/m2}$$

$\eta c = 0.75$

$$U = 130 \text{ V}$$

Determinar cuál podría tener menor área de membrana y cuál podría tener menor consumo eléctrico por unidad de carga transferida.

La respuesta debe considerar que **menor área no implica necesariamente menor costo total**.

9.42. PREGUNTAS DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre una CEM y una AEM?
2. ¿Qué función cumple el campo eléctrico?
3. ¿Qué es un par de celdas?
4. ¿Qué representa el número de transporte?
5. ¿Qué significa permselectividad?
6. ¿Por qué se produce polarización de concentración?

7. ¿Qué representa i_lim?
8. ¿Por qué no debe operarse indiscriminadamente por encima de i_lim?
9. ¿Qué diferencia existe entre ED y EDR?
10. ¿Por qué EDR puede reducir scaling?
11. ¿Qué componentes forman la resistencia eléctrica de una pila?
12. ¿Cuáles son los dos componentes principales del consumo energético?
13. ¿Por qué el área requerida se reduce al subir la densidad de corriente?
14. ¿Por qué también puede aumentar el consumo energético?
15. ¿Qué diferencia fundamental existe entre ED y EDI?
16. ¿Cuál es la función de las resinas en EDI?
17. ¿Cómo se regeneran las resinas en EDI?
18. ¿Qué función tiene la disociación del agua?
19. ¿Por qué EDI puede trabajar con soluciones muy diluidas?
20. ¿Por qué RO suele utilizarse como pretratamiento de EDI?
21. ¿Qué variables deben controlarse para evitar scaling en EDI?
22. ¿Qué representa el consumo específico de energía?
23. ¿Por qué la eficiencia de corriente es importante?
24. ¿Por qué no debe utilizarse TDS como único criterio de selección?
25. ¿Cómo se determina preliminarmente el área de membrana?

9.43. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

La electrodiálisis debe entenderse como un proceso simultáneamente **electroquímico, de transferencia de masa, hidráulico y económico**.

El diseño parte de un balance de materia:

alimentación → diluido + concentrado

y continúa con el cálculo de la carga iónica:

masa de sal → moles → equivalentes → carga eléctrica → corriente.

Luego hay que tener presente que la corriente real excede a la teórica, porque:

$\eta c < 1$

y que la densidad de corriente debe mantenerse en una región compatible con la transferencia de masa:

$$i < i_{lim}$$

El área se relaciona aproximadamente con:

$$A = I/i$$

mientras que el consumo eléctrico se relaciona con:

$$E = UIt$$

y el consumo específico con:

$$SEC = E/V_{producto}.$$

La EDR incorpora la inversión periódica de polaridad para controlar depósitos y fouling. EDI introduce resinas de intercambio iónico dentro del sistema, permitiendo transportar iones en soluciones muy diluidas y regenerar continuamente las resinas mediante el campo eléctrico.

La idea central que debe quedar en el estudiante es:

No se diseña una electrodiálisis seleccionando primero una membrana; se diseña a partir del balance de materia, la carga iónica, la transferencia de masa, la densidad de corriente, el área, la hidráulica y la energía, y posteriormente se seleccionan las membranas y el módulo apropiados.

CAPÍTULO 10

ÓSMOSIS DIRECTA: FUNDAMENTOS, MODELAMIENTO Y APLICACIONES EN TRATAMIENTO DE AGUA

10.1. INTRODUCCIÓN

En la ósmosis directa, que suele llamarse forward osmosis (FO), una membrana semipermeable separa dos soluciones y el agua pasa a través de ella porque las presiones osmóticas de ambos lados son distintas. Frente a la ósmosis inversa (RO), este proceso de separación por membrana no necesita, en principio, una presión hidráulica alta para mover el agua.

En la FO se coloca una solución de elevada concentración osmótica, denominada solución de arrastre o draw solution (DS), en un lado de la membrana y una solución de menor presión osmótica, denominada alimentación o feed solution (FS), en el otro. El agua se desplaza espontáneamente desde la alimentación hacia la solución de arrastre. Por ello, la alimentación se concentra mientras la solución de arrastre se diluye. Cath et al. establecen esta diferencia como la característica fundamental que distingue a FO de RO y de la ósmosis retardada por presión (PRO).

La importancia de la FO para la ingeniería del agua no radica solamente en que el transporte de agua pueda realizarse sin una alta presión hidráulica. Su interés está en la posibilidad de utilizarla como etapa de concentración o pretratamiento y posteriormente combinarla con otros procesos, por ejemplo, RO o destilación por membranas. En este sentido, una característica fundamental es que la FO generalmente no constituye por sí misma la etapa final de producción de agua cuando se utiliza una solución de arrastre que debe ser posteriormente separada o regenerada. *Membrane and Desalination Technologies* señala precisamente que la etapa osmótica requiere poca energía directa, mientras que una parte importante de la energía del sistema puede estar asociada con la recuperación o regeneración de la solución de arrastre.

El objetivo de este capítulo es que el estudiante pueda:

1. Explicar el fundamento físico de la FO.

2. Calcular la presión osmótica de soluciones diluidas.
3. Determinar el flujo osmótico ideal.
4. Evaluar el efecto de la polarización de concentración.
5. Diferenciar polarización externa e interna.
6. Analizar las configuraciones de orientación de la membrana.
7. Evaluar una solución de arrastre.
8. Realizar balances de masa y estimar recuperación.
9. Calcular el área de membrana necesaria a partir del flujo.
10. Identificar las principales limitaciones de FO.
11. Seleccionar preliminarmente una configuración de proceso.
12. Analizar cuándo resulta conveniente integrar FO con RO u otra tecnología.

10.2. FUNDAMENTO DE LA ÓSMOSIS

El agua pasa de un lado a otro de una membrana selectiva cuando su potencial químico difiere entre ambas caras; a ese movimiento neto se le llama ósmosis. Expresada como presión osmótica, esa diferencia resulta más fácil de manejar en la práctica.

Si la membrana es ideal y rechaza todo el soluto, el agua fluye desde la solución de menor presión osmótica hacia la de mayor presión osmótica.

En FO:

$\pi_{DS} > \pi_{FS}$

y, por tanto:

FS → membrana → DS

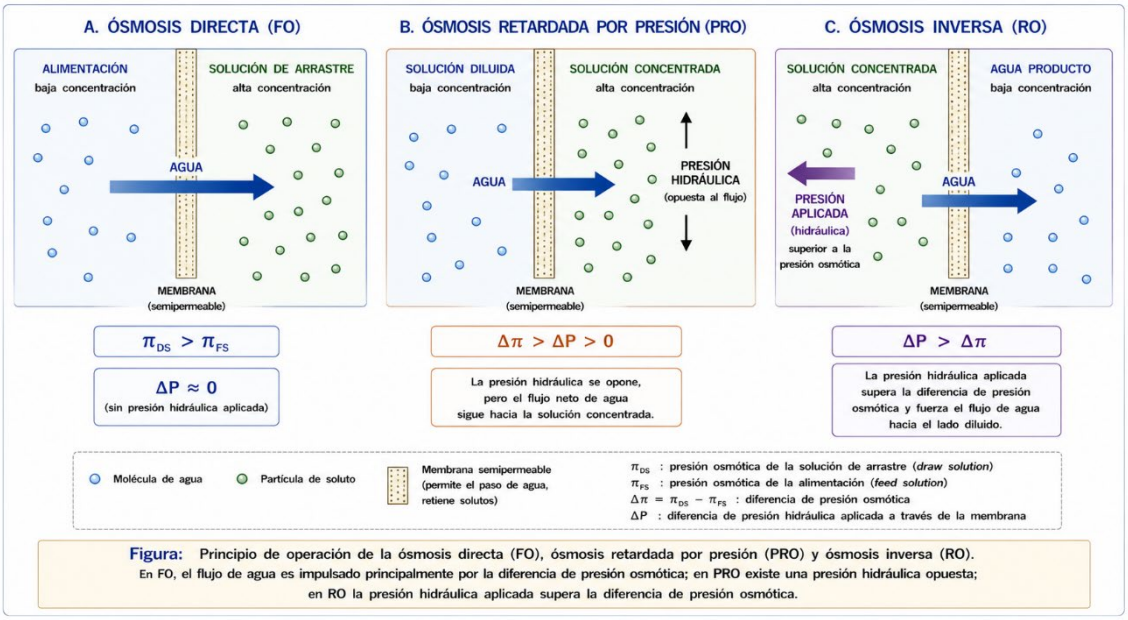
La solución de alimentación pierde agua y se concentra, mientras que la solución de arrastre gana agua y se diluye.

En RO el sentido del flujo de agua se invierte: se aplica una presión hidráulica lo bastante alta como para vencer la presión osmótica y empujar el agua hacia el lado menos concentrado.

Bitter explica que se puede ordenar a los procesos de membrana según su fuerza impulsora; en los osmóticos y en los de separación, el transporte se vincula con gradientes de potencial químico.

Figura 10.1

Principio de operación de FO, PRO y RO



Nota: Adaptado de Cath et al. (2006), Figuras 1 y 2.

10.3. PRESIÓN OSMÓTICA

Con soluciones poco concentradas, se recurre a van't Hoff para estimar la presión osmótica:

$$\pi = i\ C\ R\ T$$

donde:

π = presión osmótica, Pa

i = factor de van't Hoff

C = concentración molar del soluto, mol/m3

R = constante universal de los gases, 8.314 J/(mol K)

T = temperatura absoluta, K

Para NaCl completamente disociado, como aproximación ideal:

$i \approx 2$

Para una solución de 0.10 mol/L de NaCl:

$$C = 0.10\ mol/L = 100\ mol/m3$$

A 25 °C:

$$T = 298.15\ K$$

Entonces :

$$\pi = 2(100)\ (8.314)\ (298.15)$$

$\pi \approx 4.96$ x 10^5 Pa

$\pi \approx 4.96$ bar

Esta ecuación debe utilizarse con precaución a concentraciones elevadas. En soluciones concentradas, la actividad del agua y la no idealidad de la solución hacen que la aproximación de van't Hoff pierda precisión. En aplicaciones reales de FO, particularmente con soluciones de arrastre concentradas, debe preferirse el cálculo termodinámico de la presión osmótica mediante actividades o mediante datos de equilibrio apropiados.

Bitter presenta la presión osmótica en relación con la actividad del agua y el potencial químico, mostrando que la descripción termodinámica rigurosa no depende simplemente de la concentración molar.

10.3.1. DIFERENCIA DE PRESIÓN OSMÓTICA

Para una membrana ideal:

$$\Delta\pi = \pi_DS - \pi_FS$$

La magnitud de $\Delta\pi$ determina la fuerza impulsora osmótica disponible antes de considerar las pérdidas ocasionadas por polarización de concentración y otras resistencias.

En FO:

$\Delta P \approx 0$

por lo que la ecuación general de transporte puede escribirse como:

$$Jw = A\ (\sigma\Delta\pi - \Delta P)$$

y para FO:

$$Jw = A\sigma\Delta\pi$$

Cath et al. presentan precisamente la relación general:

$$Jw = A\ (\sigma\Delta\pi - \Delta P)$$

Aquí A representa la permeabilidad de la membrana al agua y σ su coeficiente de reflexión. Para FO, el diferencial de presión hidráulica se toma como casi nulo.

Para una membrana ideal:

$\sigma \approx 1$

y:

$Jw \approx A\Delta\pi$

A partir de esta expresión se desarrollan los cálculos de FO.

10.4. CÁLCULO DEL FLUJO DE AGUA

El flujo volumétrico de agua se define como:

$$Jw = Qw / Am$$

donde:

Jw = flujo de agua, m3/(m2 s)

Qw = caudal de agua transferida, m3/s

Am = área de membrana, m2

En unidades prácticas:

Jw (L/m2 h) = Qw (L/h) / Am (m2)

Por tanto:

$$Qw = Jw\ Am$$

y:

$$Am = Qw / Jw$$

Para un diseño preliminar, esta última ecuación resulta de las más útiles.

Ejemplo 10.1. Flujo osmótico ideal

Una membrana FO tiene:

A = 1.0 x 10^-12 m/(s Pa)

La solución de alimentación contiene NaCl a 0.10 mol/L y la solución de arrastre contiene NaCl a 1.00 mol/L. Suponga comportamiento ideal, $\sigma = 1$ y T = 25 °C.

Para la alimentación:

C_FS = 100 mol/m3

π_FS = 2(100) (8.314) (298.15)

π_FS = 0.496 MPa

Para la solución de arrastre:

C_DS = 1000 mol/m3

π_DS = 2(1000) (8.314) (298.15)

$\pi_DS = 4.956$ MPa

Por tanto:

$$\Delta\pi = 4.956 - 0.496$$

$$\Delta\pi = 4.460 \text{ MPa}$$

Como:

$$Jw = A\Delta\pi$$

resulta:

$$Jw = (1.0 \times 10^{-12}) (4.460 \times 10^{6})$$

$$Jw = 4.46 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

Transformando a L/m2 h:

$$Jw = 16.1 \text{ L/m2 h}$$

Este resultado es un **flujo teórico**. No debe interpretarse como el flujo real de diseño porque todavía no se han considerado la polarización de concentración, la resistencia interna del soporte, el flujo inverso de soluto, el ensuciamiento ni la reducción de la fuerza osmótica a lo largo del módulo.

Este punto es particularmente importante para el estudiante: **no debe utilizarse directamente la diferencia entre las presiones osmóticas de las soluciones a granel para dimensionar una planta FO sin analizar la polarización de concentración.**

10.5. SOLUCIÓN DE ARRASTRE

La solución de arrastre es uno de los componentes esenciales de la FO, pues aporta la presión osmótica elevada que impulsa el paso del agua.

Para Cath et al., el criterio básico al elegir la solución de arrastre es que su presión osmótica supere la de la alimentación. Señalan además que hay que evaluar si es posible recuperarla o reconcentrarla una vez diluida.

Una solución de arrastre técnicamente atractiva debería presentar:

- elevada presión osmótica;
- alta solubilidad;
- baja viscosidad;
- bajo flujo inverso de soluto;
- baja toxicidad;

- estabilidad química;
- baja interacción con la membrana;
- facilidad de separación del agua producto;
- bajo costo de regeneración;
- disponibilidad del soluto.

La solución de NaCl presenta algunas ventajas prácticas debido a su alta solubilidad y porque puede ser reconcentrada mediante RO en determinados sistemas. Cath et al. mencionan específicamente esta posibilidad.

No obstante, una solución de arrastre no debe evaluarse solamente por su presión osmótica.

El criterio correcto es:

beneficio osmótico – pérdidas por transporte de soluto – costo de regeneración – impacto sobre la calidad del producto.

Si recuperar una solución de presión osmótica muy alta consume mucha energía, quizá no valga la pena emplearla, por más atractiva que parezca.

10.6. FLUJO INVERSO DE SOLUTO

La membrana FO no bloquea el soluto por completo. Mientras el agua avanza hacia la solución de arrastre, una parte del soluto de esa solución puede difundirse en sentido contrario y llegar a la alimentación.

Este fenómeno se denomina reverse solute flux (RSF) o flujo inverso de soluto.

Una representación simplificada puede escribirse como:

$$Js = B\ (C_DS, m - C_FS, m)$$

donde:

Js = flujo molar de soluto, mol/(m2 s)

B = coeficiente de permeabilidad del soluto, m/s

C_DS, m = concentración de soluto sobre la superficie de la membrana, en el lado DS

C_FS, m = concentración de soluto sobre la superficie de la membrana, en el lado FS

El flujo inverso de soluto tiene varias consecuencias:

1. modifica la composición de la alimentación;
2. reduce la eficiencia de la solución de arrastre;
3. puede contaminar el agua producto cuando la solución de arrastre se utiliza para producir agua;
4. altera los gradientes osmóticos;
5. aumenta la necesidad de regeneración de la solución de arrastre.

Por ello, una membrana FO debe presentar simultáneamente:

alto flujo de agua + alta retención de soluto.

Cath et al. destacan que la difusión del soluto desde la solución de arrastre debe considerarse al seleccionar dicha solución y la membrana.

10.7. POLARIZACIÓN DE CONCENTRACIÓN

La polarización de concentración es probablemente **el concepto más importante del capítulo desde el punto de vista del cálculo**.

Si se emplean las concentraciones del seno de la solución, el diferencial osmótico que sale no es el que de verdad experimenta la capa activa.

En FO aparecen dos formas principales de polarización externa:

1. polarización concentrativa en el lado de alimentación;
2. polarización dilutiva en el lado de la solución de arrastre.

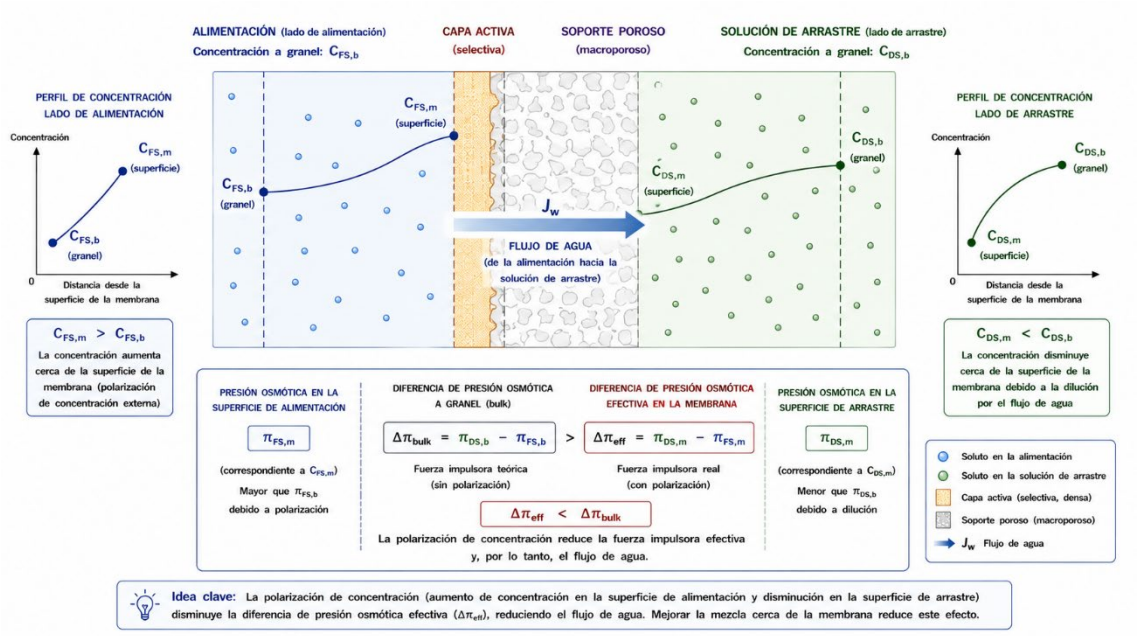
Del lado de la alimentación, el agua sale de la solución y los solutos se acumulan cerca de la membrana.

La solución de arrastre, por su parte, se diluye junto a la superficie de la membrana, ya que recibe el agua que entra.

Ambos efectos reducen la diferencia osmótica efectiva. Cath et al. describen explícitamente estos dos fenómenos y señalan que el aumento de velocidad y turbulencia puede reducir la polarización externa.

Figura 10.2

Polarización de concentración en FO



Nota: Adaptado de Cath et al. (2006), Figuras 4 y 5.

Junto a la membrana, entonces, la alimentación se hace más concentrada y la solución de arrastre más diluida. El resultado es una diferencia de presión osmótica efectiva inferior a la que se calcularía con las concentraciones a granel.

10.8. POLARIZACIÓN EXTERNA

Para una capa límite de transferencia de masa, una expresión simplificada del tipo película puede utilizarse para estimar la concentración superficial.

Para el lado de alimentación:

C_FS, m ≈ C_FS, b exp (Jw/k_FS)

donde:

C_FS, m = concentración en la superficie de la membrana

C_FS, b = concentración a granel

Jw = flujo de agua

k_FS = coeficiente de transferencia de masa

Por eso, si Jw sube o k_FS baja, la concentración en la superficie crece.

Como la presión osmótica aumenta con la concentración, el aumento de C_FS, m incrementa π_FS, m y disminuye la fuerza impulsora.

En el lado de arrastre ocurre el fenómeno contrario:

$C_{DS,m} < C_{DS,b}$

Para reducir la polarización externa conviene aumentar la velocidad del flujo, adelgazar la capa límite y elegir bien la configuración del módulo.

Los conceptos de capa límite, transferencia de masa y concentración superficial también aparecen en *Membrane and Desalination Technologies*, donde se explica que la concentración en la superficie aumenta con la polarización y que la mezcla hidráulica puede reducir sus efectos.

10.9. POLARIZACIÓN INTERNA

La polarización interna es aún más importante en FO.

Las membranas FO suelen ser asimétricas y poseen:

- una capa activa selectiva;
- un soporte poroso.

El soporte puede constituir una resistencia importante al transporte de soluto.

Dentro del soporte las concentraciones cambian conforme avanza el agua, y por eso la diferencia osmótica efectiva en el interior de la membrana puede resultar muy inferior a la existente entre las soluciones a granel.

Cath et al. distinguen dos configuraciones:

Concentrative internal concentration polarization (CICP) y

Dilutive internal concentration polarization (DICP).

La primera aparece cuando el soporte se encuentra orientado hacia la alimentación. La segunda es característica de la orientación habitualmente utilizada en FO para tratamiento de agua, en la que la capa activa está hacia la alimentación y el soporte hacia la solución de arrastre.

10.9.1. RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL SOPORTE

Cath et al. definen una resistencia al transporte de soluto en el soporte:

$$K = t\tau / (\varepsilon D_s)$$

donde:

K = resistencia al transporte de soluto en el soporte, s/m

t = espesor del soporte, m

τ = tortuosidad

ε = porosidad

Ds = coeficiente de difusión del soluto, m2/s

Esta ecuación muestra inmediatamente qué características debe tener un soporte FO:

- pequeño espesor;
- baja tortuosidad;
- alta porosidad;
- elevada difusividad del soluto.

Cath et al. presentan esta ecuación en su tratamiento de la polarización interna.

Ejemplo 10.2. Resistencia del soporte

Una membrana FO tiene:

t = 200 μm = 2.0 x 10^-4 m

τ = 2

ε = 0.50

Ds = 1.5 x 10^-9 m2/s

Entonces :

K = (2.0 x 10^-4) (2) / [(0.50) (1.5 x 10^-9)]

K = 5.33 x 10^5 s/m

Este resultado permite observar que incluso una capa porosa relativamente delgada puede introducir una resistencia importante al transporte osmótico.

10.10. ECUACIÓN DE FLUJO CONSIDERANDO POLARIZACIÓN INTERNA

Para el caso de polarización interna concentrativa, Cath et al. presentan:

Jw = (1/K) ln (π_Hi / π_Low)

como una aproximación simplificada para flujo bajo, donde π_Hi y π_Low representan las presiones osmóticas de las soluciones de arrastre y alimentación, respectivamente.

Una forma más general incorpora la permeabilidad del soluto de la capa activa:

K = (1/Jw) ln [(B + Aπ_Hi - Jw) / (B + Aπ_Low)]

donde:

B = coeficiente de permeabilidad del soluto de la capa activa.

Cath et al. señalan que esta formulación permite cuantificar la severidad de la polarización interna y que valores mayores de K representan una resistencia interna mayor.

Para polarización interna dilutiva se utiliza:

$$K = (1/Jw) \ln [(B + A\pi_Hi)/ (B + Jw + A\pi_Low)]$$

Cath et al. incluyen la ecuación correspondiente a la configuración dilutiva en su artículo.

Para el diseño preliminar del curso, recomiendo que el estudiante domine primero:

$$Jw = A\Delta\pi$$

y posteriormente:

$$K = t\tau/(\varepsilon Ds)$$

y las ecuaciones de polarización interna.

No considero conveniente introducir en este capítulo una cantidad excesiva de modelos más complejos. El objetivo es que el estudiante comprenda **qué resistencia domina y cómo modificarla**.

10.11. ORIENTACIÓN DE LA MEMBRANA

Una membrana FO asimétrica puede operar principalmente en dos orientaciones:

AL-FS: active layer facing feed solution

AL-DS: active layer facing draw solution

Para tratamiento de agua, la orientación habitual es:

Feed → active layer → porous support → draw solution

Así, la alimentación toca la capa activa selectiva y la solución de arrastre fluye por el soporte.

El espesor y estructura del soporte son críticos porque la difusión dentro del soporte puede generar una fuerte polarización interna.

De acuerdo con Cath et al., el flujo cambia de forma notable según cómo se oriente la membrana, a causa de la polarización interna.

Figura 10.3

Orientación de membrana y polarización interna

.

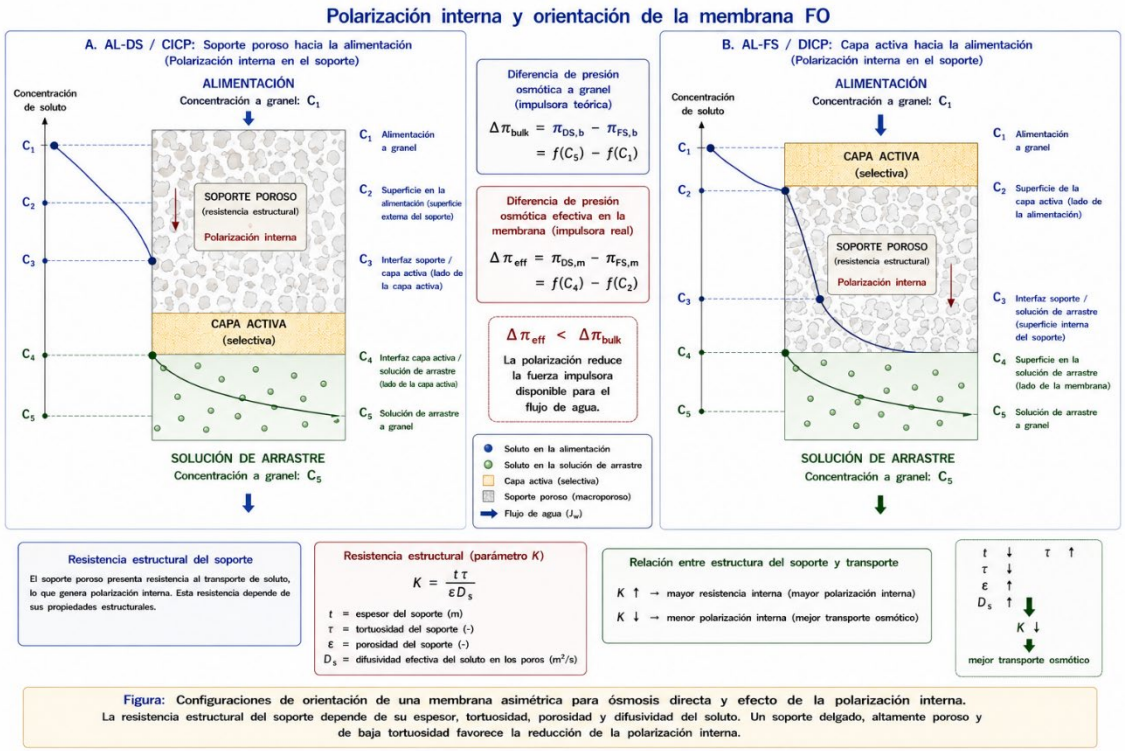


Figura: Configuraciones de orientación de una membrana asimétrica para ósmosis directa y efecto de la polarización interna. La resistencia estructural del soporte depende de su espesor, tortuosidad, porosidad y difusividad del soluto. Un soporte delgado, altamente poroso y de baja tortuosidad favorece la reducción de la polarización interna.

Nota: Adaptado de Cath et al. (2006), Figuras 4 y 5.

10.12. CARACTERÍSTICAS DE UNA MEMBRANA PARA FO

La selección de membrana debe realizarse considerando simultáneamente transporte, selectividad y estructura.

Las características deseables son:

1. alta permeabilidad al agua;
2. alta retención de solutos;
3. bajo espesor de la capa activa;
4. soporte de baja resistencia;
5. alta porosidad;
6. baja tortuosidad;
7. estabilidad química;
8. resistencia mecánica;
9. baja tendencia al ensuciamiento;
10. bajo flujo inverso de soluto.

Cath et al. concluyen que la reducción de la polarización interna requiere especialmente soportes delgados, con baja tortuosidad y porosidad adecuada.

Una conclusión importante para el estudiante es que **la mejor membrana de RO no necesariamente es la mejor membrana para FO**.

De hecho, Cath et al. muestran experimentalmente que una membrana especialmente diseñada para FO podía superar claramente a varias membranas comerciales de RO utilizadas en modo FO. En un ensayo con solución de arrastre de 100 g/L NaCl y agua desionizada como alimentación, se reportaron 17.4 L/m2 h para una membrana CTA diseñada para FO frente a valores de 0.54–1.97 L/m2 h para las membranas RO evaluadas.

10.13. MÓDULOS DE MEMBRANA

Un módulo FO tiene que permitir que ambos lados de la membrana queden en contacto hidráulico.

Las principales configuraciones estudiadas incluyen:

- placa y marco;
- espiral modificada;
- tubular;
- fibra hueca;
- dispositivos tipo bolsa.

La configuración de placa y marco es conceptualmente sencilla, pero presenta baja densidad de empaquetamiento y problemas de soporte y sellado cuando se escala.

En los módulos espirales convencionales de RO, el permeado circula por un canal que no está diseñado para recibir una corriente de solución de arrastre. Por ello, un módulo espiral convencional no puede simplemente utilizarse en FO sin modificaciones. Cath et al. explican esta limitación y describen configuraciones espirales modificadas.

Los módulos tubulares tienen una ventaja importante: permiten el flujo libre por ambos lados de la membrana. Además, las fibras huecas pueden ofrecer alta densidad de empaquetamiento, aunque su pequeño diámetro puede limitar la turbulencia y aumentar la importancia de la polarización y el ensuciamiento.

10.14. OPERACIÓN EN FLUJO PARALELO Y CONTRACORRIENTE

Una cuestión de diseño especialmente importante es la configuración hidráulica.

La operación en contracorriente permite mantener una diferencia osmótica más uniforme a lo largo del módulo.

Cath et al. comparan esto con lo que ocurre en un intercambiador de calor: con flujo en contracorriente, la fuerza impulsora osmótica se mantiene mejor a lo largo del módulo.

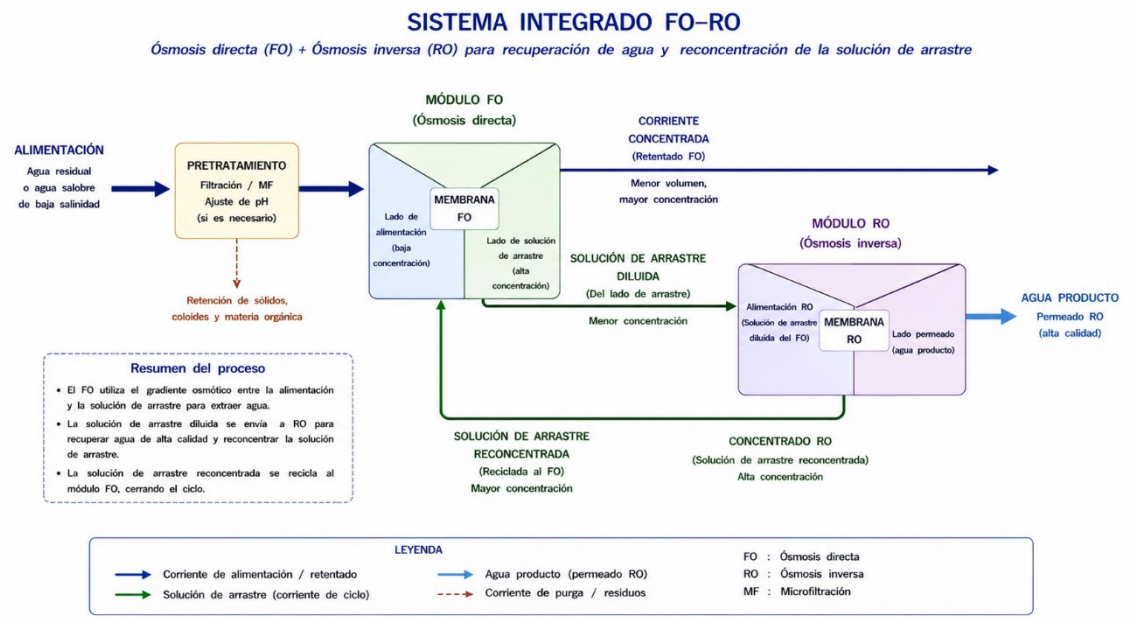
Por ello, en el diseño conceptual:

flujo contracorriente > flujo paralelo

si interesa mantener la fuerza impulsora lo más pareja posible. La opción definitiva queda supeditada al diseño del módulo, a las pérdidas de presión y a su hidráulica.

Figura 10.4

PFD simplificado de un sistema FO-RO



Nota: Elaboración propia basada en la integración FO-RO descrita por Cath et al. (2006).

Cath et al. (2006) presenta sistemas donde FO funciona como pretratamiento y RO produce el agua y reconcentra la solución de arrastre.

10.15. BALANCE DE MASA EN UN SISTEMA FO

Para un sistema continuo ideal, sin flujo inverso de soluto, el balance de agua puede escribirse como:

$Q_{FS, in} = Q_{FS, out} + Qw$

$Q_{DS, out} = Q_{DS, in} + Qw$

donde:

$Q_{FS, in}$ = alimentación de entrada

$Q_{FS, out}$ = alimentación concentrada de salida

$Q_{DS, in}$ = solución de arrastre de entrada

$Q_{DS, out}$ = solución de arrastre diluida de salida

Qw = agua transferida.

Para una operación por lotes:

$V_{FS, f} = V_{FS, i} - Vw$

$V_{DS, f} = V_{DS, i} + Vw$

La recuperación de agua respecto a la alimentación es:

$Recovery = Vw / V_{FS, i}$

o:

$Recovery (\%) = 100\ Vw / V_{FS, i}$

Ejemplo 10.3. Balance de agua

Una alimentación de 1000 L se trata mediante FO. Durante la operación se transfieren 600 L de agua a la solución de arrastre.

Entonces :

$V_{FS, f} = 1000 - 600$

$V_{FS, f} = 400$ L

Si se define la recuperación respecto a la alimentación:

$Recovery = 600/1000$

$Recovery = 0.60$

$Recovery = 60\ \%$

Este cálculo es sencillo, pero constituye la base para el dimensionamiento de etapas múltiples.

10.16. BALANCE DE SOLUTO

Supongamos inicialmente una membrana que rechaza completamente el soluto de alimentación y que no existe flujo inverso desde la solución de arrastre.

Si:

M_s, FS, in = masa de soluto en la alimentación inicial

Entonces:

M_s, FS, out = M_s, FS, in

y:

C_FS, out = M_s, FS, in / V_FS, out

Por tanto, al retirar agua:

C_FS, out > C_FS, in

Esto muestra por qué la FO es especialmente interesante para **concentrar corrientes**.

Para la solución de arrastre:

M_DS, out = M_DS, in

pero:

V_DS, out > V_DS, in

por lo que:

C_DS, out < C_DS, in

La solución de arrastre se diluye.

Si hay flujo inverso de soluto, los balances deben sumar la cantidad de soluto que cruza la membrana.

10.17. EJEMPLO INTEGRADO DE CONCENTRACIÓN

Considere:

V_FS, i = 1000 L

C_NaCl, FS = 2 g/L

$V_{DS,i} = 100\ L$

$C_{NaCl,DS} = 70\ g/L$

Suponga que se transfieren:

$$Vw = 600\ L$$

y, inicialmente, ignore el flujo inverso de NaCl.

Alimentación

Masa de NaCl:

$M_{FS} = (1000\ L)(2\ g/L)$

$M_{FS} = 2000\ g$

Volumen final:

$V_{FS,f} = 400\ L$

Por tanto:

$C_{FS,f} = 2000/400$

$C_{FS,f} = 5\ g/L$

La concentración de NaCl aumenta de 2 a 5 g/L.

Solución de arrastre

Masa inicial:

$M_{DS} = (100\ L)(70\ g/L)$

$M_{DS} = 7000\ g$

Volumen final:

$V_{DS,f} = 100 + 600$

$V_{DS,f} = 700\ L$

Por tanto:

$C_{DS,f} = 7000/700$

$C_{DS,f} = 10\ g/L$

La solución de arrastre se diluyó de 70 a 10 g/L.

Este resultado permite visualizar una limitación fundamental: **la fuerza impulsora no permanece constante durante la operación por lotes**.

10.18. DISEÑO PRELIMINAR DEL ÁREA DE MEMBRANA

Supongamos que se desea transferir:

$$Qw = 600 \text{ L/h}$$

y el flujo medio esperado es:

$$Jw = 10 \text{ L/m2 h}$$

Entonces:

$$Am = Qw/Jw$$

$$Am = 600/10$$

$$Am = 60 \text{ m2}$$

Por tanto, se requieren aproximadamente:

$$Am = 60 \text{ m2}$$

de área efectiva de membrana.

En una planta real debe introducirse un factor de diseño debido a:

- disminución del flujo;
- ensuciamiento;
- variación de concentración;
- temperatura;
- polarización;
- tiempo de operación;
- disponibilidad de membrana;
- margen de seguridad.

Por tanto:

Am, diseño = Am, cálculo × FD

donde FD es el factor de diseño seleccionado.

No debe confundirse esta estimación con el dimensionamiento definitivo de una planta comercial.

10.19. ENSUCIAMIENTO

La FO presenta ensuciamiento, aunque la ausencia de una elevada presión hidráulica puede modificar su comportamiento respecto a RO.

El ensuciamiento depende de:

- características de la alimentación;
- concentración;
- flujo;
- velocidad tangencial;
- membrana;
- material orgánico;
- sólidos suspendidos;
- microorganismos;
- composición de la solución de arrastre.

Al concentrar corrientes complejas, por ejemplo el céntrate de digestión anaerobia, el flujo disminuye por dos causas: menor fuerza impulsora y ensuciamiento, según muestran Cath et al. Ellos también reportan que, tras la limpieza, se recupera una fracción importante del flujo.

Por tanto:

polarización de concentración → mayor concentración superficial → mayor riesgo de ensuciamiento → menor flujo.

Esta relación será especialmente importante cuando en capítulos posteriores se estudien sistemas híbridos FO-RO.

10.20. APLICACIONES DE LA FO EN TRATAMIENTO DE AGUA

La FO ha sido estudiada para:

- concentración de aguas residuales industriales;
- concentración de lixiviados;
- concentración de corrientes de digestión anaerobia;
- recuperación de agua;
- desalación;
- pretratamiento para RO;
- sistemas de soporte vital;

- concentración de alimentos.

Esos mismos usos son los que desarrollan Cath et al. en su revisión: aguas residuales, lixiviados, reutilización del agua y desalación.

10.20.1. CONCENTRACIÓN DE LIXIVIADOS

Uno de los casos más interesantes para ingeniería ambiental es el tratamiento de lixiviados.

Cath et al. reportan un sistema piloto que utilizó una membrana CTA y NaCl como solución de arrastre. El sistema alcanzó recuperaciones de agua de 94–96 % durante pruebas con lixiviado, y posteriormente se construyó un sistema a escala completa. El proceso integró FO y RO: FO extraía agua del lixiviado y RO producía agua purificada y reconcentraba la solución de arrastre.

Este ejemplo es particularmente útil para el estudiante porque demuestra que:

FO no debe analizarse aisladamente.

En una aplicación industrial, la pregunta correcta es:

¿Qué función cumple FO dentro del tren completo de tratamiento?

10.20.2. DESALACIÓN

Para desalar con FO se necesita una solución de arrastre cuya presión osmótica sea suficientemente alta.

Un ejemplo histórico importante es el sistema de amoníaco–dióxido de carbono.

Cath et al. describen que esta combinación podía generar elevadas presiones osmóticas y que la solución de arrastre diluida podía ser posteriormente tratada térmicamente para recuperar sus componentes.

Sin embargo, el estudiante debe distinguir entre:

demostración experimental y

tecnología comercialmente competitiva.

Una presión osmótica alta, por sí sola, no asegura que el proceso sea económico.

10.21. FO INTEGRADA CON RO

Una de las configuraciones de mayor interés en ingeniería del agua es la siguiente:

Feed → FO → RO

Mientras la alimentación se vuelve más concentrada en FO, el agua migra hacia la solución de arrastre.

Posteriormente:

Draw diluida → RO → agua producto + Draw reconcentrada

La ventaja conceptual es que la FO puede operar con una alimentación difícil y concentrarla, mientras la RO realiza la separación final y regeneración de la solución de arrastre.

El artículo de Cath et al. presenta sistemas de recuperación de agua donde FO funciona como pretratamiento de RO.

Esta configuración anticipa uno de los temas centrales del **Capítulo 12: integración de procesos de membranas**.

10.22. ENERGÍA DE LA FO

Es incorrecto afirmar simplemente que:

"FO no consume energía".

Lo correcto, es decir:

la etapa osmótica puede operar sin una presión hidráulica elevada, pero el sistema completo requiere energía.

La energía se consume principalmente en:

- bombeo;
- circulación;
- pretratamiento;
- recuperación de la solución de arrastre;
- RO;
- MD;
- separación térmica;
- limpieza;
- control.

Membrane and Desalination Technologies señala que la primera etapa de FO, impulsada por la diferencia osmótica, no requiere una entrada energética significativa; el

consumo principal aparece en la producción del agua y en la regeneración de la solución de arrastre.

Por ello, para comparar tecnologías debe analizarse:

SEC = Energía total consumida / volumen de agua producto

expresado normalmente como:

SEC = kWh/m3

y no solamente la energía utilizada dentro del módulo FO.

10.23. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE FO FRENTE A RO

La FO puede ser especialmente atractiva cuando:

- la alimentación tiene alta concentración de sólidos;
- existe riesgo elevado de ensuciamiento;
- se desea concentrar una corriente;
- se dispone de una fuente adecuada de solución de arrastre;
- existe una tecnología económicamente favorable para regenerarla;
- se requiere una etapa de pretratamiento osmótico.

RO suele ser preferible cuando:

- se necesita producir directamente agua desalinizada;
- la alimentación puede ser adecuadamente pretratada;
- existe presión suficiente;
- se dispone de membranas y módulos comerciales;
- la regeneración de una solución de arrastre no aporta ventajas.

La decisión debe basarse en el **sistema completo**, no solamente en el consumo energético del módulo.

10.24. VENTAJAS Y LIMITACIONES

Ventajas

1. Baja presión hidráulica.
2. Elevada selectividad de la membrana.
3. Potencial para tratar alimentaciones complejas.

4. Posibilidad de concentrar corrientes.
5. Posibilidad de integración con RO.
6. Potencial para utilizar calor residual en la regeneración de algunas soluciones de arrastre.
7. Operación a bajas presiones.
8. Aplicaciones en aguas residuales y desalación.

Limitaciones

1. Polarización interna.
2. Flujo de agua relativamente bajo en determinadas condiciones.
3. Flujo inverso de soluto.
4. Ensuciamiento.
5. Necesidad de regenerar la solución de arrastre.
6. Complejidad de los módulos.
7. Falta de estandarización de determinados sistemas.
8. Costo de la solución de arrastre.
9. Energía requerida por el proceso de regeneración.

Cath et al. identifican como limitaciones fundamentales la necesidad de membranas de alto desempeño y de soluciones de arrastre fácilmente separables o regenerables.

10.25. METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA UN PROBLEMA DE FO

Para resolver problemas de FO recomiendo al estudiante seguir siempre esta secuencia:

Paso 1. Definir alimentación y solución de arrastre.

Paso 2. Calcular o estimar π_FS.

Paso 3. Calcular o estimar π_DS.

Paso 4. Determinar:

$$\Delta\pi = \pi_DS - \pi_FS$$

Paso 5. Calcular el flujo ideal:

$$Jw = A\sigma\Delta\pi$$

Paso 6. Evaluar polarización externa.

Paso 7. Evaluar polarización interna.

Paso 8. Determinar el flujo efectivo.

Paso 9. Calcular el caudal de agua:

$$Qw = Jw\ Am$$

Paso 10. Realizar los balances de masa.

Paso 11. Calcular recuperación.

Paso 12. Verificar el flujo inverso de soluto.

Paso 13. Evaluar la regeneración de la solución de arrastre.

Paso 14. Si se trata de una planta, integrar el resultado con RO, MD u otro proceso.

Esta metodología será más útil para el estudiante que una revisión extensa de todas las variantes de FO.

10.26. PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 10.1. Presión osmótica

Una solución de NaCl tiene concentración de 0.20 mol/L a 25 °C. Suponiendo comportamiento ideal y i = 2, determine la presión osmótica en bar.

Respuesta:

$$C = 200\ mol/m3$$

$$\pi = iCRT$$

$$\pi = 2(200)\ (8.314)\ (298.15)$$

$\pi \approx 9.92$ bar

Problema 10.2. Flujo ideal

Una membrana FO tiene:

$$A = 8.0\ x\ 10\text{^-}13\ m/(s\ Pa)$$

La alimentación presenta:

$\pi_FS = 5$ bar

y la solución de arrastre:

$\pi_DS = 35$ bar

Suponga:

$\sigma = 1$

$$\Delta P = 0$$

Determine Jw en L/m2 h.

Respuesta:

$$\Delta\pi = 35 - 5 = 30 \text{ bar}$$

30 bar = 3.0 x 10^6 Pa

$$Jw = (8.0 \times 10^{-13})(3.0 \times 10^{6})$$

$$Jw = 2.4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

Jw ≈ 8.64 L/m2 h

Problema 10.3. Área de membrana

Una instalación debe transferir 20 m3/h mediante FO. El flujo medio de diseño es 8 L/m2 h.

Determine el área de membrana.

Respuesta:

20 m3/h = 20,000 L/h

$$Am = 20{,}000/8$$

$$Am = 2500 \text{ m2}$$

Problema 10.4. Recuperación

Una corriente de alimentación de 50 m3/h se concentra mediante FO hasta producir una corriente concentrada de 20 m3/h.

Determine la recuperación de agua.

Respuesta:

$$Qw = 50 - 20 = 30 \text{ m3/h}$$

Recovery = 30/50

Recovery = 0.60

Recovery = 60 %

Problema 10.5. Resistencia interna

Determine K para:

$$t = 150\ \mu m$$

$\tau = 2.5$

$\varepsilon = 0.40$

$$Ds = 1.5 \times 10^{-9}\ m^2/s$$

Respuesta:

$$K = t\tau/(\varepsilon Ds)$$

$$K = (1.5 \times 10^{-4})(2.5)/[(0.40)(1.5 \times 10^{-9})]$$

$K \approx 6.25 \times 10^5\ s/m$

El estudiante debe interpretar qué cambios en t, τ y ε disminuirían esta resistencia.

10.27. PROBLEMA INTEGRADOR DE NIVEL DE MAESTRÍA

Una corriente de 100 m3/d contiene 3 g/L de NaCl. Se desea concentrarla mediante FO hasta 6 g/L. Se utiliza una solución de arrastre de NaCl que entra con 70 g/L.

Suponga inicialmente:

- rechazo de NaCl de la alimentación = 100 %;
- flujo medio = 10 L/m2 h;
- no existe flujo inverso de soluto;
- operación continua;
- concentración media constante para una primera estimación.

Determine:

a) caudal de alimentación concentrada;

b) caudal de agua transferida;

c) recuperación;

d) área de membrana;

e) caudal de solución de arrastre si se desea limitar su dilución de 70 a 35 g/L.

Solución

La masa de NaCl en la alimentación es:

$M_{NaCl} = (100\ m^3/d)(3\ kg/m^3)$

$M_{NaCl} = 300\ kg/d$

Para obtener 6 kg/m3:

Q_FS, out = 300/6

Q_FS, out = 50 m3/d

Por tanto:

$$Qw = 100 - 50$$

$$Qw = 50 \text{ m3/d}$$

La recuperación es:

Recovery = 50/100

Recovery = 50 %

El caudal de agua es:

50 m3/d = 50,000 L/d

= 2083 L/h

Área:

$$Am = 2083/10$$

Am ≈ 208 m2

Para la solución de arrastre, suponiendo que no hay pérdida de soluto y que su concentración disminuye de 70 a 35 g/L:

$C_i V_i = C_f V_f$

$70 V_i = 35 V_f$

$V_f = 2V_i$

Como:

$V_f = V_i + 50$

Entonces:

$2V_i = V_i + 50$

$V_i = 50$ m3/d

Por tanto, se requiere aproximadamente:

Q_DS, in = 50 m3/d

y:

Q_DS, out = 100 m3/d

Este cálculo muestra algo fundamental: **el dimensionamiento de FO no termina con el cálculo del área de membrana**. También debe determinarse cómo circula y cómo se regenera la solución de arrastre.

10.28. CRITERIOS DE DISEÑO QUE DEBE RECORDAR EL INGENIERO

Al diseñar de forma preliminar un sistema FO, las decisiones se pueden resumir en este orden:

1. Caracterizar la alimentación.

TDS, composición iónica, materia orgánica, sólidos suspendidos, temperatura, pH y potencial de ensuciamiento.

2. Determinar la presión osmótica.

Preferentemente mediante actividades cuando la concentración sea elevada.

3. Seleccionar la solución de arrastre.

No solamente por su presión osmótica, sino por su regenerabilidad.

4. Seleccionar la membrana.

Alta permeabilidad, alta retención y bajo K.

5. Seleccionar orientación.

Preferentemente minimizar la polarización interna.

6. Seleccionar módulo.

Considerando flujo hidráulico, área específica, limpieza y presión.

7. Calcular flujo efectivo.

No utilizar solamente el flujo teórico.

8. Determinar área.

$$Am = Qw/Jw$$

9. Realizar balances.

Agua + solutos.

10. Evaluar flujo inverso de soluto.

11. Diseñar la regeneración de DS.

12. Comparar energía y costo del sistema completo.

10.29. CONSIDERACIONES FINALES

La FO es una tecnología especialmente interesante porque transforma la diferencia de concentración de solutos en una fuerza impulsora para el transporte de agua. Sin embargo, su aparente simplicidad desaparece cuando se analiza el proceso a nivel de ingeniería.

El flujo no depende únicamente de:

$$\Delta\pi = \pi_DS - \pi_FS$$

y no de las concentraciones del seno: predomina el diferencial osmótico efectivo en la capa activa.

La polarización de concentración externa reduce esta diferencia mediante cambios en las concentraciones próximas a la membrana. La polarización interna puede ser todavía más importante porque se desarrolla dentro del soporte poroso y no puede eliminarse simplemente aumentando el flujo tangencial. Cath et al. muestran precisamente que la diferencia de presión osmótica a granel puede ser sustancialmente mayor que la fuerza impulsora efectiva en la membrana.

Por ello, la ecuación:

$$Jw = A\Delta\pi$$

debe considerarse como **el punto de partida**, no como el modelo final de diseño.

La ingeniería de FO consiste en lograr simultáneamente:

alta Δπ + baja polarización + baja resistencia interna + alta retención + bajo flujo inverso de soluto + bajo ensuciamiento + regeneración económica de la solución de arrastre.

Esta última condición pesa mucho. Aunque la solución de arrastre haga viable el proceso en términos termodinámicos, puede terminar siendo el mayor obstáculo energético y económico.

El principal aprendizaje para el estudiante de maestría debe ser, por tanto:

No se debe preguntar solamente cuánto flujo puede producir una membrana FO; se debe preguntar cuánta agua puede producir un sistema FO completo, con qué calidad, con qué recuperación, qué energía requiere y cómo se regenera la solución de arrastre.

CAPÍTULO 11

DESTILACIÓN POR MEMBRANA CON GAS DE BARRIDO (SGMD)

11.1 INTRODUCCIÓN

El SGMD (Sweeping Gas Membrane Distillation) es una variante en la que aire u otro gas inerte fluye junto al permeado y retira el vapor que atraviesa la membrana. En el módulo de contacto directo (DCMD) la condensación ocurre adentro; en el SGMD el gas conduce el vapor hacia un condensador externo, y condensar dentro del equipo no es obligatorio.

Lo visto antes sigue valiendo. La membrana microporosa hidrofóbica separa los líquidos y deja cruzar a las especies volátiles como vapor, movidas por el diferencial de presión parcial de vapor entre sus caras. En SGMD ese diferencial se obtiene con un gas que corre por el permeado, recoge el vapor generado y lo acarrea. Khayet y Matsuura lo plantean así: el gas barre el permeado y envía el vapor a condensarse fuera del módulo.

El proceso puede utilizarse para desalación y concentración de soluciones acuosas que contienen solutos no volátiles, pero también presenta especial interés para el tratamiento de corrientes que contienen compuestos orgánicos volátiles. En estas aplicaciones, la posibilidad de mantener seco el lado del permeado evita el contacto de un líquido de enfriamiento con la membrana, lo que puede ser ventajoso cuando existe riesgo de humectación de los poros desde ese lado.

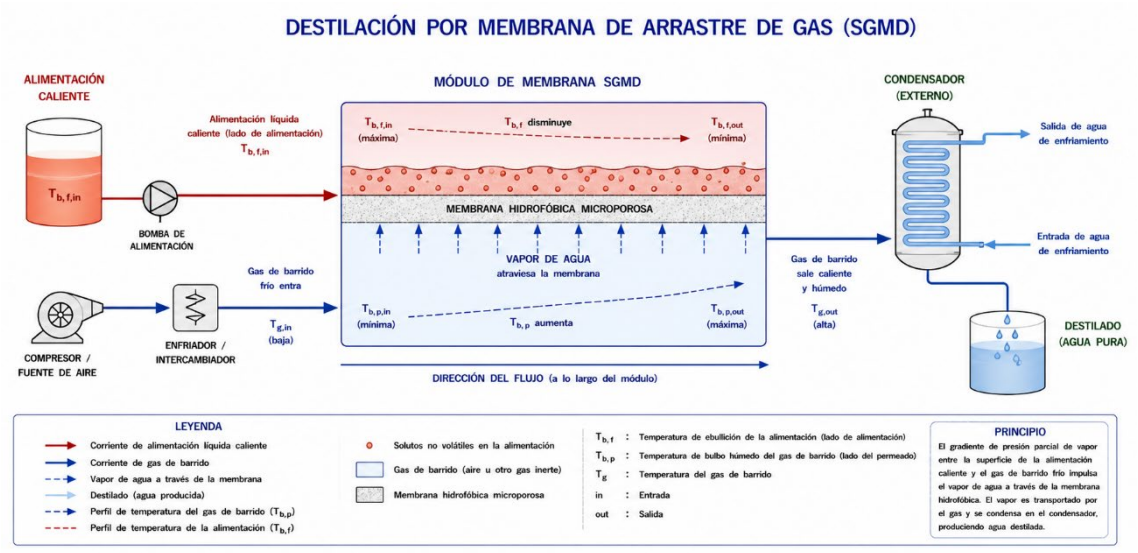
Desde la ingeniería, conviene analizar el SGMD como un sistema acoplado formado por:

1. transferencia de calor desde la alimentación;
2. evaporación en la superficie de la membrana;
3. transporte de vapor a través de los poros;
4. transferencia de calor y materia en la corriente gaseosa;
5. calentamiento y humidificación progresiva del gas;
6. condensación externa del vapor.

Esta última característica es decisiva. A lo largo del módulo el gas no conserva sus condiciones de entrada: se calienta y gana vapor, de manera que la fuerza impulsora va bajando en el sentido del flujo.

Figura 11.1

Esquema de operación de un sistema SGMD con condensación externa



Nota. Elaboración propia a partir de Khayet y Matsuura (2011) y Benyahia (2019).

11.2 FUNDAMENTO FÍSICO DE LA SGMD

El líquido de alimentación no puede entrar en los poros si la membrana es hidrofóbica. Lo que ocurre es que el agua se evapora desde su superficie, y luego el vapor cruza los poros porque existe una diferencia de presión parcial.

Para agua como único componente permeante:

$J_w = B_w \Delta p_w$

donde:

J_w = flujo de vapor de agua, kg/(m² s)

B_w = permeabilidad de la membrana para el agua

Δp_w = diferencia de presión parcial del vapor de agua

La diferencia de presión parcial puede expresarse como:

$\Delta p_w = p_{w,m,f} - p_{w,m,p}$

Por tanto:

$J_w = B_w (p_{w,m,f} - p_{w,m,p})$

En la superficie de la alimentación:

p_w, m, f = p_w^0(T_m, f) a_w, f

donde:

p_w^0(T_m, f) = presión que ejercería el vapor de agua pura cuando está la membrana a su temperatura superficial

a_w, f = actividad del agua en la alimentación

En el lado del gas:

p_w, m, p = y_w, m, p P

donde:

y_w, m, p = fracción molar de agua en el gas

P = presión total del gas.

En soluciones salinas esto tiene especial relevancia: más sales significan menos actividad del agua, y por tanto una presión de vapor menor para impulsar el transporte.

11.3 HUMEDAD DEL GAS DE BARRIDO

A diferencia de lo que pasa en DCMD, en SGMD la corriente de gas no es constante; se modifica continuamente porque va tomando vapor.

Para aire húmedo se utiliza la razón de humedad:

w = m_v / m_a

donde:

w = razón de humedad, kg de vapor/kg de aire seco

m_v = masa de vapor de agua

m_a = masa de aire seco

La presión parcial del agua en el gas puede calcularse mediante:

p_w, p = w P / (w + 0.622)

Con esta expresión se pasa de la humedad del gas a la presión parcial de vapor.

Si la corriente gaseosa entra al módulo con una razón de humedad w_in, entonces, para una aproximación global:

w_out = w_in + J_w A / m_dot_a

donde:

w_out = razón de humedad a la salida

w_in = razón de humedad a la entrada

J_w = flujo de vapor de agua

A = área efectiva de membrana

m_dot_a = flujo másico de aire seco.

En la práctica esta ecuación importa mucho, porque indica que ampliar el área de membrana o reducir el flujo de gas hace subir la humedad a la salida.

11.4 Ecuación global de flujo de agua

Combinando:

J_w = B_w (p_w, m, f - p_w, m, p)

y al reemplazar la humedad del gas por su expresión, el flujo queda definido por una ecuación implícita.

En la formulación presentada por Khayet y Matsuura:

$J_w^2 + bJ_w + c = 0$

donde:

b = (w_in + 0.622) m_dot_a/A + B_w (P - p_w, f^0 a_w, f)

y:

c = B_w(m_dot_a/A) [P w_in - p_w, f^0 a_w, f (w_in + 0.622)]

La solución físicamente válida es la raíz positiva:

$J_w = [-b + \sqrt{(b^2 - 4c)}]/2$

Entre los cálculos del capítulo, este resulta de los más provechosos, pues el flujo de SGMD se estima teniendo en cuenta a la vez cuánto permite pasar la membrana y cuánto sube la humedad del gas.

Para el estudiante de maestría es importante entender que no basta con calcular:

$J_w = B_w \Delta p$

utilizando las condiciones de entrada. Si el módulo es suficientemente grande, la corriente gaseosa se humidifica y se calienta, por lo que la fuerza impulsora disminuye a lo largo del módulo.

11.5 TRANSPORTE DE VAPOR A TRAVÉS DE LA MEMBRANA

El transporte dentro de los poros puede presentar diferentes mecanismos.

11.5.1 FLUJO DE KNUDSEN

Si las moléculas recorren, en promedio, distancias grandes comparadas con el diámetro del poro, las colisiones con la pared son las que mandan.

Una forma simplificada del coeficiente de permeabilidad de Knudsen es:

$B_{K,j} = (2\varepsilon r)/(3\tau\delta)\,[8/(\pi M_j RT)]^{0.5}$

donde:

ε = porosidad

r = radio medio del poro

τ = tortuosidad

δ = espesor de la membrana

M_j = masa molar de la especie j

R = constante de los gases

T = temperatura absoluta.

11.5.2 Flujo viscoso o de Poiseuille

Cuando las colisiones entre moléculas predominan sobre las colisiones con la pared:

$B_{V,j} = \varepsilon r^2 P_m/(8\tau\delta\,\eta_j\,RT)$

donde:

P_m = presión media en los poros

η_j = viscosidad del componente.

11.5.3 Difusión molecular

Cuando el transporte está dominado por difusión molecular a través del gas contenido en los poros:

$B_{D,j} = \varepsilon D_j/(\tau\delta RTY_{lm})$

donde:

D_j = coeficiente de difusión

Y_{lm} = fracción molar logarítmica del gas que ocupa los poros.

Estas tres posibilidades son importantes para que el estudiante comprenda por qué no debe seleccionar una ecuación de transporte solamente por comodidad matemática. La trayectoria libre media y las características de la membrana determinan qué mecanismo es razonable.

11.6 TRANSPORTE COMBINADO KNUDSEN-DIFUSIÓN MOLECULAR

Para las membranas estudiadas en SGMD, Khayet y Matsuura encontraron que el transporte combinado Knudsen/difusión molecular podía describir adecuadamente los resultados experimentales.

En este caso:

1/B_C, j = 1/B_K, j + 1/B_D, j

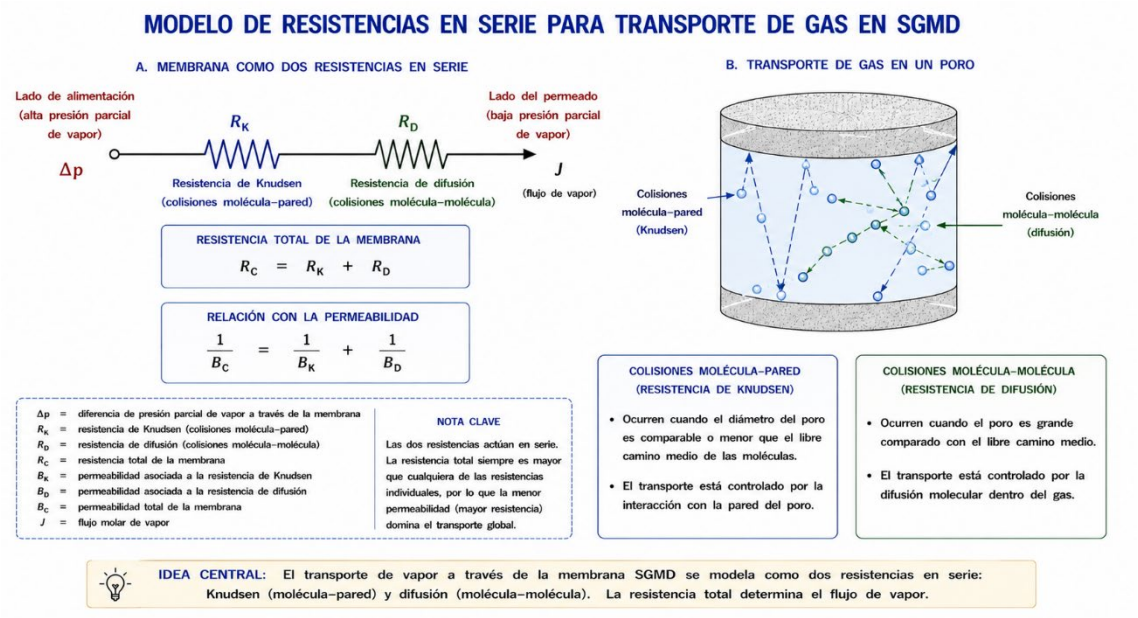
o, equivalentemente:

B_C, j = B_K, j + R_D, j

Esta ecuación representa una suma de resistencias, todas ellas a la transferencia de materia.

Figura 11.2

Resistencias a la transferencia de materia a lo largo del transporte en la membrana



Nota: Elaboración propia a partir de Khayet y Matsuura (2011).

El concepto corresponde al modelo de resistencias en serie utilizado por Khayet et al. para SGMD.

Un resultado particularmente interesante es que, para las membranas analizadas por Khayet et al., el mecanismo combinado proporcionó mejor correspondencia con los datos experimentales que los modelos de Knudsen o Poiseuille considerados individualmente. En membranas TF200 y TF450, la contribución de la difusión molecular ordinaria fue importante, especialmente para la membrana de mayor tamaño de poro.

11.7 TRANSFERENCIA DE CALOR EN SGMD

El proceso térmico puede dividirse en tres resistencias principales:

1. calor que fluye del líquido de alimentación a la superficie de la membrana;
2. transferencia de calor a través de la membrana;
3. transferencia de calor desde la membrana hacia el gas de barrido.

Por tanto:

$$Q = h_f (T_{b,f} - T_{m,f})$$

$$Q = (k_m/\delta) (T_{m,f} - T_{m,p}) + \Sigma J_i \Delta H_{v,i}$$

$$Q = h_p (T_{m,p} - T_{b,p})$$

y globalmente:

$$Q = H (T_{b,f} - T_{b,p})$$

donde:

h_f = coeficiente de transferencia de calor en la alimentación

h_p = coeficiente de transferencia de calor en el gas

k_m = conductividad térmica efectiva de la membrana

$T_{b,f}$ = temperatura de alimentación a granel

$T_{m,f}$ = temperatura que alcanza la alimentación al llegar a la membrana

$T_{m,p}$ = temperatura en la superficie de la membrana por el lado donde circula el gas

$T_{b,p}$ = temperatura del gas a granel.

Estas relaciones muestran por qué SGMD tiene una particularidad importante: el lado gaseoso puede convertirse en la principal resistencia térmica. Khayet y Matsuura

señalan que el coeficiente de transferencia de calor del lado gaseoso es mucho menor que el correspondiente al líquido, por lo que la polarización térmica queda principalmente localizada en el lado del gas.

11.8 PÉRDIDA DE CALOR POR CONDUCCIÓN Y EFICIENCIA TÉRMICA

El calor que atraviesa la membrana puede dividirse en:

$Q_m = Q_c + Q_v$

donde:

Q_c = calor transferido por conducción

Q_v = calor asociado a la evaporación.

Para varios componentes:

$Q_v = \Sigma J_i \Delta H_{v,i}$

La eficiencia térmica puede definirse como:

$\eta = Q_v / (Q_v + Q_c) \times 100$

Una eficiencia elevada significa que una mayor proporción del calor transferido se utiliza para producir vapor y una menor proporción se pierde por conducción.

Los estudios comparativos incluidos en la bibliografía muestran que, bajo determinadas condiciones, SGMD puede presentar una eficiencia térmica superior a DCMD debido a menores pérdidas internas por conducción. En las condiciones estudiadas por Khayet et al., el flujo de SGMD llegó a ser aproximadamente 1.4 veces el de DCMD utilizando el mismo módulo y condiciones de alimentación.

11.9 ENTALPÍA DEL AIRE HÚMEDO

El balance de energía, cuando el gas de barrido es aire, se escribe a partir de la variación de entalpía del aire húmedo.

$$Q = \dot{m}_a (h_{a,out} - h_{a,in}) / A$$

La entalpía específica puede aproximarse mediante:

$h_a = (c_a + w c_v) T_a + w \Delta H_v^0$

donde:

c_a = calor específico del aire seco

c_v = calor específico del vapor de agua

w = razón de humedad

ΔH_v^0 = entalpía de vaporización de referencia.

Para una corriente en estado estacionario:

$$Q/A = m_{dot_a}/A \left[(c_a + w_{in}\, c_v)(T_{a,out} - T_{a,in})\right] + J_w (\Delta H_v^0 + c_v T_{a,out})$$

Con esta ecuación se enlaza el cálculo de la membrana con el balance de energía de todo el sistema.

11.10 POLARIZACIÓN DE TEMPERATURA

La polarización de temperatura se define mediante:

$$\theta = (T_{m,f} - T_{m,p}) / (T_{b,f} - T_{b,p})$$

Un valor de :

$$\theta \rightarrow 1$$

quiere decir que, sobre las superficies de la membrana, la diferencia de temperatura efectiva se acerca a la de las corrientes a granel.

En SGMD puede descomponerse:

$$\theta = \theta_f + \theta_p - 1$$

donde:

$$\theta_f = (T_{m,f} - T_{b,p}) / (T_{b,f} - T_{b,p})$$

$$\theta_p = (T_{b,f} - T_{m,p}) / (T_{b,f} - T_{b,p})$$

El análisis permite identificar dónde está localizada la principal resistencia térmica.

Cuando el lado gaseoso tiene una transferencia de calor muy baja:

$$h_p << h_f$$

la resistencia del gas domina y:

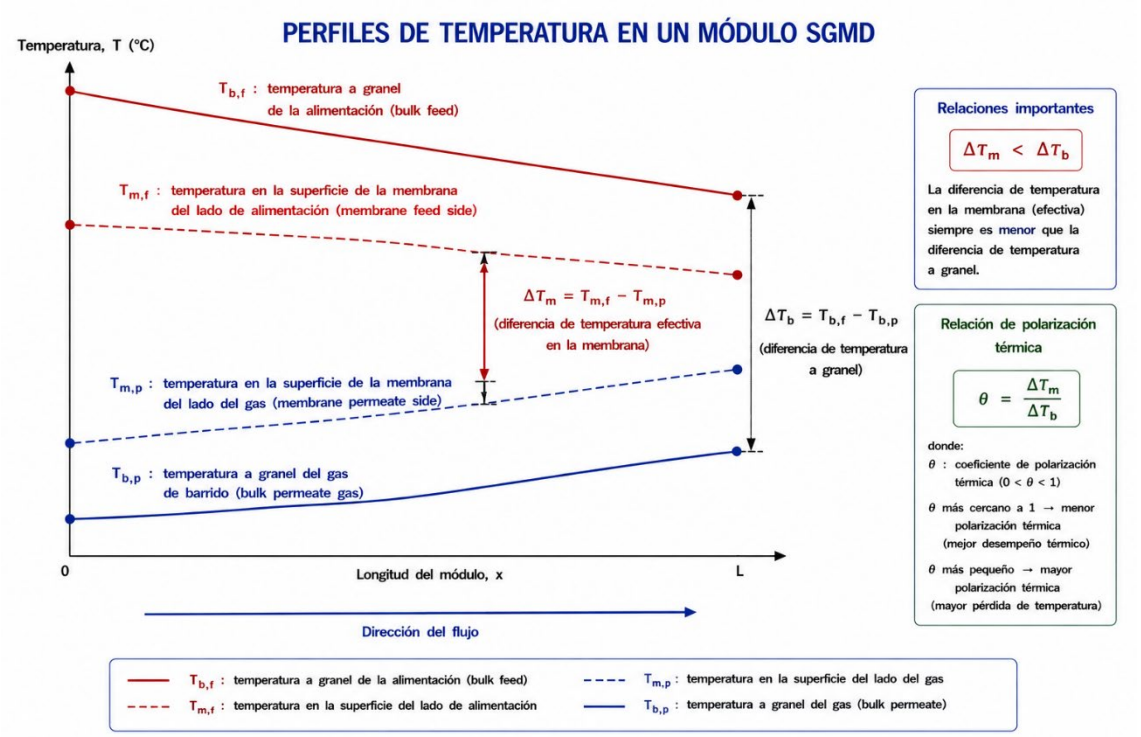
$$T_{m,p} << T_{b,p}$$

en términos de aproximación a la temperatura de la corriente correspondiente.

Por eso, subir la velocidad del gas puede aumentar el flujo de forma considerable.

Figura 11.3

Polarización térmica y perfil de temperaturas en un módulo SGMD, de entrada a salida



Nota: Elaboración propia a partir de Khayet y Matsuura (2011).

Este perfil proviene de modelos de SGMD en los que se observa que el gas se calienta de modo gradual mientras la alimentación se va enfriando a lo largo del módulo.

11.11 VARIACIÓN DEL FLUJO A LO LARGO DEL MÓDULO

A diferencia de un modelo perfectamente mezclado, en SGMD las propiedades cambian con la posición.

Por ello debe considerarse:

$J_w = J_w(x)$

y el flujo medio:

$J_{w,avg} = (1/L) \int_0^L J_w(x)\, dx$

En un modelo de diseño discretizada, el módulo puede dividirse en N elementos:

$$\Delta A = A/N$$

Para cada elemento:

1. calcular la temperatura de alimentación;

2. calcular la temperatura del gas;
3. calcular la presión de vapor en ambos lados;
4. calcular la humedad del gas;
5. calcular el flujo local;
6. calcular el calor transferido;
7. actualizar las condiciones de salida del elemento;
8. continuar con el siguiente elemento.

Este procedimiento es mucho más apropiado para diseño que utilizar solamente las condiciones de entrada.

La necesidad de calcular perfiles locales de temperatura, concentración y flujo se encuentra explícitamente señalada en el tratamiento teórico de SGMD de Khayet y Matsuura.

11.12 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE ALIMENTACIÓN

En SGMD, la temperatura de alimentación figura entre los parámetros de mayor peso.

Al aumentar T_b, f:

- aumenta la presión de vapor del agua;
- aumenta la fuerza impulsora;
- aumenta el flujo de permeado;
- aumenta la carga térmica;
- puede aumentar la polarización térmica;
- pueden modificarse las selectividades cuando existen componentes volátiles.

La presión de vapor cambia con la temperatura de forma marcadamente no lineal. Por eso, calentar más la alimentación suele rendir bastante más que enfriar un poco el gas de barrido.

Khayet et al. observaron en sus experimentos que, al subir la temperatura de alimentación, el flujo aumentaba bastante. Ese aumento resultó menor al esperado si solo se considerara la presión de vapor, y la causa fue la polarización térmica.

11.13 INFLUENCIA DEL FLUJO DE GAS

Este es probablemente el parámetro operacional más característico de SGMD.

Al aumentar la velocidad del gas:

- aumenta el número de Reynolds;
- aumenta el coeficiente de transferencia de calor;
- disminuye la polarización térmica del lado gaseoso;
- disminuye la presión parcial local del agua;
- aumenta la fuerza impulsora;
- aumenta el flujo de permeado.

Sin embargo, no debe concluirse que:

más gas = siempre más producción.

Hay una zona donde el flujo tiende a un valor asintótico. En ciertos experimentos, incluso bajó al seguir aumentando la velocidad del gas, lo que se atribuyó a la mayor presión que hace falta para impulsar el gas y a una resistencia de transferencia de materia más alta.

Por ello, el diseño debe buscar una velocidad óptima y no simplemente maximizar el caudal de aire.

Benyahia destaca además que el aumento del flujo de gas tiene consecuencias directas sobre el consumo energético del lado del permeado, debido al compresor o sistema de circulación y a la posterior condensación del vapor.

11.14 INFLUENCIA DEL FLUJO DE ALIMENTACIÓN

Si la resistencia térmica del lado del gas es la que domina, el caudal de alimentación tendrá en SGMD un efecto menor que el caudal de gas.

Al aumentar la velocidad de alimentación:

- aumenta el coeficiente de transferencia de calor;
- disminuye la polarización térmica en la alimentación;
- puede aumentar el flujo;
- aumenta la pérdida de carga;

- puede elevar el riesgo de humectación cuando la presión hidrostática resulta excesiva.

Los resultados experimentales muestran que este efecto depende del tipo de aplicación. Para soluciones de IPA, por ejemplo, se observó incremento del flujo al aumentar el caudal de alimentación debido a la reducción de la resistencia de la capa límite.

11.15 INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE SALES

Con sales no volátiles en la alimentación, una mayor concentración baja la actividad del agua:

$a_w \downarrow$

y por tanto:

$p_w, f \downarrow$

con la consecuencia:

$\Delta p_w \downarrow$

y:

$J_w \downarrow$

Sin embargo, en los experimentos de desalación citados por Khayet y Matsuura, la disminución del flujo con la salinidad fue relativamente pequeña frente al efecto de la polarización térmica. Se obtuvieron factores de rechazo de sal superiores a 99.9 %.

Este resultado es particularmente importante para tratamiento de aguas: SGMD puede producir agua de elevada pureza, pero el diseño debe evitar alcanzar condiciones de sobresaturación que favorezcan cristalización y scaling.

11.16 TRATAMIENTO DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

SGMD presenta una característica que la diferencia especialmente de las aplicaciones convencionales de desalación.

Si la alimentación contiene:

- etanol;
- isopropanol;

- acetona;
- amoníaco;
- otros compuestos orgánicos volátiles,

estas especies también pueden atravesar la membrana.

Para un compuesto i se puede definir un factor de separación:

$\alpha_i = [y_{i,p}/(1-y_{i,p})] / [x_{i,f}/(1-x_{i,f})]$

donde:

$x_{i,f}$ = fracción molar del compuesto en la alimentación

$y_{i,p}$ = fracción molar del compuesto en el permeado gaseoso.

Para múltiples especies:

$$J = \Sigma B_j (p_{j,f} - p_{j,p})$$

Esta situación requiere abandonar el modelo simple de "agua que atraviesa y sal que queda". En una corriente con compuestos volátiles existe transporte multicomponente.

Los resultados experimentales recopilados en Khayet y Matsuura muestran que la temperatura, concentración del compuesto y velocidad del gas pueden afectar simultáneamente el flujo total y la selectividad.

11.17 CASO PARTICULAR: ELIMINACIÓN DE AMONÍACO

La eliminación de amoníaco constituye una aplicación interesante para tratamiento de aguas.

El pH tiene un efecto importante porque modifica el equilibrio entre las especies de amonio y amoníaco. En los estudios citados, al aumentar el pH se incrementaron tanto el coeficiente de transferencia de masa del amoníaco como la selectividad.

En un estudio con aproximadamente 100 mg/L de amoníaco, pH 11.5 y una membrana PTFE, se reportó una eliminación de aproximadamente 97 %, obteniéndose una concentración cercana a 3.3 mg/L bajo condiciones favorables de temperatura y flujo de gas.

Estos datos deben utilizarse como referencia experimental y no como garantía de diseño. El comportamiento depende de la membrana, módulo, temperatura, pH, concentración inicial y flujo de gas.

11.18 CASO PARTICULAR: ALCOHOLES Y COMPUESTOS ORGÁNICOS

Para soluciones de IPA, etanol y acetona se han observado comportamientos diferentes a los de la desalación.

En general:

aumento de concentración de compuesto volátil → aumento de flujo total

pero:

aumento de concentración → puede disminuir la selectividad.

Esto sucede porque el compuesto orgánico y el agua son capaces de atravesar la membrana.

Para estas aplicaciones resulta necesario resolver simultáneamente:

J_w

J_i

y:

J_total = J_w + J_i

En sistemas multicomponente, los modelos de Stefan-Maxwell pueden ser necesarios. Khayet y Matsuura presentan modelos de este tipo para mezclas binarias y señalan que la separación no depende exclusivamente del equilibrio líquido-vapor, sino también de la difusión y de las condiciones de operación.

11.19 SELECCIÓN DE LA MEMBRANA

La membrana para SGMD debe presentar:

- elevada hidrofobicidad;
- porosidad elevada;
- espesor reducido;
- tamaño de poro adecuado;
- baja tortuosidad;
- resistencia química;
- resistencia térmica;
- elevada resistencia al humedecimiento.

Existe, sin embargo, un compromiso.

Un poro más grande puede dar más flujo, pero también puede restar resistencia a la humectación y alterar la selectividad.

Una membrana más delgada tiene mayor permeabilidad, aunque pierde resistencia mecánica.

Aumentar la porosidad puede mejorar la transferencia de materia, pero puede modificar la resistencia térmica y mecánica.

Por tanto, no debe seleccionarse una membrana solamente por su máximo flujo experimental.

11.20 DISEÑO DEL MÓDULO SGMD

El módulo debe diseñarse considerando simultáneamente:

$A_m = Q_p/J_w$

donde:

A_m = área de membrana

Q_p = producción de permeado

J_w = flujo promedio.

Por ejemplo, si se requiere:

$Q_p = 1\ m^3/día$

y se estima:

$J_w = 5\ kg/(m^2\ h)$

considerando aproximadamente 1 kg de agua ≈ 1 L:

$Q_p = 1000\ kg/día = 41.67\ kg/h$

entonces:

$A_m = 41.67/5$

$A_m = 8.33\ m^2$

En diseño real debe incorporarse un factor de sobredimensionamiento debido a:

- disminución del flujo a lo largo del módulo;
- ensuciamiento;

- variación de temperatura;
- variación de salinidad;
- envejecimiento de la membrana;
- incertidumbre del modelo.

11.21 BALANCE DE MASA DEL GAS

Si solamente se transporta agua:

$$\dot{m}_a w_{out} = \dot{m}_a w_{in} + J_w A$$

por lo tanto:

$$\dot{m}_a = J_w A$$

y:

$$w_{out} = w_{in} + J_w A/\dot{m}_a$$

Esta ecuación permite calcular una variable fundamental de diseño: el caudal de gas necesario.

Despejando:

$$\dot{m}_a = J_w A/(w_{out} - w_{in})$$

Esta ecuación muestra directamente el compromiso entre área de membrana y flujo de aire.

Para una misma producción:

- aumentar A permite reducir J_w;
- aumentar $\dot{m}_a$ permite reducir la humidificación del gas;
- reducir $\dot{m}_a$ aumenta la humedad de salida;
- aumentar demasiado $\dot{m}_a$ incrementa el consumo energético de circulación.

11.22 CONDENSADOR EXTERNO

Una diferencia fundamental entre SGMD y DCMD es que el vapor debe ser recuperado mediante una etapa externa cuando no condensa dentro del módulo.

El condensador debe ser capaz de retirar:

$$Q_{cond} \approx \dot{m}_v \Delta H_v$$

donde:

m_dot_v = caudal de vapor condensado.

El diseño debe considerar:

- temperatura del gas;
- humedad del gas;
- caudal de gas;
- temperatura del refrigerante;
- coeficiente global de transferencia de calor;
- área de intercambio.

Por ello, una SGMD que tenga un excelente flujo de membrana puede presentar una producción global inferior a la prevista si el condensador es insuficiente. De hecho, en los experimentos de desalación recopilados por Khayet y Matsuura, parte de la diferencia entre flujo calculado y experimental fue atribuida a limitaciones de la eficiencia del condensador.

11.23 CRITERIO DE PRESIÓN Y PREVENCIÓN DE HUMECTACIÓN

La presión del gas puede ser casi atmosférica; aun así, la diferencia de presión entre el lado de la alimentación y el del permeado requiere un control cuidadoso.

Debe cumplirse:

ΔP_transmembrana < LEP

donde:

LEP = presión de entrada de líquido (Liquid Entry Pressure).

Si:

ΔP_transmembrana > LEP

el líquido puede penetrar en los poros y la membrana pierde su carácter hidrofóbico.

Khayet y Matsuura advierten que al aumentar excesivamente el flujo del gas puede aumentar la presión del lado del permeado, por lo que existe un límite operativo asociado a la humectación.

11.24 COMPARACIÓN SGMD–DCMD–VMD

Para el estudiante es útil resumir las diferencias principales:

SGMD:

Fuerza impulsora: diferencia de presión parcial

Lado permeado: gas de barrido

Condensación: normalmente externa

Principal limitación térmica: lado gaseoso

Ventaja: evita contacto con líquido en el lado permeado

Desventaja: requiere gas y condensador externo

DCMD:

Fuerza impulsora: diferencia de presión de vapor

Lado permeado: líquido frío

Condensación: dentro del módulo

Limitación: transferencia de calor en ambos lados

VMD:

Fuerza impulsora: diferencia de presión de vapor asociada al vacío

Lado permeado: vacío

Condensación: normalmente externa

Ventaja: elevada fuerza impulsora

Desventaja: consumo y complejidad del sistema de vacío.

Johnson y Nguyen destacan que SGMD elimina la resistencia de transferencia de materia asociada con el aire estacionario de AGMD, pero conserva una importante resistencia térmica en el lado gaseoso.

11.25 INDICADORES DE DESEMPEÑO

Los principales indicadores que el estudiante debe calcular son:

Flujo de permeado:

$$J = m_p/ (A\ t)$$

Recuperación:

$$Y = Q_p/Q_f$$

Rechazo de sal:

$$R_s = (1 - C_p/C_f) \times 100$$

Eficiencia térmica:

$$\eta = Q_v/(Q_v + Q_c) \times 100$$

Consumo específico de energía térmica:

$$SEC_{th} = Q_{th}/m_p$$

Consumo eléctrico específico:

$$SEC_{el} = W_{el}/V_p$$

Factor de separación para un compuesto volátil:

$$\alpha_i = [y_{i,p}/(1-y_{i,p})]/[x_{i,f}/(1-x_{i,f})]$$

Estos indicadores permiten pasar de una caracterización de membrana a una evaluación de proceso.

11.26 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

La optimización de SGMD no consiste en maximizar un solo parámetro.

Debe buscarse una combinación adecuada de:

T_f

T_g

v_f

v_g

A

δ

ε

r_p

P

C_f

y las condiciones de condensación.

Una estrategia práctica consiste en:

Paso 1. Fijar la producción requerida.

Paso 2. Seleccionar la membrana.

Paso 3. Estimar B_w.

Paso 4. Seleccionar una temperatura inicial de alimentación.

Paso 5. Seleccionar una velocidad inicial del gas.

Paso 6. Calcular el flujo local.

Paso 7. Calcular la humidificación del gas.

Paso 8. Calcular el balance térmico.

Paso 9. Calcular el área.

Paso 10. Verificar LEP.

Paso 11. Dimensionar el condensador.

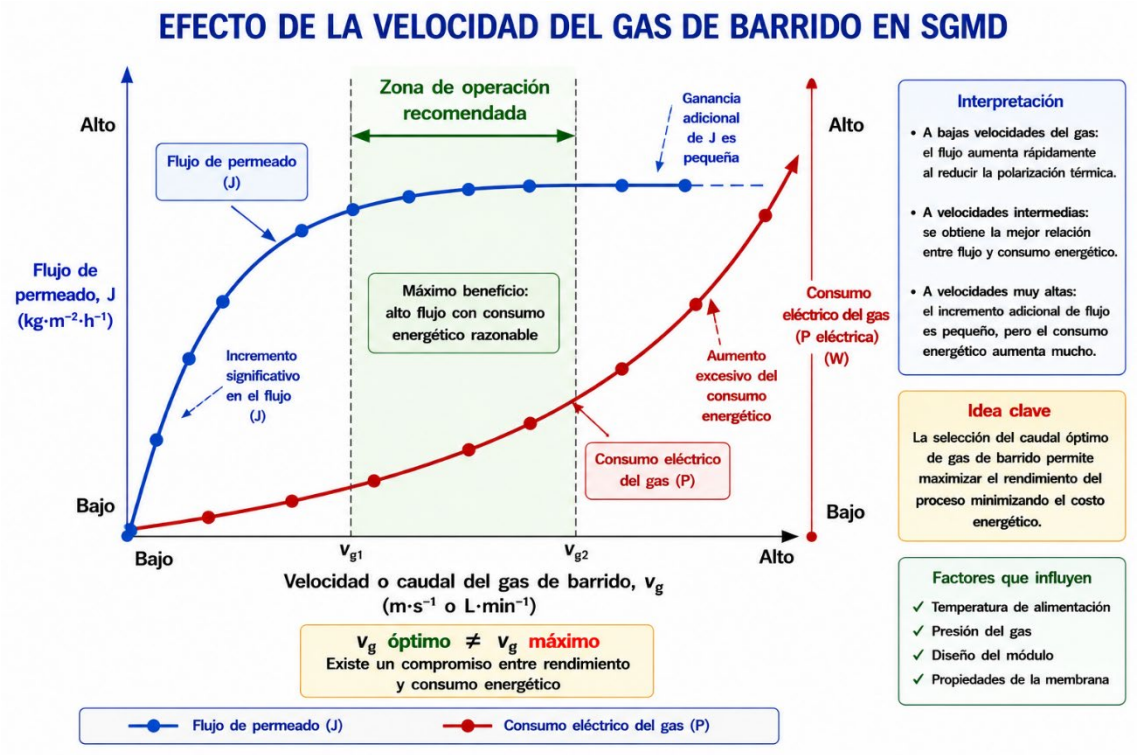
Paso 12. Calcular consumo térmico y eléctrico.

Paso 13. Repetir para diferentes velocidades del gas.

Paso 14. Seleccionar el punto de operación que maximice la producción con un consumo energético aceptable.

Figura 11.4

Ventana de operación y balance entre el flujo de permeado y el caudal de gas



Nota: Elaboración propia a partir de Khayet y Matsuura (2011), Benyahia (2019) y Johnson y Nguyen (2017).

La forma conceptual de la curva se sustenta en los resultados experimentales que muestran aumento del flujo con la velocidad del gas hasta valores asintóticos y, en algunos estudios, una disminución posterior.

11.27 EJEMPLO DE CÁLCULO 1. ESTIMACIÓN DEL ÁREA DE MEMBRANA

Se desea producir 2 m³/día de agua mediante SGMD.

Datos:

Producción = 2 m³/día

Flujo promedio estimado = 5 kg/(m² h)

Densidad del agua = 1000 kg/m³

Primero:

$m_p = 2 \times 1000$

$m_p = 2000$ kg/día

Por hora:

$m_p = 2000/24$

$m_p = 83.33$ kg/h

El área requerida es:

$$A = m_p/J$$

$$A = 83.33/5$$

$$A = 16.67 \text{ m}^2$$

Por tanto:

$A \approx 16.7$ m²

Si se adopta un factor de sobredimensionamiento de 20 %:

$A_{diseño} = 16.67 \times 1.20$

$A_{diseño} = 20.0$ m²

Resultado:

Área de diseño ≈ 20 m²

Este ejemplo debe servir al estudiante para comprender que el flujo experimental de una membrana se transforma directamente en un primer dimensionamiento de área, pero que posteriormente debe corregirse por las condiciones reales del módulo.

11.28 EJEMPLO DE CÁLCULO 2. CAUDAL DE AIRE REQUERIDO

Supóngase:

$J_w = 5$ kg/(m² h)

$$A = 20 \text{ m}^2$$

$w_{in} = 0.010$ kg/kg

Se desea limitar:

$w_{out} = 0.030$ kg/kg

Primero:

$\dot{m}_v = J_w A$

$\dot{m}_v = 5 \times 20$

$\dot{m}_v = 100$ kg/h

El incremento de humedad permitido es:

$$\Delta w = 0.030 - 0.010$$

$$\Delta w = 0.020 \text{ kg/kg}$$

Por tanto:

$$\dot{m}_a = 100/0.020$$

$$\dot{m}_a = 5000 \text{ kg/h}$$

Este resultado muestra una de las principales dificultades de SGMD: si se exige una baja humidificación del gas para mantener una elevada fuerza impulsora, el caudal de gas puede ser muy grande.

Por ello, el diseñador debe comparar:

mayor caudal de gas → mayor flujo de membrana

contra:

mayor caudal de gas → mayor potencia de circulación.

En el diseño de SGMD, este compromiso es uno de los aspectos centrales.

11.29 EJEMPLO DE CÁLCULO 3. EFECTO DE LA SALINIDAD

Supóngase que una alimentación salina presenta:

$$p_{w,f}^{0} = 25 \text{ kPa}$$

$$a_w = 0.95$$

y en el lado del gas:

$$p_{w,p} = 3 \text{ kPa}$$

Entonces:

$$p_{w,m,f} = 25 \times 0.95$$

$$p_{w,m,f} = 23.75 \text{ kPa}$$

Por tanto:

$$\Delta p_w = 23.75 - 3$$

$$\Delta p_w = 20.75 \text{ kPa}$$

Si la actividad disminuyera a:

$$a_w = 0.90$$

entonces:

$$p_{w,m,f} = 25 \times 0.90$$

$p_{w,m,f} = 22.5$ kPa

y:

$\Delta p_w = 22.5 - 3$

$\Delta p_w = 19.5$ kPa

La disminución de la fuerza impulsora sería:

$(20.75 - 19.5) / 20.75 \times 100$

$= 6.02$ %

Con este cálculo el estudiante ve de manera sencilla cómo la mayor salinidad le quita fuerza impulsora al proceso.

Debe aclararse que este ejemplo representa solamente el efecto termodinámico de la actividad. En un módulo real también deben considerarse polarización de concentración y temperatura.

11.30 EJEMPLO DE CÁLCULO 4. BALANCE TÉRMICO SIMPLIFICADO

Supóngase:

$J_w = 5$ kg/(m² h)

$$A = 20 \text{ m}^2$$

Entonces:

$\dot{m}_w = J_w A$

$\dot{m}_w = 100$ kg/h

Si se utiliza:

$\Delta H_v = 2400$ kJ/kg

el calor latente requerido es:

$Q_v = 100 \times 2400$

$Q_v = 240000$ kJ/h

En kW:

$Q_v = 240000/3600$

$Q_v = 66.7$ kW

Si además se estima una pérdida conductiva de:

$Q_c = 15$ kW

la eficiencia térmica es:

$\eta = 66.7/(66.7 + 15) \times 100$

$\eta = 81.6\ \%$

Este ejemplo es especialmente importante porque muestra que un flujo elevado no significa automáticamente una elevada eficiencia energética.

11.31 APLICACIÓN A TRATAMIENTO DE AGUAS

Las aplicaciones de SGMD pueden agruparse en tres grandes categorías.

A. Desalación

Para alimentación con sales no volátiles:

alimentación salina → evaporación → vapor de agua → membrana → gas → condensación → agua producto.

La sal permanece esencialmente en la corriente líquida.

Los estudios recopilados muestran rechazos de sal superiores al 99.9 % en determinadas condiciones experimentales.

B. Remoción de compuestos volátiles

Cuando la alimentación contiene:

NH_3

etanol

isopropanol

acetona

u otros VOC,

el objetivo puede ser recuperar o eliminar el compuesto volátil, en lugar de producir exclusivamente agua.

C. Tratamiento de aguas residuales industriales

La literatura señala aplicaciones potenciales para:

- aguas petroquímicas;

- aguas con compuestos orgánicos;
- recuperación de solventes;
- tratamiento de corrientes con amoníaco;
- recuperación de productos volátiles.

Khayet y Matsuura destacan especialmente el potencial del SGMD para corrientes donde existe riesgo de humectación por contacto con un líquido en el lado del permeado.

11.32 INTEGRACIÓN CON ENERGÍA TÉRMICA DE BAJA CALIDAD

MD tiene, entre sus ventajas generales, la posibilidad de aprovechar fuentes térmicas de baja temperatura.

El intervalo de operación típico de MD permite considerar:

- calor residual industrial;
- energía solar térmica;
- calor geotérmico;
- calor residual de motores;
- otras fuentes térmicas de baja calidad.

Sin embargo, en SGMD debe añadirse el consumo eléctrico asociado al gas de barrido.

Esto significa que la evaluación energética debe incluir al menos:

E_total = Q_térmico + W_bombeo + W_gas + W_condensación

La experiencia de plantas demostrativas de MD alimentadas con energía solar y calor residual muestra que la selección del sistema energético debe realizarse conjuntamente con el diseño de los módulos y del almacenamiento térmico.

11.33 LIMITACIONES DE SGMD

A pesar de sus ventajas, SGMD presenta varias limitaciones.

1. Requiere un sistema de circulación de gas.
2. Requiere normalmente un condensador externo.
3. El gas se calienta rápidamente a lo largo del módulo.

4. La fuerza impulsora disminuye a lo largo del módulo.
5. El consumo eléctrico del gas puede ser importante.
6. Existe un caudal de gas óptimo.
7. La humectación seguirá siendo un riesgo si la presión supera la de entrada de líquido.
8. El escalamiento de los módulos presenta dificultades.
9. En mezclas con compuestos volátiles, la separación puede ser compleja.
10. La literatura experimental disponible es mucho menor que para DCMD.

Para Khayet y Matsuura, las variaciones rápidas en la temperatura del gas son un inconveniente importante del SGMD tradicional; explican por qué su desarrollo aún se limita a pequeña escala.

11.34 SGMD TERMOSTÁTICA

Entre las variantes figura el TSGMD, que viene a ser el SGMD con gas termostático.

En este caso se incorpora una superficie fría en el lado del permeado para limitar el incremento de temperatura del gas. Parte del vapor puede condensar dentro del módulo y el resto puede ser enviado a un condensador externo.

El objetivo es disminuir la variación de temperatura del gas y conservar una fuerza impulsora más uniforme.

Esta configuración fue estudiada para mezclas como ácido fórmico/agua y puede considerarse como una alternativa para mejorar el comportamiento térmico del SGMD convencional.

11.35 CRITERIOS DE DISEÑO PARA UN PROYECTO DE MAESTRÍA

Si el proyecto es una investigación de maestría, sugiero al estudiante no quedarse solo en la comparación de flujos medidos en el laboratorio.

Debe desarrollar una secuencia como:

Datos de alimentación

↓

Selección de membrana

↓

Selección de temperatura

↓

Selección del gas

↓

Modelo de transferencia de materia

↓

Modelo de transferencia de calor

↓

Cálculo de flujo local

↓

Balance de humedad

↓

Balance térmico

↓

Dimensionamiento del área

↓

Dimensionamiento del condensador

↓

Estimación del consumo energético

↓

Optimización

↓

Validación experimental

Esta estructura permite que SGMD se estudie como un problema de ingeniería y no solamente como una prueba de laboratorio.

11.36 PROBLEMA INTEGRADOR PROPUESTO

Una planta piloto debe tratar 5 m³/día de agua salobre mediante SGMD.

Datos iniciales:

$Q_f = 5\ m^3/día$

$T_{f,in} = 65\ °C$

$T_{g,in} = 20\ °C$

J_w, estimado = 5 kg/(m² h)

Área inicial disponible = 50 m²

$a_w = 0.97$

Presión total = 101.3 kPa

$w_{in} = 0.01$ kg/kg

w_{out} máximo = 0.04 kg/kg

Se solicita:

a) calcular el área teórica requerida;

b) determinar si los 50 m² disponibles son suficientes;

c) calcular la producción horaria;

d) calcular el caudal mínimo de aire utilizando el balance de humedad;

e) estimar la carga térmica asociada a la evaporación;

f) calcular la eficiencia térmica suponiendo una pérdida conductiva determinada;

g) analizar qué ocurre si la temperatura de alimentación disminuye a 55 °C;

h) analizar qué ocurre si se duplica el caudal de gas;

i) identificar la condición que podría representar el punto óptimo de operación;

j) proponer las variables que deberían medirse en una planta piloto para validar el modelo.

Este problema debe resolverse posteriormente con propiedades termodinámicas reales y correlaciones de transferencia de calor y masa, de manera que constituya un ejercicio de diseño y no solamente una sustitución de números en una ecuación.

11.37 ASPECTOS QUE EL ESTUDIANTE DEBE SABER CALCULAR

Al finalizar el capítulo, el estudiante de maestría debería ser capaz de calcular:

1. presión de vapor del agua;
2. actividad del agua cuando corresponda;
3. presión parcial del vapor;
4. razón de humedad del aire;
5. flujo de vapor;
6. permeabilidad de la membrana;
7. resistencia de Knudsen;
8. resistencia de difusión molecular;
9. resistencia combinada;
10. transferencia de calor;
11. polarización térmica;
12. producción de permeado;
13. área de membrana;
14. caudal de gas;
15. carga del condensador;
16. eficiencia térmica;
17. consumo energético específico;
18. rechazo de sales;
19. factor de separación para compuestos volátiles.

11.38 CONCLUSIONES

La SGMD utiliza una corriente gaseosa para transportar el vapor producido en la superficie de una membrana hidrofóbica. Su principal característica respecto de DCMD es que la condensación puede realizarse externamente, mientras que el gas de barrido mantiene el lado permeado libre de una corriente líquida.

Para conocer el flujo hay que mirar el diferencial de presión parcial del vapor, qué tan permeable es la membrana y cuánto se oponen al paso la materia y el calor.

En membranas microporosas pueden intervenir los mecanismos de Knudsen, difusión molecular y, dependiendo de las condiciones, flujo viscoso. Para determinadas membranas de SGMD, el modelo combinado de Knudsen y difusión molecular resulta particularmente útil.

Lo propio del SGMD es que la temperatura y la humedad del gas varían mucho entre la entrada y la salida del módulo. Si se calcula usando solo los valores de entrada, la producción puede salir sobrestimada.

El incremento de la velocidad del gas generalmente aumenta el flujo porque reduce la polarización térmica del lado gaseoso, pero existe una condición óptima más allá de la cual el aumento del caudal puede generar poco beneficio y mayor consumo energético.

Para desalación, SGMD puede alcanzar elevados rechazos de sales y producir agua de alta pureza. Para aguas residuales que contienen compuestos volátiles, su interés puede ser aún mayor, porque permite recuperar o eliminar especies que no podrían tratarse simplemente mediante una separación de agua de sales.

La principal conclusión de diseño es, por tanto:

"El objetivo no es maximizar el flujo de membrana, sino maximizar la producción útil de agua o recuperación de soluto con el menor consumo total de energía y manteniendo la membrana seca."

11.39 PREGUNTAS DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre SGMD y DCMD?
2. ¿Por qué en SGMD se necesita normalmente un condensador externo?
3. ¿Cuál es la razón del aumento de temperatura del gas conforme avanza por el módulo?
4. ¿Cómo afecta este aumento de temperatura a la fuerza impulsora?
5. ¿Qué representa B_w?
6. ¿Cuándo es apropiado utilizar el modelo de Knudsen?
7. ¿Cuándo debe considerarse la difusión molecular?

8. ¿Qué significa considerar las resistencias de Knudsen y difusión molecular en serie?
9. ¿Qué hace que el gas de barrido pueda gobernar la transferencia de calor?
10. ¿Qué representa el coeficiente θ?
11. ¿Por qué aumentar la velocidad del gas aumenta inicialmente el flujo?
12. ¿Por qué existe un caudal de gas óptimo?
13. ¿Cómo afecta la salinidad al flujo?
14. ¿Qué diferencia existe entre tratar NaCl y tratar amoníaco mediante SGMD?
15. ¿Qué es el factor de separación α?
16. ¿Por qué una temperatura más alta incrementa el flujo y, sin embargo, resta selectividad frente a un compuesto volátil?
17. ¿Cómo se calcula el área de membrana?
18. ¿Cómo se obtiene el caudal de aire con el balance de humedad?
19. ¿Qué variables deben medirse en una planta piloto?
20. ¿Por qué no debe seleccionarse una membrana únicamente por su flujo máximo?

CAPÍTULO 12

SISTEMAS INTEGRADOS E HÍBRIDOS DE MEMBRANAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA Y AGUAS RESIDUALES

12.1 INTRODUCCIÓN

Hasta aquí, cada capítulo anterior trató por separado los procesos de membrana más usados al tratar agua:

- microfiltración (MF);
- ultrafiltración (UF);
- nanofiltración (NF);
- ósmosis inversa (RO);
- destilación por membrana (MD), incluyendo SGMD.

Sin embargo, una corriente real de agua o agua residual rara vez contiene un solo tipo de contaminante. Puede contener simultáneamente sólidos suspendidos, coloides, materia orgánica, microorganismos, sales, metales, compuestos orgánicos disueltos y contaminantes específicos.

Por esta razón, **una sola membrana no necesariamente puede alcanzar la calidad de agua requerida**.

Cada operación de una cadena integrada se dedica a la tarea para la que es más apropiada; eso es integrar dos o más separaciones.

Basile y Charcosset señalan que los procesos integrados pueden combinar diferentes membranas en cascada o asociar una operación de membrana con otra tecnología, como adsorción, electrodiálisis, destilación por membrana o procesos biológicos.

El principio fundamental puede expresarse de la siguiente manera:

No se busca una membrana capaz de remover todo contaminante. Lo que se diseña es una secuencia donde cada etapa acondiciona la corriente para la etapa siguiente.

12.2 CONCEPTO DE SISTEMA INTEGRADO

Un sistema integrado de membranas reúne dos o más operaciones secuenciales, que colaboran para cumplir un objetivo de separación.

Por ejemplo:

Agua cruda → MF → UF → RO → agua producto

En esta secuencia:

MF elimina partículas y sólidos suspendidos.

UF elimina coloides y macromoléculas.

RO elimina sales y especies disueltas de menor tamaño.

Cada etapa protege a la siguiente.

Basile y Charcosset destacan precisamente que, en una cascada de membranas, la etapa n reduce el potencial de ensuciamiento de la etapa n+1, aumentando su flujo y reduciendo su pérdida de rendimiento.

12.3 SISTEMAS EN SERIE Y EN PARALELO

Existen dos configuraciones básicas.

12.3.1 PROCESOS EN SERIE

En serie:

Alimentación → Membrana 1 → Membrana 2 → Membrana 3

Cada etapa entrega su permeado o producto, y esa corriente alimenta a la siguiente.

Ejemplo:

UF → NF → RO

La ventaja es que cada membrana recibe una alimentación progresivamente más limpia.

12.3.2 PROCESOS EN PARALELO

En paralelo:

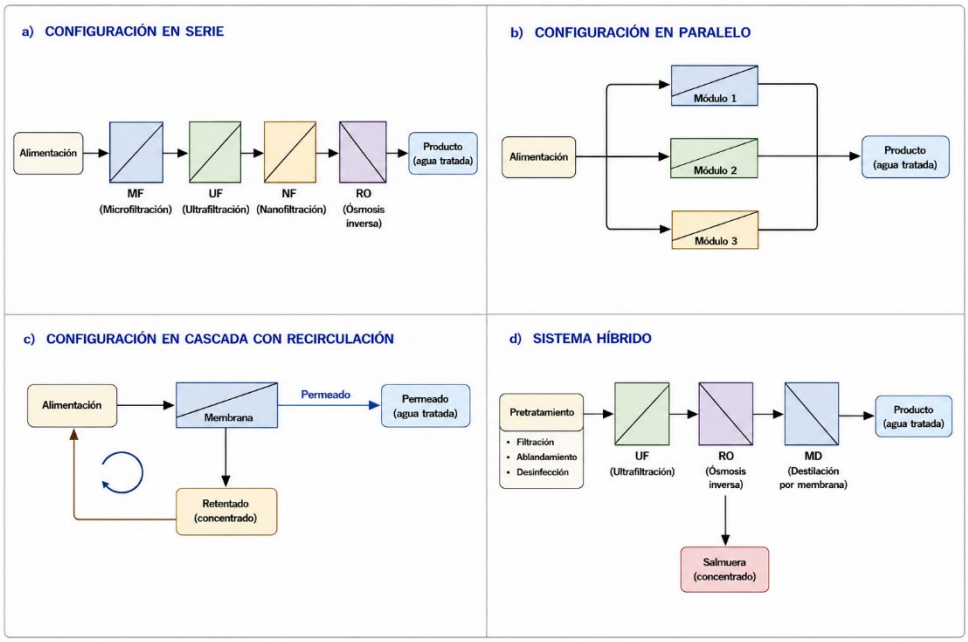
Alimentación → Módulo 1 → Módulo 2 → Módulo 3

El objetivo principal es aumentar la capacidad de producción.

La configuración en paralelo es especialmente importante para escalar la capacidad de una instalación sin modificar excesivamente las condiciones hidráulicas de cada módulo.

Figura 12.1

Configuraciones básicas de integración de membranas



Nota: elaboración propia a partir de Basile y Charcosset (2016).

La integración de MF, UF, NF y RO en cascada está descrita explícitamente en Basile y Charcosset.

12.4 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS INTEGRADOS

Los sistemas pueden clasificarse en cuatro grandes grupos.

A. Integración de membranas de presión

MF + UF

UF + NF

NF + RO

MF + UF + RO

UF + NF + RO

B. Integración de membranas con procesos térmicos

RO + MD

UF + MD

RO + MD + cristalización

C. Integración de membranas con procesos fisicoquímicos

Coagulación + MF/UF

Adsorción + MF/UF

Oxidación + UF/NF

Precipitación + MF/UF

D. Integración de membranas con procesos biológicos

Biorreactor + MF/UF

MBR + RO

MBR + NF

MBR + RO + MD.

La bibliografía de Basile y Charcosset presenta ejemplos de estas combinaciones para desalación, aguas naturales, aguas residuales industriales, alimentos y biotecnología.

12.5 ¿POR QUÉ INTEGRAR MEMBRANAS?

Los principales objetivos son:

1. aumentar la calidad del agua producto;
2. reducir el ensuciamiento;
3. aumentar la vida útil de las membranas;
4. disminuir el consumo de productos químicos;
5. aumentar la recuperación de agua;
6. recuperar sustancias valiosas;
7. reducir el volumen de residuos;
8. reducir el espacio ocupado;
9. permitir la reutilización del agua;

10. acercarse a sistemas de descarga mínima o cero.

En el tratamiento industrial, Basile y Charcosset señalan que los sistemas integrados pueden contribuir a reducir impacto ambiental, simplificar el tratamiento, reducir costos de disposición y ahorrar agua, productos químicos y energía.

12.6 MF/UF COMO PRETRATAMIENTO DE RO

Una de las aplicaciones más importantes es:

MF/UF → RO

La función de MF/UF no es principalmente eliminar las sales responsables de la salinidad. Su función es proteger la RO.

MF y UF pueden eliminar:

- sólidos suspendidos;
- coloides;
- bacterias;
- microalgas;
- microorganismos;
- parte de los virus y patógenos.

Esto reduce el potencial de ensuciamiento de RO.

Basile y Charcosset afirman que cuando se aplica MF/UF antes de la RO, esta recibe agua de mejor calidad, y su operación se vuelve menos sensible a los cambios en la alimentación.

12.7 ÍNDICE DE DENSIDAD DE SEDIMENTOS

Para evaluar el agua que ingresa a RO es particularmente importante el **SDI (Silt Density Index)**.

Conceptualmente:

$$SDI = 100(1 - t_i/t_f)/T$$

donde:

t_i = tiempo inicial de filtración;

t_f = tiempo final de filtración;

T = duración del ensayo.

Un SDI elevado indica mayor potencial de ensuciamiento.

La integración MF/UF → RO tiene como uno de sus objetivos producir un agua de alimentación a RO con un SDI suficientemente bajo para permitir operación estable.

En una experiencia de UF como pretratamiento de RO en Jeddah, se reportó un SDI promedio del filtrado de 2.2, aproximadamente dos unidades inferior al obtenido con el pretratamiento convencional estudiado.

12.8 NF COMO PRETRATAMIENTO O ETAPA INTERMEDIA

NF ocupa una posición intermedia entre UF y RO.

Puede retener:

- materia orgánica;
- moléculas de aproximadamente 200–2000 g/mol;
- iones multivalentes;
- determinadas especies orgánicas.

Sin embargo, suele presentar menor rechazo de iones monovalentes que RO.

Por ello, puede utilizarse como:

UF → NF → RO

o:

NF → RO.

La elección se basa en lo que contiene el agua y en la calidad exigida.

12.9 NF–RO PARA DESALACIÓN

Un esquema interesante es:

Agua de mar → NF → RO → permeado

La NF puede modificar la composición de la alimentación que recibe RO.

Una de las ventajas potenciales es disminuir la carga de ciertos componentes responsables de ensuciamiento o scaling.

Basile y Charcosset presentan plantas de NF–RO y señalan que el costo comparativo respecto del pretratamiento convencional depende fuertemente de las

condiciones específicas del sitio. Las fluctuaciones de turbidez, TDS y proliferaciones de algas pueden hacer más atractivo el pretratamiento mediante membranas.

12.10 INTEGRACIÓN DE COAGULACIÓN Y MEMBRANAS

Una combinación importante es:

Coagulación → MF/UF

o:

Coagulación → UF → RO.

La coagulación transforma especies pequeñas o coloidales en agregados mayores que pueden ser retenidos con mayor facilidad.

El principio es:

contaminante pequeño

↓

coagulación/floculación

↓

flóculo

↓

MF/UF

↓

retención.

Esta estrategia permite desplazar parte de la carga de separación hacia una membrana menos exigente y reservar RO para la eliminación de especies disueltas.

Basile y Charcosset describen sistemas híbridos que combinan coagulación, adsorción y MF/UF como pretratamiento de RO.

12.11 INTEGRACIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

Otro sistema es:

PAC + UF

donde PAC es carbón activado en polvo.

Los compuestos orgánicos quedan adsorbidos en el carbón, mientras que la membrana detiene las partículas de este.

El proceso puede expresarse:

Agua contaminada → PAC → UF → agua tratada

La función del PAC es:

contaminante disuelto + PAC → contaminante adsorbido

y la UF evita que el PAC cargado de contaminantes abandone el sistema.

Este concepto es particularmente interesante para contaminantes orgánicos que no serían suficientemente retenidos por MF o UF por sí solas.

12.12 INTEGRACIÓN CON OXIDACIÓN AVANZADA

Una alternativa es:

$O_3/UV/H_2O_2$ → UF/NF

La oxidación avanzada transforma contaminantes orgánicos complejos en especies más susceptibles de ser separadas posteriormente.

La lógica es:

contaminante refractario

↓

oxidación

↓

productos transformados

↓

membrana

↓

agua tratada.

No debe suponerse que una membrana necesariamente destruye el contaminante. En muchos casos simplemente lo concentra en el retentado.

Por eso, la integración con oxidación puede cambiar el destino del contaminante y reducir el problema de disposición del concentrado.

12.13 INTEGRACIÓN DE MBR

En un MBR:

Reactor biológico → MF/UF

La membrana sustituye la sedimentación secundaria convencional.

Pinnekamp señala dos consecuencias importantes:

- el efluente queda prácticamente libre de sólidos;
- la concentración de biomasa deja de depender de las características de sedimentación del lodo.

Esto permite mantener concentraciones de sólidos superiores a las habituales en sistemas convencionales.

Una configuración avanzada puede ser:

Pretratamiento → MBR → RO → agua reutilizada.

Esta combinación es particularmente importante para **reúso de agua residual**.

12.14 MBR–RO PARA REÚSO

El esquema:

Aguas residuales → MBR → RO → agua reutilizada

permite separar progresivamente:

Materia biodegradable → reactor biológico

Sólidos y biomasa → MF/UF

Sales y contaminantes disueltos → RO.

El MBR protege la RO frente a sólidos y materia particulada.

La RO proporciona una barrera adicional frente a sales y numerosos contaminantes disueltos.

Este concepto es especialmente interesante cuando el objetivo no es solamente cumplir un límite de vertimiento, sino producir agua para:

- procesos industriales;
- torres de enfriamiento;
- limpieza;

- alimentación de calderas después del tratamiento apropiado;
- otros usos de reúso.

Según Pinnekamp, cuando hay reúso de agua residual se puede justificar, también por razones económicas, la tecnología de membranas.

12.15 INTEGRACIÓN RO–MD

Una de las combinaciones más interesantes con el capítulo anterior es:

Agua salina → RO → salmuera → MD → concentrado.

La RO produce agua dulce pero deja un concentrado salino.

La MD puede utilizarse para concentrar adicionalmente la salmuera y aumentar la recuperación global.

Basile y Charcosset identifican específicamente la destilación por membrana como una alternativa para concentrar las salmueras de RO y aumentar la recuperación global del proceso.

Este concepto permite conectar directamente los Capítulos 11 y 12.

12.16 BALANCE GLOBAL DE MASA

En cualquier sistema integrado debe cumplirse:

$Q_F = Q_P + Q_R$

donde:

Q_F = caudal de alimentación

Q_P = caudal de producto

Q_R = caudal de rechazo o concentrado.

La recuperación es:

$$Y = Q_P/Q_F$$

y:

$Q_R = Q_F(1 - Y)$

Para varias etapas:

$Q_{F,1} = Q_{P,1} + Q_{R,1}$

$Q_{P,1} = Q_{F,2}$

y así sucesivamente.

El estudiante debe evitar calcular cada membrana independientemente sin conectar los balances.

12.17 RECUPERACIÓN GLOBAL DE UN SISTEMA EN SERIE

Si una primera etapa tiene:

$Y_1 = Q_{P,1}/Q_F$

y la segunda:

$Y_2 = Q_{P,2}/Q_{P,1}$

entonces:

$Y_{global} = Y_1 Y_2$

Por ejemplo:

$Y_1 = 0.80$

$Y_2 = 0.75$

entonces:

$Y_{global} = 0.80 \times 0.75$

$Y_{global} = 0.60$

Por tanto, la recuperación global es:

60 %

Este resultado es fundamental.

Las recuperaciones de las etapas no se suman; se multiplican cuando una etapa alimenta a la siguiente.

12.18 BALANCE DE CONTAMINANTES

Para un soluto i:

$Q_F C_F = Q_P C_P + Q_R C_R$

Por tanto:

$C_R = (Q_F C_F - Q_P C_P)/Q_R$

Esta ecuación debe aplicarse a cada etapa.

Para una instalación integrada:

Etapa 1:

$Q_F C_F = Q_{P1} C_{P1} + Q_{R1} C_{R1}$

Etapa 2:

$Q_{P1} C_{P1} = Q_{P2} C_{P2} + Q_{R2} C_{R2}$.

Esto permite determinar dónde termina cada contaminante.

12.19 RECHAZO GLOBAL

Si:

$$R = 1 - C_P/C_F$$

entonces:

$C_P = C_F(1-R)$.

Para dos etapas:

$C_{P2} = C_F(1-R_1)(1-R_2)$

por lo que:

$R_{global} = 1 - (1-R_1)(1-R_2)$.

Ejemplo:

$R_1 = 90\ \%$

$R_2 = 95\ \%$

entonces:

$R_{global} = 1 - (0.10)\ (0.05)$

$R_{global} = 0.995$

$R_{global} = 99.5\ \%$

Esto ilustra por qué una secuencia de separación puede alcanzar una calidad que una sola membrana no podría proporcionar.

12.20 ENSUCIAMIENTO EN SISTEMAS INTEGRADOS

El ensuciamiento es una de las razones principales para integrar procesos.

El flujo puede expresarse mediante:

$$J = \Delta P/(\mu R_{total})$$

donde:

$R_{total} = R_m + R_f + R_c + ...$

R_m = resistencia de la membrana

R_f = resistencia de ensuciamiento

R_c = resistencia de la capa depositada.

La integración busca que, cuando la corriente alcance la membrana crítica, R_f ya se haya reducido.

Por ejemplo:

Agua cruda → UF → RO

La UF elimina parte de las especies que podrían formar la resistencia de ensuciamiento de RO.

12.21 ENSUCIAMIENTO Y OPERACIÓN A ESCALA REAL

En una instalación industrial no basta con conocer el flujo inicial.

Debe evaluarse:

J_0 = flujo inicial

J_t = flujo después de operación

La disminución relativa es:

$$FD = 1 - J_t/J_0$$

Si:

$J_0 = 30\ L/(m^2\ h)$

y:

$J_t = 24\ L/(m^2\ h)$

entonces:

$$FD = 1 - 24/30$$

$$FD = 0.20$$

La disminución del flujo es:

20 %

La necesidad de limpieza debe determinarse mediante criterios operativos y no únicamente por un tiempo fijo.

Pinnekamp documenta que la permeabilidad de las membranas puede disminuir por ensuciamiento y que, en instalaciones MBR, la limpieza química puede ser necesaria cuando la permeabilidad alcanza determinados niveles.

12.22 SELECCIÓN DE LA MEMBRANA

La selección debe comenzar por la pregunta:

¿Qué contaminante necesito separar?

No por:

¿Qué membrana tengo disponible?

Una matriz simplificada es:

Contaminante	Primera opción
Sólidos suspendidos	MF
Bacterias	MF/UF
Coloides	UF
Macromoléculas	UF
Materia orgánica de tamaño intermedio	NF
Iones multivalentes	NF
Sales disueltas	RO
Agua de alta pureza	RO/MD
Biomasa	MF/UF
Compuestos orgánicos específicos	NF/RO + adsorción/oxidación

Los rangos orientan, pero no marcan límites exactos. La separación que se obtiene en la práctica varía con la membrana y con la alimentación.

KLM enfatiza que la clasificación de membranas debe relacionarse con mecanismo, estructura, aplicación y fuerza impulsora, y presenta MF, UF, RO, separación de gases y pervaporación dentro de la clasificación de procesos de membrana.

12.23 SELECCIÓN DEL MÓDULO

La selección del módulo debe considerar:

- área específica;
- caudal;
- viscosidad;
- concentración de sólidos;
- presión;

- facilidad de limpieza;
- facilidad de sustitución;
- tendencia al ensuciamiento.

Los módulos principales son:

- fibra hueca;
- espiral;
- tubular;
- placa y marco;
- módulos sumergidos.

KLM identifica específicamente módulos espirales, de fibra hueca, placa-marco y tubulares como configuraciones industriales relevantes.

12.24 DISEÑO DE ÁREA DE MEMBRANA

Para una etapa:

$$A = Q_P/J$$

Si:

$Q_P = 100\ m^3/h$

y:

$$J = 25\ L/(m^2\ h)$$

primero:

$100\ m^3/h = 100{,}000\ L/h$

por tanto:

$$A = 100{,}000/25$$

$$A = 4{,}000\ m^2.$$

Este cálculo parece sencillo, pero el estudiante debe recordar que el flujo de diseño no debe ser necesariamente igual al flujo máximo obtenido en laboratorio.

La experiencia industrial debe considerar:

- temperatura;
- calidad de alimentación;
- ensuciamiento;

- limpieza;
- disponibilidad;
- margen de diseño.

En MBR, por ejemplo, Pinnekamp reporta valores orientativos de flujo neto de diseño del orden de 25 L/(m² h) a 8 °C para determinadas condiciones y membranas comerciales, con aumento a mayor temperatura.

12.25 DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE UNA CASCADA UF–RO

Supóngase:

$Q_F = 1{,}000\ m^3/día$

UF:

$Y_{UF} = 0.90$

RO:

$Y_{RO} = 0.75.$

Después de UF:

$Q_{P,UF} = 1{,}000 \times 0.90$

$Q_{P,UF} = 900\ m^3/día.$

Alimentación a RO:

$Q_{F,RO} = 900\ m^3/día.$

Producción de RO:

$Q_{P,RO} = 900 \times 0.75$

$Q_{P,RO} = 675\ m^3/día.$

Recuperación global:

$Y_{global} = 675/1000$

$Y_{global} = 0.675$

Por tanto:

Recuperación global = 67.5 %.

El rechazo global se determina con un balance del contaminante; multiplicar los porcentajes de rechazo solo sirve cuando las concentraciones no varían demasiado de una etapa a otra.

12.26 CONCENTRACIÓN DEL RETENTADO

En una aproximación ideal de soluto completamente rechazado:

$C_R = C_F/(1-Y)$

Si:

$C_F = 500$ mg/L

y:

$$Y = 0.75$$

entonces:

$C_R = 500/(1-0.75)$

$C_R = 2000$ mg/L.

Esto muestra una consecuencia fundamental:

aumentar la recuperación aumenta la concentración del contaminante en el concentrado.

Por tanto:

mayor recuperación de agua

no significa necesariamente

menor problema ambiental.

El concentrado debe ser tratado, reutilizado, valorizado o dispuesto adecuadamente.

12.27 SISTEMAS INTEGRADOS PARA REÚSO INDUSTRIAL

En aguas industriales el objetivo puede ser:

Aguas residuales → tratamiento → agua reutilizada

y no necesariamente:

Aguas residuales → tratamiento → vertimiento.

Pinnekamp muestra numerosas aplicaciones industriales de UF, NF, RO y combinaciones entre ellas para:

- recuperación de agua;
- cierre de ciclos;
- tratamiento de lixiviados;
- recuperación de sustancias;
- tratamiento de baños;
- concentración de emulsiones;
- tratamiento de aguas de procesos.

Por tanto, la integración debe diseñarse considerando también el proceso industrial de origen.

12.28 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRADO

Pinnekamp propone una lógica particularmente útil para la ingeniería:

Paso 1. Recopilación de datos

Determinar:

Q

pH

temperatura

conductividad

TDS

DQO

DBO

sólidos suspendidos

turbidez

aceites

metales

materia orgánica

microorganismos

y variabilidad temporal.

La bibliografía recomienda recopilar información durante el período más largo posible y documentar tanto caudal como características físico-químicas del agua.

Paso 2. Definición del objetivo

Por ejemplo:

- vertimiento;
- reúso;
- agua de proceso;
- recuperación de un producto;
- reducción de costos.

Paso 3. Selección preliminar del proceso

Identificar las especies que deben ser eliminadas.

Paso 4. Pruebas de laboratorio

Determinar:

- membrana;
- presión;
- temperatura;
- flujo;
- recuperación;
- ensuciamiento;
- limpieza.

Paso 5. Prueba piloto

La instalación piloto debe reproducir las condiciones hidráulicas relevantes del sistema industrial.

Pinnekamp enfatiza que la prueba piloto debe permitir transferir las condiciones hidráulicas y de conexión de módulos hacia la instalación a gran escala.

Paso 6. Diseño

Dimensionar:

- membranas;
- módulos;
- bombas;
- tuberías;
- tanques;
- sistema de limpieza;
- instrumentación.

Paso 7. Evaluación económica

Comparar:

CAPEX

OPEX

costos de membrana

energía

productos químicos

limpieza

disposición del concentrado

ahorro de agua.

Paso 8. Operación y control

Definir:

- presión;
- flujo;
- permeabilidad;
- calidad del permeado;
- frecuencia de limpieza;
- alarmas;
- redundancia.

12.29 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Un sistema integrado no debe seleccionarse exclusivamente por el menor costo de inversión.

Debe evaluarse:

Costo total = CAPEX + OPEX

y:

OPEX = energía + químicos + membranas + limpieza + disposición + mantenimiento + personal.

Pinnekamp incluye entre los criterios económicos:

- inversión;
- reemplazo de membranas;
- bombas;
- tanques;
- energía;
- productos químicos;
- disposición de residuos;
- recuperación de materiales valiosos.

Por tanto, una instalación más costosa inicialmente puede ser económicamente superior si reduce considerablemente el costo operativo.

12.30 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

Para una instalación:

$$SEC = E/V_P$$

donde:

E = energía consumida

V_P = volumen de agua producto.

Por ejemplo:

E = 10,000 kWh/día

V_P = 5,000 m³/día

entonces:

$$SEC = 10{,}000/5{,}000$$

$$SEC = 2\ kWh/m^3.$$

En sistemas integrados debe calcularse:

$$SEC_{total} = \Sigma SEC_i$$

cuidando las unidades y la energía que comparten las etapas.

12.31 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO

El objetivo puede formularse como:

Minimizar:

C_{total}

sujeto a:

$Q_P \geq Q_{requerido}$

$C_P \leq C_{objetivo}$

$Y_{global} \geq Y_{mínimo}$

y:

operación segura.

Por tanto, el diseño es un problema de optimización con restricciones.

Las variables pueden ser:

- presión de operación;
- flujo de alimentación;
- recuperación;
- área de membrana;
- número de etapas;
- secuencia de membranas;
- frecuencia de limpieza;
- grado de pretratamiento.

12.32 EJEMPLO INTEGRADOR: TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA REÚSO

Se dispone de:

$Q_F = 500\ m^3/día$

DQO = 500 mg/L

TSS = 100 mg/L

TDS = 2,000 mg/L.

Se desea obtener agua para reúso industrial.

Se propone:

MF → UF → RO

Función de cada etapa:

MF:

elimina sólidos suspendidos y parte de los coloides.

UF:

elimina macromoléculas y mejora la alimentación de RO.

RO:

elimina la mayor parte de las sales y contaminantes disueltos.

La lógica del diseño es:

TSS alto

↓

MF

↓

menor TSS

↓

UF

↓

menor materia coloidal/orgánica

↓

RO

↓

agua de reúso.

Este enfoque es coherente con la filosofía de los sistemas integrados descrita por Basile y Charcosset y con la planificación industrial descrita por Pinnekamp.

12.33 PROBLEMA DE DISEÑO PROPUESTO

Una industria genera:

$Q_F = 2{,}000\ m^3/día.$

La alimentación contiene:

$$TSS = 150\ mg/L$$
$$DQO = 800\ mg/L$$
$$TDS = 3{,}000\ mg/L.$$

Se requiere producir:

$Q_P \geq 1{,}200\ m^3/día$

con:

$TDS_P \leq 100\ mg/L.$

Se propone evaluar:

Alternativa A:

UF → RO

Alternativa B:

MF → UF → RO

Alternativa C:

UF → RO → MD para tratamiento del concentrado.

El estudiante debe determinar:

a) recuperación requerida;

b) área de cada etapa;

c) caudal de concentrado;

d) concentración aproximada de TDS en el concentrado;

e) necesidad de pretratamiento;

f) ventaja de introducir MF antes de UF;

g) necesidad de tratamiento del concentrado;

h) consumo energético estimado;

i) costo específico;

j) alternativa técnicamente más conveniente.

12.34 CASO DE RECUPERACIÓN DE SUSTANCIAS VALIOSAS

La integración no debe limitarse a "eliminar contaminantes".

También puede buscar:

separar + concentrar + recuperar.

Un ejemplo presentado por Basile y Charcosset es la recuperación de sales de cromo de efluentes de curtido:

Efluente → UF → NF

La UF elimina sólidos y grasas.

La NF concentra las sales de cromo.

La UF reduce el ensuciamiento de la NF y mejora su comportamiento.

Este ejemplo introduce un concepto fundamental de economía circular:

el residuo de una operación puede convertirse en materia prima de otra.

12.35 INTEGRACIÓN Y ECONOMÍA CIRCULAR

Un sistema moderno de tratamiento debe analizar cuatro corrientes:

1. agua;
2. energía;
3. contaminantes;
4. materiales recuperables.

El objetivo puede ser:

Agua residual

↓

separación

↙ ↓ ↘

Agua energía materiales

Esto es especialmente importante en la industria química.

Por ejemplo:

- metales;
- sales;
- ácidos;
- solventes;
- nutrientes;
- proteínas;
- compuestos orgánicos.

Pinnekamp señala como objetivos industriales de la tecnología de membranas el ahorro de agua, reducción de químicos, ahorro de energía, recuperación de sustancias valiosas y reducción de costos de disposición.

12.36 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

Un sistema integrado requiere más instrumentación que una membrana individual.

Deben medirse, como mínimo:

Alimentación

Q_F

P

T

pH

conductividad

turbidez.

Cada etapa

Q_P

Q_R

ΔP

J

permeabilidad

conductividad.

Calidad

TDS

DQO

TSS

contaminante objetivo.

Operación

frecuencia de limpieza

consumo químico

energía.

La automatización debe permitir responder a variaciones de cantidad y composición de la alimentación. Pinnekamp incluye explícitamente como criterio de diseño la capacidad del sistema para responder a variaciones previstas de caudal y composición.

12.37 MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA

Un sistema integrado debe diseñarse desde el inicio considerando la limpieza.

No debe diseñarse primero la membrana y preguntarse posteriormente:

¿Cómo la limpio?

Debe analizarse:

- tipo de ensuciamiento;
- agente de limpieza;
- concentración;
- temperatura;
- duración;
- frecuencia;
- compatibilidad química;
- disposición del agua de limpieza.

Pinnekamp documenta que cambios en químicos, temperaturas, secuencia de limpieza, hidráulica, composición del agua y membranas pueden afectar la operación de una instalación.

12.38 REDUNDANCIA

En una planta industrial, que el sistema funcione bien en condiciones normales no es suficiente.

Debe preguntarse:

¿Qué ocurre si una línea queda fuera de servicio?

Puede utilizarse:

N módulos en paralelo

de los cuales:

N-1

sean suficientes para mantener parcialmente la producción.

Esto permite:

- mantenimiento;
- limpieza;
- sustitución de módulos;
- continuidad operacional.

La necesidad de redundancia debe compararse con el costo de una parada. Pinnekamp incorpora explícitamente esta evaluación en sus listas de planificación.

12.39 CRITERIOS PARA SELECCIONAR UN SISTEMA INTEGRADO

Recomiendo que el estudiante utilice la siguiente matriz:

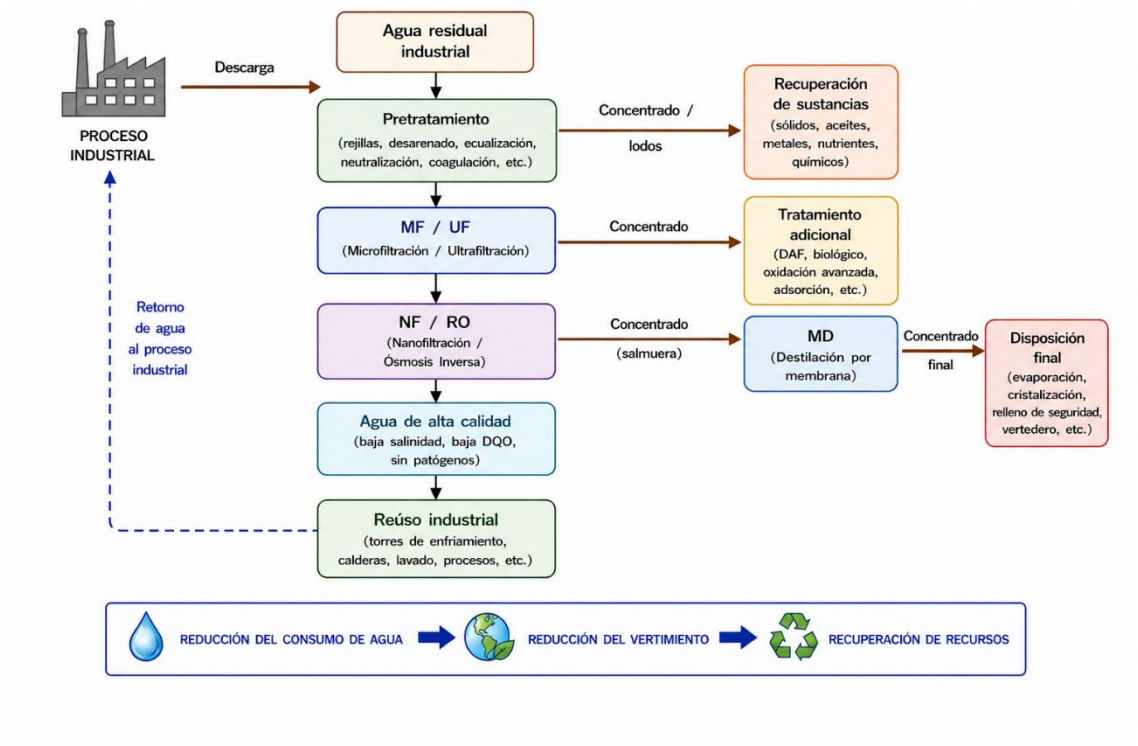
Criterio	Pregunta
Calidad	¿Cumple el producto?
Recuperación	¿Cuánta agua se recupera?
Energía	¿Cuánto consume?
Ensuciamiento	¿Qué tan rápido pierde flujo?
Limpieza	¿Cómo se limpia?
Concentrado	¿Qué se hace con él?
CAPEX	¿Cuánto cuesta instalarlo?
OPEX	¿Cuánto cuesta operarlo?

Criterio	Pregunta
Seguridad	¿Qué riesgos existen?
Flexibilidad	¿Tolera variaciones de alimentación?
Escalamiento	¿Puede pasar a planta industrial?
Sostenibilidad	¿Reduce agua, energía y residuos?

12.40 FIGURA INTEGRADORA FINAL

Figura 12.2

Esquema de conjunto de un sistema integrado para tratar y reusar agua



Nota. Elaboración propia basada en los principios de tratamiento y reúso de agua mediante tecnologías de membranas descritos por Baker (2012), Crittenden et al. (2012), Gabelich et al. (2013) y Lesjean et al. (2015).

La figura muestra que el objetivo final no es simplemente "filtrar agua", sino integrar tratamiento, recuperación y reúso.

12.41 ERRORES FRECUENTES QUE DEBE EVITAR EL ESTUDIANTE

Error 1

Seleccionar RO directamente para una alimentación con sólidos elevados.

Corrección: estudiar primero MF/UF u otro pretratamiento.

Error 2

Maximizar la recuperación sin analizar el concentrado.

Corrección: realizar siempre balance de masa y concentración.

Error 3

Usar el flujo máximo de laboratorio como flujo de diseño.

Corrección: utilizar un flujo de diseño basado en condiciones reales y ensuciamiento.

Error 4

Comparar únicamente CAPEX.

Corrección: comparar CAPEX + OPEX + costo de disposición.

Error 5

Ignorar la limpieza.

Corrección: incorporarla desde el diseño conceptual.

Error 6

Considerar cada membrana como una unidad independiente.

Corrección: resolver el sistema completo mediante balances acoplados.

Error 7

No realizar pruebas piloto.

Corrección: validar las condiciones hidráulicas y de operación antes del escalamiento.

12.42 CONCLUSIONES

Los sistemas integrados son una consecuencia natural de cómo ha evolucionado la tecnología de membranas.

Una sola membrana puede presentar limitaciones importantes frente a aguas complejas. La integración permite distribuir las funciones de separación entre diferentes procesos.

Las configuraciones más importantes para tratamiento de agua son:

MF/UF → RO

NF → RO

MF/UF → NF → RO

MBR → RO

RO → MD

y combinaciones de membranas con:

- coagulación;
- adsorción;
- oxidación;
- procesos biológicos.

La principal ventaja de la integración es que **una etapa puede proteger a la siguiente**. Esto puede aumentar la estabilidad, disminuir el ensuciamiento y mejorar la calidad del producto.

Para el ingeniero químico, el problema central deja de ser:

"¿Qué membrana debo utilizar?"

y pasa a ser:

"¿Cuál es la secuencia de operaciones que permite obtener la calidad requerida al menor costo total y con un manejo adecuado de los concentrados?"

Este cambio de perspectiva es fundamental para pasar de la **selección de una membrana** al **diseño de un proceso industrial de tratamiento de agua**.

12.43 PREGUNTAS DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Qué se entiende por sistema integrado de membranas?
2. ¿En qué se diferencia un sistema en serie de uno en paralelo?
3. ¿Por qué MF/UF puede utilizarse antes de RO?
4. ¿Qué contaminantes elimina principalmente UF?
5. ¿Por qué NF puede considerarse una etapa intermedia entre UF y RO?
6. ¿Qué función cumple la coagulación antes de UF?
7. ¿Cómo funciona la integración PAC–UF?
8. ¿Qué ventaja presenta MBR–RO?
9. ¿Por qué RO–MD puede aumentar la recuperación global de una desaladora?
10. ¿Cómo se calcula la recuperación global de dos etapas en serie?

11. ¿Cómo se calcula el balance de un contaminante en una cascada?
12. ¿Por qué aumentar la recuperación incrementa la concentración del concentrado?
13. ¿Por qué una membrana no debe diseñarse utilizando solamente el flujo máximo de laboratorio?
14. ¿Qué información debe recopilarse antes de diseñar una planta de membranas?
15. ¿Cuál es el objetivo de una prueba piloto?
16. ¿Qué variables deben controlarse continuamente?
17. ¿Qué costos deben incluirse en el análisis económico?
18. ¿Por qué debe analizarse la redundancia?
19. ¿Qué papel desempeña la limpieza?
20. ¿Por qué un sistema integrado puede ser más sostenible que una única operación de membrana?

CAPÍTULO 13

DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN TECNOECONÓMICA DE SISTEMAS DE MEMBRANAS PARA RECICLAJE Y REÚSO DE AGUA

13.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se estudiaron los **sistemas integrados de membranas**, comprendiendo que MF, UF, NF, RO, MBR y MD pueden combinarse para conseguir una calidad de agua que difícilmente se alcanzaría mediante una sola operación.

El siguiente paso para el ingeniero químico es transformar esa concepción en una **planta de tratamiento real**.

Esto implica responder preguntas como:

- ¿Qué calidad tiene el agua de alimentación?
- ¿Qué calidad debe tener el agua reutilizada?
- ¿Qué proceso debe seleccionarse?
- ¿Cuántas etapas se necesitan?
- ¿Qué membrana se debe utilizar?
- ¿Cuál debe ser el flujo de diseño?
- ¿Cuánta área de membrana se requiere?
- ¿Cuál será la recuperación?
- ¿Qué cantidad de concentrado se producirá?
- ¿Cuánta energía se consumirá?
- ¿Cuánto costará la planta?
- ¿Cómo se controlará el ensuciamiento?
- ¿Qué ocurre si cambia la calidad del agua de alimentación?

Wachinski plantea precisamente que el diseño de instalaciones de reúso debe integrar conceptos de flujo, temperatura, calidad del agua, recuperación, integridad, pretratamiento, limpieza y confiabilidad.

Por tanto, en este capítulo el estudiante pasará de:

"conocer las membranas" a:

"diseñar una instalación de membranas".

13.2 OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

Al finalizar el capítulo, el estudiante deberá ser capaz de:

1. definir los requerimientos de calidad del agua reutilizada;
2. caracterizar el agua de alimentación;
3. seleccionar una secuencia de tratamiento;
4. seleccionar MF, UF, NF o RO según el objetivo;
5. establecer el flujo de diseño;
6. calcular el área de membrana;
7. calcular recuperación y caudales;
8. realizar balances de masa;
9. dimensionar preliminarmente módulos;
10. estimar el consumo energético;
11. analizar el ensuciamiento;
12. establecer criterios de limpieza;
13. evaluar la confiabilidad del sistema;
14. estimar CAPEX y OPEX;
15. calcular el costo específico del agua;
16. comparar alternativas de tratamiento;
17. evaluar la sostenibilidad del sistema;
18. proponer una configuración técnicamente y económicamente viable.

13.3 FILOSOFÍA DE DISEÑO

Una regla fundamental debe guiar todo el capítulo:

Se selecciona la tecnología considerando la calidad exigida al agua producida y cómo es el agua que ingresa.

No debe comenzarse diciendo:

"Voy a utilizar RO".

Debe comenzarse preguntando:

¿Qué contaminantes necesito eliminar y hasta qué concentración?

La filosofía puede representarse como:

Agua de alimentación

↓

Caracterización

↓

Objetivo de reúso

↓

Contaminantes críticos

↓

Selección de procesos

↓

Secuencia de tratamiento

↓

Pruebas de laboratorio

↓

Prueba piloto

↓

Diseño

↓

Evaluación económica

↓

Planta industrial

Wachinski señala que medir qué contiene el agua es precisamente lo que determina la tecnología necesaria para removerlo.

13.4 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

Antes de seleccionar la membrana deben conocerse, como mínimo:

Parámetros físicos

- temperatura;
- turbidez;
- color;
- sólidos suspendidos;
- sólidos totales;
- conductividad.

Parámetros químicos

- pH;
- alcalinidad;
- dureza;
- TDS;
- sílice;
- sulfatos;
- cloruros;
- nitratos;
- fosfatos;
- metales.

Parámetros orgánicos

- DBO;
- DQO;
- TOC;
- aceites;
- grasas;

- compuestos orgánicos específicos.

Parámetros microbiológicos

- bacterias;
- virus;
- protozoos;
- indicadores microbiológicos.

En aguas residuales también debe analizarse la **variabilidad temporal**.

No es suficiente conocer:

$$Q = 1{,}000\ m^3/día.$$

Debe conocerse:

- caudal promedio;
- caudal máximo;
- caudal mínimo;
- variación horaria;
- variación estacional.

13.5 DEFINICIÓN DEL USO FINAL

La calidad requerida depende del uso.

Podemos distinguir:

A. Reúso agrícola

Puede requerir control de:

- sólidos;
- patógenos;
- salinidad;
- nutrientes;
- contaminantes específicos.

B. Reúso industrial

Puede requerir:

- baja turbidez;

- baja dureza;
- baja conductividad;
- baja sílice;
- baja concentración de materia orgánica.

C. Agua de proceso

Puede requerir una calidad todavía mayor.

D. Agua para calderas

Puede requerir:

- muy bajo TDS;
- baja sílice;
- baja dureza;
- baja alcalinidad;
- bajo contenido de gases disueltos.

E. Reúso potable

Es el caso que requiere la mayor atención en:

- barreras múltiples;
- contaminantes químicos;
- microorganismos;
- confiabilidad;
- monitoreo;
- integridad de membranas;
- desinfección;
- control regulatorio.

La literatura de Kehrein et al. muestra que la calidad objetivo modifica directamente la configuración del proceso, recuperación, consumo energético y costos.

13.6 SELECCIÓN PRELIMINAR DEL PROCESO

Una matriz inicial puede ser:

Objetivo	Tecnología inicial
Sólidos suspendidos	MF
Bacterias	MF/UF
Coloides	UF
Macromoléculas	UF
Materia orgánica	NF/RO
Dureza	NF/RO
Sales disueltas	RO
Desmineralización	RO
Agua ultrapura	RO + tratamiento posterior
Biomasa	MF/UF
Materia biodegradable	proceso biológico
Concentración de salmuera	MD

Wachinski indica que MF/UF pueden utilizarse solas o conjuntamente con NF/RO dependiendo del objetivo específico del tratamiento.

13.7 DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROCESOS DE REÚSO

Wachinski presenta varias configuraciones de tratamiento que resultan especialmente útiles para enseñar diseño.

Una estructura básica es:

Efluente secundario → MF/UF → NF/RO → postratamiento

Otra:

Efluente secundario → MF/UF → RO → postratamiento

Y para mayor calidad:

Efluente secundario → pretratamiento → MF/UF → RO → segundo paso RO → postratamiento.

En el Capítulo 7 de Wachinski aparecen estas configuraciones dibujadas en diagramas de flujo.

13.8 SELECCIÓN DE MF/UF

Como barrera frente a los sólidos y protección para lo que viene después, MF y UF tienen una importancia especial.

Una configuración típica es:

Efluente secundario

↓

MF/UF

↓

RO

↓

Agua reutilizada

La ventaja principal es que la etapa de baja presión proporciona una alimentación mucho más apropiada para RO.

Wachinski señala que el pretratamiento por membranas permite operar NF/RO a mayores flujos y a un mayor flujo crítico.

13.9 SELECCIÓN DE NF FRENTE A RO

La decisión entre NF y RO depende fundamentalmente de la calidad requerida.

Wachinski proporciona, para condiciones típicas, rangos de rechazo de:

Componente	NF	RO
TDS	40–60 %	90–98 %
TOC	90–98 %	90–98 %
Color	90–96 %	90–96 %
Dureza	80–85 %	90–98 %
NaCl	10–50 %	90–99 %
Na_2SO_4	80–95 %	90–99 %
$CaCl_2$	10–50 %	90–99 %
$MgSO_4$	80–95 %	95–99 %
Nitrato	10–30 %	84–96 %

Los valores son rangos de referencia y varían con la membrana y las condiciones de operación.

Esto permite enseñar una regla práctica:

NF cuando se necesita separación selectiva o ablandamiento.

RO cuando se necesita una desmineralización mucho más profunda.

13.10 INDICADORES DE CALIDAD DE ALIMENTACIÓN A RO

Antes de diseñar RO deben revisarse:

- SDI;
- turbidez;

- TSS;
- temperatura;
- pH;
- dureza;
- sílice;
- sulfatos;
- materia orgánica;
- potencial de biofouling.

Wachinski señala que actualmente los sistemas de baja presión como pretratamiento permiten alcanzar valores de SDI inferiores a 3, lo cual favorece la operación de NF/RO.

13.11 FLUJO DE DISEÑO

El flujo se define como:

$$J=QP / A$$

por tanto:

$$A=QP / J$$

donde:

- J = flujo de permeado;
- QP = caudal de permeado;
- A = área de membrana.

Importante: el flujo de diseño no debe ser simplemente el flujo máximo observado experimentalmente.

El diseño debe considerar:

- temperatura;
- ensuciamiento;
- limpieza;
- envejecimiento;
- variabilidad de alimentación.

Wachinski demuestra que, según el flujo de diseño que se adopte, cambian directamente la cantidad de módulos, el espacio requerido, el uso de energía y los costos de operación y mantenimiento.

13.12 EJEMPLO DE CÁLCULO DE ÁREA

Supóngase:

$$QP=1{,}000\ m3/día$$

Y:

$$J=25\ L/(m2h)$$

Primero:

$$QP=1{,}000{,}000 / 24$$

$$QP=41{,}667\ L/h$$

Entonces:

$$A=41{,}667 / 25$$

$$A=1{,}667\ m2$$

Por tanto, se necesitan aproximadamente:

1,667 m² de área efectiva de membrana.

En un diseño real debe incorporarse un margen de diseño.

13.13 NÚMERO DE MÓDULOS

Si cada módulo tiene:

$$Am=40\ m2$$

entonces:

$$N=A / Am$$

$$N=1{,}667 / 40$$

$$N=41.7$$

Por tanto:

$$N=42\ módulos$$

Pero el diseño industrial no debería instalar simplemente 42 módulos sin considerar:

- redundancia;
- limpieza;

- mantenimiento;
- distribución hidráulica;
- etapas;
- presión;
- disponibilidad.

13.14 RECUPERACIÓN

La recuperación se define:

$$Y=QP / QF$$

Por tanto:

$$QP=YQF$$

y:

$$QR=QF-QP$$

Ejemplo

Si:

$$QF=2,000\ m3/día$$

y:

$$Y=75\%$$

entonces:

$$QP=1,500\ m3/día$$

y:

$$QR=500\ m3/\ día$$

13.15 RECUPERACIÓN GLOBAL

Para un sistema:

UF → RO

si:

$$YUF=90\%$$

y:

$$YRO=75\%$$

entonces:

$$Y_{global}=0.90(0.75)$$

$$Y_{global}=67.5\%$$

Este concepto debe quedar muy claro:

Las recuperaciones de etapas sucesivas no se suman.

13.16 BALANCE DE MASA GLOBAL

Para una instalación:

$$QF=QP+QR$$

Para un contaminante:

$$QFCF=QPCP+QRCR$$

Esta ecuación debe utilizarse para determinar:

- concentración del permeado;
- concentración del concentrado;
- carga contaminante;
- recuperación de sustancias.

13.17 CONCENTRACIÓN DEL CONCENTRADO

Si el soluto es rechazado casi completamente:

$$CR \approx CF / 1-Y$$

Por ejemplo:

$$CF=500 \text{ mg/L}$$

$$Y=0.80$$

Entonces:

$$CR=500 / 0.20$$

$$CR=2{,}500 \text{ mg/L}$$

Esto demuestra un principio fundamental:

Al recuperar más agua, el contaminante puede quedar mucho más concentrado en el rechazo.

Por ello, el concentrado es una parte esencial del diseño.

13.18 TRATAMIENTO DEL CONCENTRADO

El diseñador debe contestar:

¿Qué hago con el concentrado?

Opciones:

1. descarga;
2. tratamiento adicional;
3. evaporación;
4. cristalización;
5. MD;
6. recuperación de sales;
7. recuperación de metales;
8. recirculación;
9. disposición controlada.

Esto puede modificar radicalmente la economía de una planta.

Kehrein et al. encuentran en su estudio que el manejo de residuos y salmueras pesa bastante en el costo; en los procesos con RO, tratar la salmuera puede costar incluso más que la energía.

13.19 TEMPERATURA

La temperatura afecta:

- viscosidad;
- flujo;
- presión;
- permeabilidad;
- consumo energético.

En NF/RO, Wachinski señala que la presión debe ajustarse para compensar variaciones de temperatura y ensuciamiento.

Por ello, un diseño basado exclusivamente en datos a 25 °C puede ser inadecuado para una planta que opere a temperaturas muy diferentes.

13.20 PRESIÓN DE OPERACIÓN

Para NF/RO:

$J \propto \Delta P - \Delta \pi$

donde:

ΔP

es la diferencia de presión hidráulica y:

$\Delta \pi$

es la diferencia de presión osmótica.

Por tanto:

$$NDP = \Delta P - \Delta \pi$$

es una variable esencial.

Wachinski explica que las NF/RO necesitan presiones bastante superiores a las de las membranas de baja presión. En reúso son comunes valores entre 150 y más de 300 psi, y con agua de mar pueden llegar a ser mucho mayores.

13.21 ENSUCIAMIENTO

El ensuciamiento afecta:

$J \downarrow$

y puede requerir:

$\Delta P \uparrow$

para mantener la producción.

Esto provoca:

ensuciamiento

↓

menor flujo

↓

mayor presión

↓

mayor energía

↓

mayor costo

↓

limpieza

↓

menor vida útil de membrana.

Wachinski señala que la limpieza frecuente de membranas NF/RO puede reducir su rechazo y acelerar la necesidad de reemplazo, afectando los costos operativos.

13.22 FLUJO CRÍTICO

Debe distinguirse entre:

- flujo de operación;
- flujo crítico;
- flujo límite.

Una operación demasiado agresiva puede provocar rápidamente:

- depósito de sólidos;
- biofouling;
- concentración-polarización;
- reducción de flujo.

Por ello:

Jdiseño <Jcrítico

es un principio útil para diseño.

13.23 PRETRATAMIENTO

Dependiendo de la alimentación, el pretratamiento puede incluir:

Rejas

↓

Desarenado

↓

Coagulación

↓

Clarificación

↓

MF/UF

↓

RO

El pretratamiento debe diseñarse específicamente para la membrana siguiente.

Por ejemplo:

- la sílice puede limitar RO;
- la dureza puede generar scaling;
- la materia orgánica puede producir fouling;
- los microorganismos pueden producir biofouling.

Wachinski destaca que coagulantes y cal pueden ser incompatibles con determinadas NF/RO y que la elección del acondicionamiento químico debe hacerse considerando la compatibilidad con la membrana.

13.24 POSTRATAMIENTO

El agua producida por RO no necesariamente es químicamente adecuada para su uso final.

Puede requerirse:

- remineralización;
- ajuste de pH;
- alcalinización;
- desgasificación;
- desinfección;
- estabilización.

Wachinski explica que el filtrado de NF/RO puede presentar baja capacidad buffer y elevada concentración relativa de CO_2, lo que puede generar problemas de corrosividad.

Por tanto:

RO no siempre es la última operación.

13.25 DESINFECCIÓN

Dependiendo del uso final puede utilizarse:

- UV;
- cloración;
- ozono;
- combinación de tecnologías.

Para reúso potable, la desinfección debe considerarse dentro de una estrategia de **barreras múltiples**, no como una sustitución de todas las demás barreras.

En el estudio de Kehrein et al., por ejemplo, los procesos para reúso potable incorporan UF, RO y UV, mientras que el proceso de irrigación puede prescindir de RO y utilizar UF + UV.

13.26 DISEÑO DE UN SISTEMA DE REÚSO PARA DIFERENTES USOS

Una comparación particularmente didáctica es:

Reúso agrícola

Efluente → UF → UV → riego

Reúso industrial

Efluente → UF → RO → agua desmineralizada

Reúso potable

Efluente → UF → RO → estabilización → UV → agua potable

Kehrein et al. modelaron precisamente procesos diferentes para agua industrial, potable y de irrigación, mostrando que el nivel de calidad requerido determina la configuración y los costos.

13.27 CONSUMO ENERGÉTICO

La energía específica se expresa como:

$$SEC=E / VP$$

donde:

- E = energía consumida;
- VP = volumen de agua recuperada.

Kehrein et al. obtuvieron, para sus condiciones de modelamiento, valores específicos de aproximadamente:

Proceso	Energía específica
Agua desmineralizada	0.83 kWh/m³
Agua potable	0.82 kWh/m³
Agua de irrigación	0.20 kWh/m³
Irrigación +	0.74 kWh/m³

Estos valores corresponden al caso estudiado y **no deben trasladarse directamente a una planta peruana**, pero sirven para comparar conceptualmente el impacto energético de incorporar RO.

La lección es clara:

incorporar RO aumenta considerablemente el consumo energético.

13.28 CAPEX Y OPEX

El costo total puede dividirse en:

CAPEX

- membranas;
- módulos;
- bombas;
- tanques;
- tuberías;
- instrumentación;
- instalación;
- obra civil;
- sistemas auxiliares.

OPEX

- energía;
- productos químicos;

- limpieza;
- reemplazo de membranas;
- mano de obra;
- mantenimiento;
- disposición de residuos;
- tratamiento del concentrado.

Kehrein et al. muestran que, en los procesos analizados, el OPEX puede superar al CAPEX.

Este punto es particularmente importante para enseñar **ingeniería económica aplicada a membranas**.

13.29 EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN DE OPEX

Para los procesos modelados por Kehrein et al., el componente de residuos representó aproximadamente:

- 42 % en agua desmineralizada;
- 44 % en agua potable;
- 21 % en irrigación;
- 47 % en irrigación+.

La energía representó aproximadamente 10–14 % según el caso.

Esto produce una conclusión pedagógicamente muy importante:

Reducir el consumo de energía no necesariamente produce la mayor reducción del costo total.

A veces el problema dominante es:

¿Qué hacemos con el concentrado y otros residuos?

13.30 COSTO ESPECÍFICO DEL AGUA

Puede calcularse:

Cagua=Canual / V agua producida

Por ejemplo, si:

Canual=1,500,000 US$/año

y:

$$VP=1{,}000{,}000\ m3/año$$

entonces:

Cagua=1.50 US$/m3

13.31 COSTO DE CICLO DE VIDA

No debe analizarse solamente:

costo de instalación.

Debe utilizarse:

$$LCC=CAPEX+PV(OPEX)$$

donde:

LCC = costo de ciclo de vida.

Debe incluir:

- energía;
- reemplazo de membranas;
- limpieza;
- mantenimiento;
- productos químicos;
- concentrado;
- mano de obra.

La experiencia reportada por Wachinski muestra que la selección de flujo optimizado puede reducir simultáneamente número de módulos, CAPEX, reemplazos y OPEX.

13.32 EVALUACIÓN MULTICRITERIO

La alternativa de menor costo no siempre es la mejor.

Debe evaluarse:

Criterio	Importancia
Calidad del agua	Muy alta
Recuperación	Alta
Energía	Alta
CAPEX	Alta

Criterio	Importancia
OPEX	Muy alta
Concentrado	Muy alta
Confiabilidad	Muy alta
Facilidad de operación	Alta
Área ocupada	Media
Sostenibilidad	Alta

Así, la selección se convierte en una **decisión multicriterio**.

13.33 CONFIABILIDAD

Una planta de reúso debe ser capaz de continuar operando, aunque:

- falle un módulo;
- una línea esté en limpieza;
- varíe la alimentación;
- aumente temporalmente el caudal;
- disminuya la temperatura.

Entre los criterios de diseño esenciales, Wachinski menciona expresamente la confiabilidad del sistema.

Por ello se utilizan:

- trenes paralelos;
- módulos redundantes;
- bypass;
- almacenamiento;
- alarmas;
- instrumentación;
- control automático.

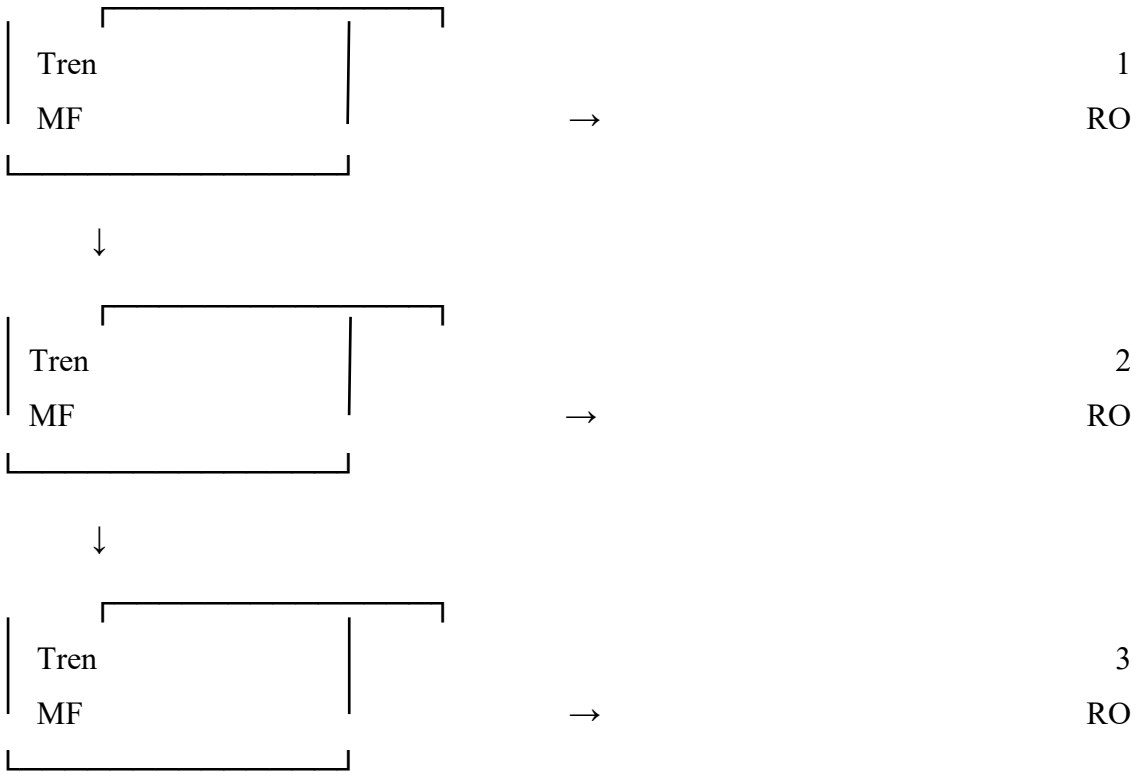
13.34 DISEÑO MODULAR

Una de las ventajas de las membranas es la modularidad.

Por ejemplo:

Alimentación

↓



Esto permite ampliar progresivamente la capacidad.

Wachinski destaca que los sistemas modulares pueden ampliarse con relativa facilidad y que existen configuraciones preensambladas y móviles para determinadas capacidades.

13.35 PRUEBA PILOTO

Antes de construir una planta industrial debe determinarse experimentalmente:

- flujo;
- presión;
- recuperación;
- rechazo;
- ensuciamiento;
- frecuencia de limpieza;
- calidad del permeado;

- estabilidad.

En lo necesario, la prueba piloto tiene que reproducir las condiciones hidráulicas y de operación del sistema definitivo.

En un caso de estudio de reúso, Wachinski muestra que la optimización del flujo mediante pruebas piloto puede modificar significativamente el número de módulos y los costos de ciclo de vida.

13.36 PROCEDIMIENTO COMPLETO DE DISEÑO

Propongo enseñar a los alumnos el siguiente procedimiento como **algoritmo de diseño**:

Paso 1

Definir el caudal.

Paso 2

Caracterizar el agua.

Paso 3

Definir el uso final.

Paso 4

Establecer límites de calidad.

Paso 5

Identificar contaminantes críticos.

Paso 6

Seleccionar procesos candidatos.

Paso 7

Definir el tren de tratamiento.

Paso 8

Realizar balance de masa.

Paso 9

Seleccionar recuperación.

Paso 10

Seleccionar flujo de diseño.

Paso 11

Calcular área de membrana.

Paso 12

Seleccionar módulos.

Paso 13

Determinar número de módulos y trenes.

Paso 14

Calcular presión y energía.

Paso 15

Diseñar pretratamiento.

Paso 16

Diseñar limpieza.

Paso 17

Diseñar postratamiento.

Paso 18

Definir manejo de concentrados.

Paso 19

Estimar CAPEX.

Paso 20

Estimar OPEX.

Paso 21

Calcular costo específico.

Paso 22

Realizar análisis de sensibilidad.

Paso 23

Comparar alternativas.

Paso 24

Seleccionar la alternativa óptima.

13.37 EJEMPLO INTEGRADOR DE DISEÑO

Una industria dispone de:

$$QF=2{,}000\ m3/día$$

con:

- TSS = 100 mg/L;
- TDS = 2,500 mg/L;
- DQO = 400 mg/L.

Desea reutilizar:

$QP \geq 1{,}200\ m3/día$

para proceso industrial.

Se plantea:

MF/UF → RO

Supongamos:

$$YUF=90\%$$

y:

$$YRO=75\%.$$

La recuperación global será:

$$Y=0.90(0.75)$$

$$Y=67.5\%.$$

Entonces:

$Qproducto=2{,}000(0.675)$

$Qproducto=1{,}350\ m3/día.$

Por tanto:

$1{,}350>1{,}200$

y el objetivo de producción se cumple.

13.38 ANÁLISIS DEL RESULTADO

La solución aparentemente funciona, pero el ingeniero todavía debe responder:

¿Es suficiente la calidad del agua?

Debe verificarse el TDS y demás contaminantes.

¿Es aceptable el concentrado?

Debe determinarse:

$$QR=2{,}000-1{,}350$$

$$QR=650\ m3/día.$$

¿Es económicamente viable?

Debe calcularse:

CAPEX+OPEX.

¿Qué pasa si baja la temperatura?

Debe corregirse el flujo.

¿Qué pasa si aumenta la DQO?

Puede aumentar el ensuciamiento.

¿Qué pasa si aumenta la dureza?

Puede aparecer scaling.

Así se demuestra al estudiante que:

dimensionar una membrana no equivale a diseñar una planta.

13.39 OPTIMIZACIÓN

El diseño puede formularse matemáticamente como:

min⁡Ctotal\min C_{total}

sujeto a:

QP≥Qobjetivo

CP≤Cobjetivo

Y≥Ymín

P≤Pmáx

y:

J≤Jcrítico.

Las variables de decisión pueden ser:

- número de módulos;
- área;
- presión;
- recuperación;
- flujo;
- número de etapas;
- pretratamiento;
- frecuencia de limpieza.

13.40 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El estudiante debe estudiar qué ocurre si cambia:

Temperatura

+10 %

↓

flujo

Presión

+10 %

↓

flujo

Recuperación

+10 %

↓

concentración del rechazo

Energía

+20 %

↓

OPEX

Vida de membrana

-20 %

↓

costo de reemplazo.

Esto permite identificar cuáles variables dominan el costo del sistema.

13.41 REÚSO Y SOSTENIBILIDAD

La sostenibilidad debe evaluarse simultáneamente mediante:

Sostenibilidad=f(agua, energía, costo, residuos)

Kehrein et al. consideran específicamente como indicadores:

- consumo energético;
- recuperación de agua;
- costos.

También estudian, para optimizar, el uso de energía solar y el aprovechamiento energético del biogás.

Esto permite conectar este capítulo con los conceptos de:

- economía circular;
- energía renovable;
- huella de carbono;
- reúso;
- recuperación de recursos.

13.42 AGUA–ENERGÍA

Existe una relación fundamental:

más recuperación

→ generalmente

más concentración

→ puede requerir

más presión/tratamiento

→

más energía/costo.

Pero:

menos recuperación

→

más agua de rechazo

→

mayor consumo de agua fresca.

Por ello existe un compromiso:

recuperación de agua ↔ energía ↔ costo ↔ concentrado

Este es uno de los conceptos más importantes del capítulo.

13.43 ENERGÍA RENOVABLE

Una planta de reúso puede integrar:

Aguas residuales

↓

tratamiento

↓

RO

↓

agua reutilizada

y simultáneamente:

Aguas residuales

↓

digestión anaerobia

↓

biogás

↓

electricidad

↓

bombas

Kehrein et al. estudian justamente cómo combinar energía solar con la recuperación de la energía del COD mediante digestión anaerobia.

13.44 CONCEPTO DE PLANTA "FIT-FOR-PURPOSE"

Una idea especialmente importante para los estudiantes es:

No toda el agua necesita calidad potable.

Si una industria requiere:

TDS<500 mg/L

no necesariamente debe producir:

TDS<10 mg/L.TDS<10\ mg/L.

Producir una calidad superior a la necesaria puede aumentar:

- CAPEX;
- OPEX;
- energía;
- residuos.

Por tanto:

Calidad requerida ≠ calidad máxima posible

La tecnología debe producir **la calidad necesaria para el uso específico**.

Kehrein et al. plantean incluso el concepto de procesos "fit for multi-purpose", capaces de adaptarse a diferentes usos del agua.

13.45 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE REÚSO

Figura 13.1

Metodología para el diseño de una planta de reúso

Caracterización del agua

↓

Definición del uso final

↓

Especificación de calidad

↓

Selección de membranas

↓

Diseño conceptual

↓

Balance de masa

↓

Dimensionamiento

↓

Prueba piloto

↓

CAPEX + OPEX

↓

Optimización

↓

Diseño final

↓

Construcción

↓

Operación + monitoreo

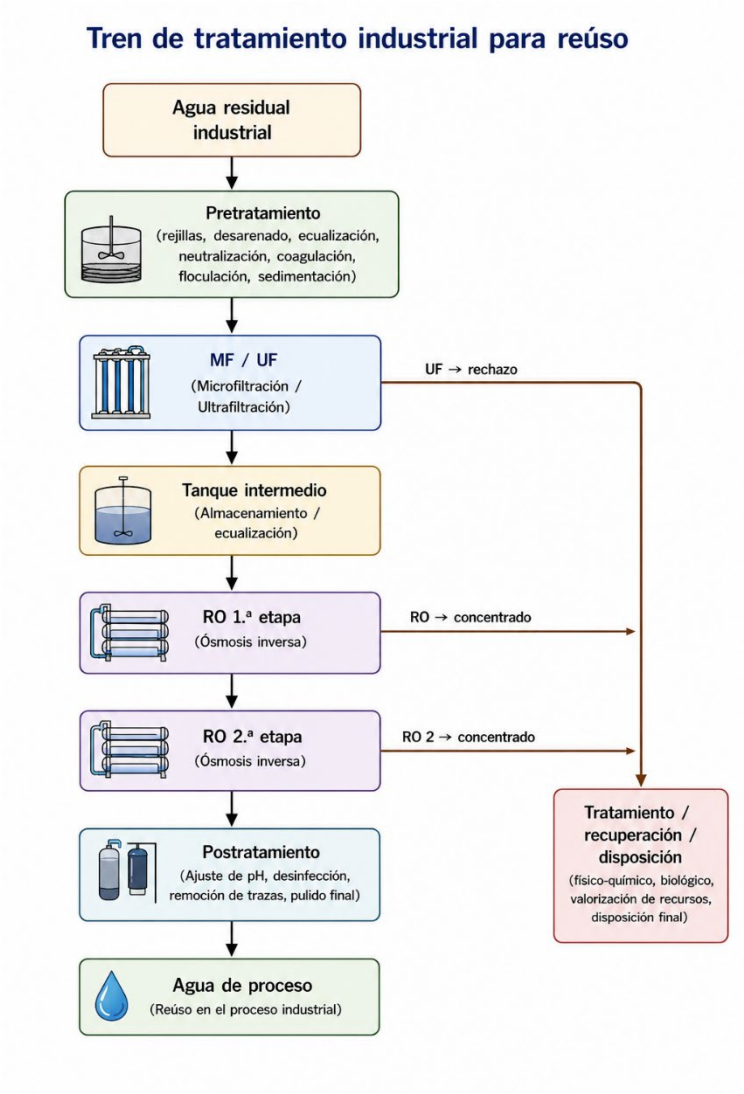
↓

Reúso

13.46 TREN DE TRATAMIENTO INDUSTRIAL PARA REÚSO

Figura 13.2

Tren de tratamiento industrial para reuso



Nota. Elaboración propia basada en los principios de diseño y aplicación de procesos de tratamiento y reúso de agua mediante tecnologías de membranas descritos por Baker (2012), Crittenden et al. (2012) y Mulder (1996).

13.47 PROBLEMA PROPUESTO 1: DIMENSIONAMIENTO

Una planta recibe:

$$Q_F = 3{,}000 \text{ m}^3/\text{día}.$$

Se requiere una recuperación global de 70 %.

Determinar:

a) caudal de producto;

b) caudal de rechazo;

c) área de membrana si:

$$J = 25 \text{ L}/(\text{m}^2\text{h})$$

d) número de módulos si cada módulo tiene 40 m².

13.48 PROBLEMA PROPUESTO 2: RECUPERACIÓN

Una planta tiene:

$$YUF=92\%$$

y:

$$YRO=78\%.$$

Determinar:

a) recuperación global;

b) si la alimentación es 5,000 m³/día, cuánto producto se obtiene;

c) cuánto concentrado se genera.

13.49 PROBLEMA PROPUESTO 3: CONCENTRACIÓN

Una alimentación contiene:

$$CF=1{,}000\ mg/LC_F=1{,}000\backslash\ mg/L$$

y la RO opera a:

$$Y=80\%.$$

Suponiendo rechazo completo:

$$CR=CF\ /\ 1-Y$$

Calcular la concentración del concentrado.

13.50 PROBLEMA PROPUESTO 4: COMPARACIÓN ECONÓMICA

Se tienen dos alternativas:

Alternativa A

UF → RO

CAPEX = US$ 2.0 millones

$$OPEX = US\$\ 0.8\ millones/año.$$

Alternativa B

UF → NF

CAPEX = US$ 1.5 millones

$$OPEX = US\$\ 0.5\ millones/año.$$

Pero A produce agua adecuada para el proceso y B requiere posteriormente tratamiento adicional de US$ 0.4 millones/año.

Preguntas:

1. ¿Cuál tiene menor CAPEX?
2. ¿Cuál tiene menor OPEX total?
3. ¿Cuál tiene menor costo de ciclo de vida?
4. ¿Qué otros criterios deben considerarse?

13.51 PROBLEMA INTEGRADOR PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA QUÍMICA

Una planta municipal produce:

$$Q=10{,}000\ m3/día$$

de efluente secundario.

Se desea producir agua para:

40 % uso agrícola

40 % uso industrial

20 % uso urbano no potable.

El agua presenta:

- TSS = 30 mg/L;
- TDS = 1,800 mg/L;
- DQO = 60 mg/L;
- turbidez = 10 NTU.

El estudiante debe diseñar:

Alternativa A

UF → UV

Alternativa B

UF → RO → UV

Alternativa C

UF → NF → RO → UV

Debe determinar:

- diagrama de flujo;
- recuperación;
- caudales;
- área de membrana;
- número de módulos;
- presión;
- energía;
- concentrado;
- postratamiento;
- CAPEX;
- OPEX;
- costo por m^3;
- ventajas;
- desventajas.

Finalmente debe justificar cuál alternativa seleccionaría y **por qué**.

13.52 CASO ESPECIAL: REÚSO POTABLE

Este tema debe enseñarse con especial cuidado.

La producción de agua para reúso potable no debe presentarse simplemente como:

RO = agua potable.

Debe comprenderse como un sistema de barreras múltiples.

Una posible conceptualización es:

Aguas residuales

↓

Tratamiento biológico

↓

MF/UF

↓

RO

↓

Tratamiento posterior

↓

Desinfección

↓

Agua para reúso potable

La confiabilidad debe demostrarse mediante:

- monitoreo;
- integridad de membranas;
- redundancia;
- control de operación;
- barreras múltiples.

La literatura de AWWA incorporada por usted contiene numerosos trabajos sobre rechazo microbiano, RO/NF, pretratamiento y aplicaciones de reúso, por lo que resulta una fuente particularmente apropiada para profundizar esta sección.

13.53 CASO ESPECIAL: REUSO INDUSTRIAL

Para la industria química, esta me parece una de las aplicaciones de mayor peso en el capítulo.

Una configuración puede ser:

Efluente industrial

↓

MF/UF

↓

NF

↓

RO

↓

Agua de proceso

con:

Concentrado NF/RO

↓

recuperación de sustancias

↓

reúso o disposición.

La ventaja es que el sistema puede diseñarse simultáneamente para:

tratamiento + reúso + recuperación de recursos.

13.54 CASO ESPECIAL: INDUSTRIA ENERGÉTICA

Para agua destinada a generación de vapor:

Agua residual

↓

UF

↓

RO

↓

desmineralización

↓

pulido

↓

caldera.

Debe prestarse especial atención a:

- sílice;
- dureza;
- TDS;
- alcalinidad;
- gases disueltos.

Wachinski resalta, por ejemplo, la sílice y cómo se comporta en sistemas de membranas, sobre todo en aplicaciones muy exigentes.

13.55 ERRORES FRECUENTES DEL DISEÑADOR

Error 1

Seleccionar RO sin caracterizar la alimentación.

Error 2

Diseñar con el flujo máximo de laboratorio.

Error 3

Ignorar la temperatura.

Error 4

No considerar el ensuciamiento.

Error 5

No calcular el concentrado.

Error 6

Comparar únicamente CAPEX.

Error 7

Ignorar el costo de limpieza.

Error 8

No considerar reemplazo de membranas.

Error 9

Producir una calidad superior a la necesaria.

Error 10

No incluir redundancia.

Error 11

No realizar prueba piloto.

Error 12

Confundir "agua tratada" con "agua apta para cualquier uso".

13.56 CONCEPTO FUNDAMENTAL QUE DEBE QUEDAR EN EL ALUMNO

El diseño de una planta de membranas puede resumirse como:

Calidad de alimentación→objetivo de reuso→proceso→membrana→módulo→´área→energía→economía

Y el diseño no termina allí:

Diseño→operación→ensuciamiento→limpieza→reemplazo→costo de ciclo de vida

13.57 CONCLUSIONES

Para diseñar sistemas de membranas con fines de reúso hay que juntar conocimientos de:

- química;
- fenómenos de transporte;
- operaciones unitarias;
- tratamiento de aguas;
- hidráulica;
- control;
- economía;
- sostenibilidad.

El diseñador debe pasar de la pregunta:

¿Qué membrana separa este contaminante?

a una pregunta mucho más completa:

¿Con qué sistema de tratamiento se obtiene el agua de calidad requerida, manteniendo adecuadas la recuperación, la confiabilidad, la energía consumida y el costo de ciclo de vida?

Los nuevos documentos aportados refuerzan esta visión. Wachinski estructura el diseño alrededor de flujo, temperatura, calidad, recuperación, integridad, pretratamiento, limpieza y confiabilidad.

Por su parte, el estudio tecnoeconómico de Kehrein et al. demuestra que **la elección del uso final determina la calidad requerida y, por consiguiente, el diseño, recuperación, energía y costo del proceso**.

Una conclusión particularmente importante para Ingeniería Química es:

La mejor planta no es necesariamente la que recupera más agua sino la que proporciona:

calidad adecuada + alta confiabilidad + recuperación razonable + bajo costo total + manejo sostenible del concentrado

13.58 PREGUNTAS DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuáles son las etapas fundamentales para diseñar una planta de membranas?
2. ¿Por qué debe definirse primero el uso final del agua?
3. ¿Qué parámetros deben analizarse antes de seleccionar una membrana?
4. ¿Cuándo se debe utilizar MF o UF?
5. ¿Cuándo es preferible NF frente a RO?
6. ¿Qué es el flujo de diseño?
7. ¿Cómo se calcula el área de membrana?
8. ¿Por qué el flujo máximo experimental no debe utilizarse automáticamente como flujo de diseño?
9. ¿Cómo se calcula la recuperación?
10. ¿Cómo se calcula la recuperación global?
11. ¿Cómo se determina la concentración del concentrado?
12. ¿Por qué aumentar la recuperación puede aumentar el problema del concentrado?
13. ¿Qué importancia tiene el SDI?
14. ¿Cómo afecta la temperatura al funcionamiento de RO?
15. ¿Qué es la presión osmótica?
16. ¿Qué es el NDP?
17. ¿Qué efectos produce el ensuciamiento?
18. ¿Qué diferencia existe entre CAPEX y OPEX?

19. ¿Por qué el OPEX puede ser mayor que el CAPEX?
20. ¿Por qué el costo del concentrado puede ser determinante?
21. ¿Qué es el costo específico del agua?
22. ¿Qué es el costo de ciclo de vida?
23. ¿Por qué es importante la prueba piloto?
24. ¿Qué significa diseñar una planta "fit-for-purpose"?
25. ¿Por qué la confiabilidad es fundamental en una planta de reúso?
26. ¿Cómo se puede integrar energía renovable?
27. ¿Qué variables deben incluirse en un análisis de sensibilidad?
28. ¿Qué diferencia existe entre diseñar una membrana y diseñar una planta de membranas?

CAPÍTULO 14

DESALINIZACIÓN AVANZADA Y GESTIÓN DE SALMUERAS

14.1 INTRODUCCIÓN

A partir de fuentes con alto contenido de sales, la desalinización produce agua de calidad adecuada para beber, para procesos industriales, para riego u otros usos.

Las tecnologías de membranas ocupan hoy un lugar central en la desalinización, porque producen agua de alta calidad y, por lo general, con menos energía que muchos procesos térmicos convencionales.

Evaluar una desalinizadora solo por el volumen y la calidad de agua que entrega sería quedarse corto. El rechazo, o concentrado, es una parte sustancial del problema de ingeniería.

En una planta de ósmosis inversa:

Agua de alimentación → RO → permeado + concentrado

El permeado constituye el producto principal, mientras que el concentrado contiene las sales y otros componentes que no atraviesan la membrana.

Por tanto, toda planta desalinizadora debe responder simultáneamente a tres preguntas:

1. ¿Cuánta agua puede recuperarse?
2. ¿Con qué consumo energético?
3. ¿Qué se hará con el concentrado generado?

Esta última pregunta adquiere especial importancia cuando la planta se encuentra en una zona continental, cuando existen restricciones ambientales para la descarga o cuando se pretende aumentar significativamente la recuperación.

Revisando la literatura sobre manejo de concentrados se ve que la mejor alternativa varía con la calidad del agua, el lugar donde está la planta, las leyes aplicables, los costos y las propiedades del concentrado.

Este capítulo busca dar herramientas para que el estudiante analice una planta de desalinización de forma integral, tomando en cuenta:

- SWRO;
- BWRO;
- recuperación de energía;
- aumento de recuperación;
- concentración de salmuera;
- disposición del concentrado;
- concentración avanzada;
- MLD;
- ZLD;
- recuperación de sales;
- recuperación de minerales;
- integración con destilación por membranas;
- integración energética;
- energías renovables.

14.2 TIPOS DE AGUA PARA DESALINIZACIÓN

La salinidad de la alimentación condiciona directamente el proceso de desalinización.

Como referencia de ingeniería pueden distinguirse:

Tipo de agua	TDS aproximado	Tecnología de referencia
Agua dulce	< 500 mg/L	Tratamientos convencionales
Agua ligeramente salobre	500 - 1500 mg/L	NF, IX, EDR
Agua salobre	1500 - 10 000 mg/L	BWRO
Agua muy salobre	10 000 - 35 000 mg/L	BWRO de alta recuperación
Agua de mar	35 000 - 45 000 mg/L	SWRO
Salmuera concentrada	> 45 000 mg/L	Procesos de concentración y/o ZLD

Estos rangos deben considerarse orientativos. La selección tecnológica no debe realizarse solamente mediante TDS.

También deben analizarse:

- composición iónica;
- temperatura;
- alcalinidad;
- sílice;
- dureza;
- materia orgánica;
- SDI;
- sólidos suspendidos;
- potencial de incrustación;
- presencia de metales;
- contaminantes específicos.

El criterio fundamental es:

Caracterización del agua → restricciones → selección tecnológica

14.3 BWRO Y SWRO

Las plantas de BWRO (ósmosis inversa de agua salobre) y de SWRO (agua de mar) funcionan con el mismo principio; no obstante, las condiciones para diseñarlas difieren bastante.

BWRO

Con una alimentación de menor presión osmótica, la BWRO trabaja normalmente a presiones más bajas que la SWRO.

Esto puede traducirse en:

- menor consumo energético;
- mayor recuperación potencial;
- menores exigencias sobre equipos de alta presión.

Sin embargo, las aguas salobres pueden presentar problemas específicos relacionados con:

- dureza;
- sulfatos;

- sílice;
- hierro;
- manganeso;
- nitratos;
- arsénico;
- otros contaminantes propios del acuífero.

SWRO

El agua de mar tiene una presión osmótica alta, así que se opera a presiones mayores.

En términos conceptuales:

$P_{operación} > \Delta\pi$

donde:

$P_{operación}$ = presión de operación

$\Delta\pi$ = diferencia de presión osmótica

La recuperación de energía es indispensable en las plantas SWRO de hoy.

14.4 BALANCE HIDRÁULICO DE UNA PLANTA DESALINIZADORA

El balance de agua es:

$$Qf = Qp + Qc$$

donde:

Qf = caudal de alimentación

Qp = caudal de permeado

Qc = caudal de concentrado

La recuperación es:

$$Y = Qp / Qf$$

En porcentaje:

$$Y(\%) = (Qp / Qf) \times 100$$

Por tanto:

$$Qp = Y \times Qf$$

y:

$$Qc = Qf \times (1 - Y)$$

Ejemplo 14.1

Una planta SWRO recibe:

$$Qf = 100\ 000\ m3/d$$

y opera con:

$$Y = 45\ \%$$

Entonces:

$$Qp = 0.45 \times 100\ 000$$

$$Qp = 45\ 000\ m3/d$$

El concentrado será:

$$Qc = 100\ 000 - 45\ 000$$

$$Qc = 55\ 000\ m3/d$$

Este resultado tiene una importancia ambiental y económica considerable.

La planta produce 45 000 m3/d de agua, pero debe gestionar 55 000 m3/d de concentrado.

14.5 CONCENTRACIÓN DE SALES EN EL CONCENTRADO

En una primera aproximación, suponiendo rechazo prácticamente completo de la sal:

$$Cc \approx Cf / (1 - Y)$$

donde:

Cc = concentración del concentrado

Cf = concentración de la alimentación

Y = recuperación expresada como fracción

Ejemplo 14.2

Para:

$$Cf = 35\ 000\ mg/L$$

$$Y = 0.45$$

se obtiene:

$$Cc \approx 35\ 000 / (1 - 0.45)$$

$$Cc \approx 63\ 636\ mg/L$$

Por tanto, la salinidad del concentrado puede aproximarse a:

$C_c \approx 63\ 600$ mg/L

Esto demuestra que una alimentación de aproximadamente 35 000 mg/L puede generar un concentrado con una salinidad superior a 60 000 mg/L.

Los valores efectivos cambian según el rechazo de sales y la química de la alimentación.

La relación entre recuperación y concentración es fundamental para comprender la gestión de salmueras.

14.6 FACTOR DE CONCENTRACIÓN

El factor de concentración aproximado puede expresarse como:

$$FC = 1 / (1 - Y)$$

Para:

$$Y = 0.45$$

$$FC = 1 / 0.55$$

$$FC = 1.82$$

Para:

$$Y = 0.75$$

$$FC = 1 / 0.25$$

$$FC = 4.0$$

Para:

$$Y = 0.90$$

$$FC = 1 / 0.10$$

$$FC = 10$$

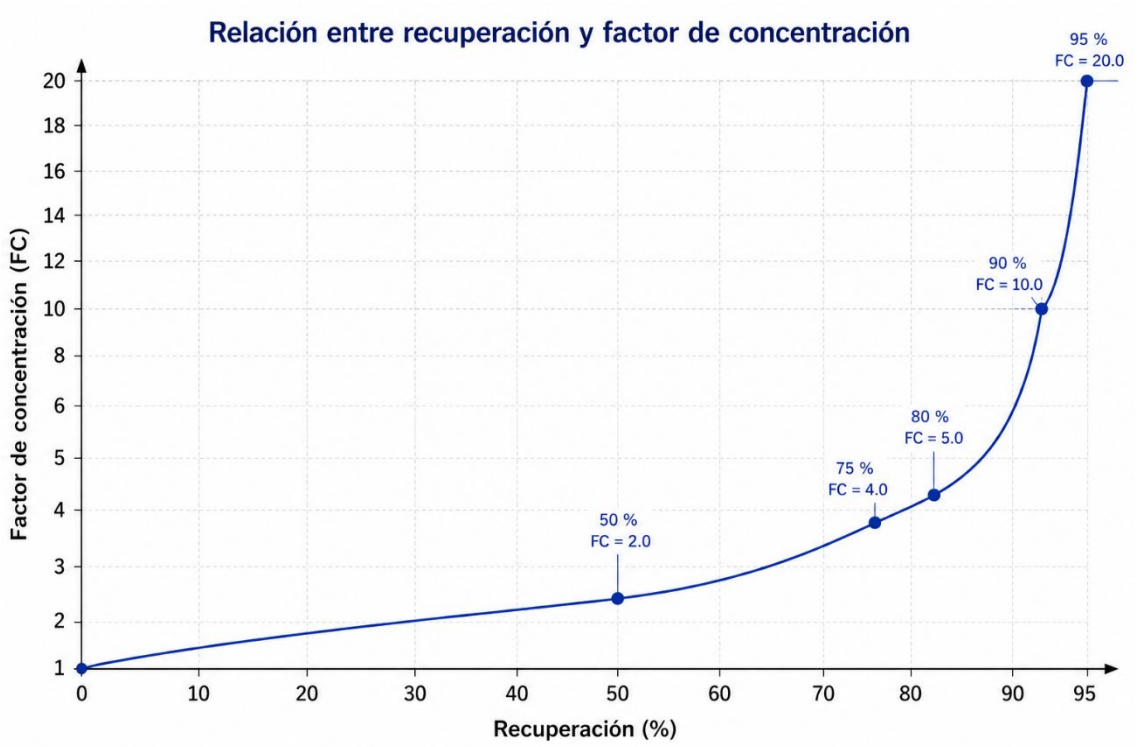
Esto significa que aumentar la recuperación de 45 % a 90 % puede multiplicar aproximadamente por 10 la concentración de las especies conservativas respecto de la alimentación.

Las guías de desalinización indican que el factor de concentración aumenta de forma pronunciada cuando la recuperación pasa de alrededor de 80-90 %.

14.7 RELACIÓN ENTRE RECUPERACIÓN Y CONCENTRACIÓN DEL CONCENTRADO

Figura 14.1

Relación entre recuperación y concentración del concentrado



Nota. Elaboración propia con base en los criterios de concentración de salmuera presentados en la literatura de desalinización y gestión de concentrados.

Voutchkov (2013) presenta relaciones entre recuperación y concentración del rechazo; las guías de diseño muestran igualmente el fuerte aumento del factor de concentración a recuperaciones elevadas.

14.8 SELECCIÓN DE LA RECUPERACIÓN

La recuperación no debe seleccionarse simplemente como:

"la mayor recuperación posible".

Debe seleccionarse considerando simultáneamente:

- presión osmótica;
- concentración del concentrado;
- scaling;
- presión máxima;
- flux;

- energía;
- limpieza;
- vida útil de membranas;
- caudal de concentrado;
- costo de disposición.

El criterio puede expresarse:

Recuperación óptima = recuperación que minimiza el costo total sujeto a restricciones técnicas y ambientales

Por ejemplo:

Y ↑

produce:

Qp ↑

pero también:

Qc ↓

y:

Cc ↑

Por tanto, existe un compromiso entre producción y concentración.

14.9 RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN SWRO

En una planta SWRO moderna, la recuperación de energía es de los elementos más relevantes.

El concentrado abandona los módulos a alta presión.

Si esta energía se pierde completamente:

Energía del concentrado → descarga

la bomba debe suministrar prácticamente toda la energía necesaria para presurizar la alimentación.

Una porción de esa energía vuelve a la alimentación mediante dispositivos de recuperación de energía, los ERD.

El concepto general es:

Concentrado a alta presión → ERD → energía transferida → alimentación

Los sistemas modernos pueden utilizar:

- turbinas Pelton;
- intercambiadores de presión;
- dispositivos isobáricos;
- otros sistemas de recuperación.

Voutchkov muestra que los sistemas basados en intercambiadores de presión pueden alcanzar eficiencias de recuperación muy elevadas y presentan ventajas particulares en configuraciones SWRO de recuperación variable.

14.10 POTENCIA HIDRÁULICA

La potencia hidráulica se puede estimar mediante:

$$Ph = \Delta P \times Q$$

Si:

$$\Delta P = \text{diferencia de presión en Pa}$$

$$Q = \text{caudal en m3/s}$$

entonces:

$$Ph = \text{potencia hidráulica en W}$$

La potencia eléctrica aproximada es:

$$Pe = Ph / \eta$$

donde:

η = eficiencia global de la bomba y motor

Si se incorpora recuperación de energía:

$Pe,neta = Pe,bomba - Pe,recuperada$

Esta ecuación representa conceptualmente el beneficio del ERD.

14.11 EJEMPLO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Supongamos:

$$Q = 1.0 \text{ m3/s}$$

$$\Delta P = 60 \text{ bar}$$

Conversión:

60 bar = 6 000 000 Pa

Entonces:

$$Ph = 6\ 000\ 000 \times 1.0$$

$$Ph = 6\ 000\ 000\ W$$

$$Ph = 6\ MW$$

Si la eficiencia global de bombeo fuera:

$\eta = 0.85$

entonces:

$$Pe = 6 / 0.85$$

$$Pe = 7.06\ MW$$

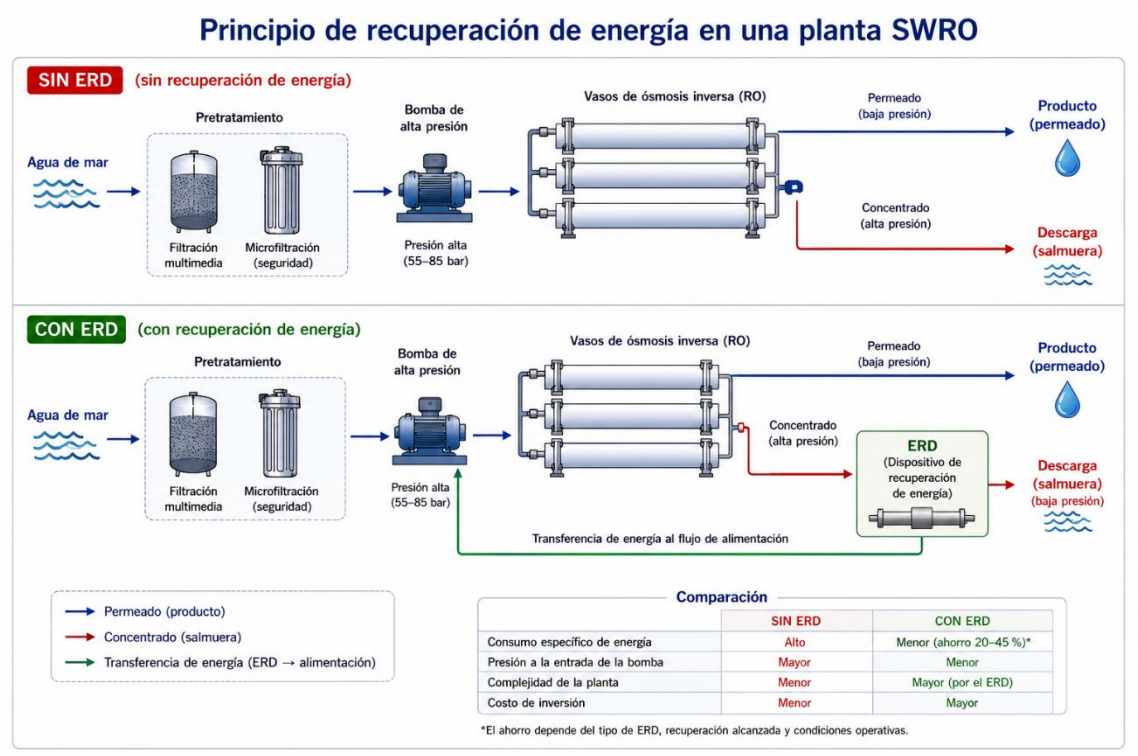
Con un sistema que recupere alrededor de 90 % de la energía hidráulica del concentrado, la planta podría requerir una energía neta bastante menor.

En un diseño real, el cálculo debe realizarse utilizando los caudales y presiones de cada corriente y la eficiencia específica del ERD.

14.12 PRINCIPIO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA EN UNA PLANTA SWRO

Figura 14.2

Principio de recuperación de energía en una planta SWRO



Nota. Elaboración propia con base en Voutchkov (2013) y Ludwig et al.

Voutchkov (2013) y Ludwig et al., describen configuraciones de SWRO y sistemas de recuperación energética mediante dispositivos isobáricos y otros sistemas de recuperación.

14.13 OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA

El objetivo no es minimizar únicamente la potencia de la bomba.

Debe minimizarse:

$$\text{SEC} = \text{energía consumida} / \text{volumen de permeado}$$

Por tanto:

$$\text{SEC} = E / Vp$$

donde:

SEC = consumo específico de energía

E = energía consumida

Vp = volumen de permeado

La optimización debe considerar:

SEC + costo químico + costo de membranas + costo de disposición del concentrado

Esto es particularmente importante cuando se aumenta la recuperación.

Voutchkov señala que una recuperación mayor puede incrementar el consumo energético y la frecuencia de limpieza, y que, dependiendo del costo de electricidad y del comportamiento del sistema de recuperación energética, una recuperación menor puede resultar económicamente más favorable.

14.14 GESTIÓN DEL CONCENTRADO

Manejar el concentrado es uno de los mayores retos de la desalinización.

Las alternativas pueden agruparse en:

Descarga superficial

Puede utilizarse cuando existe un cuerpo receptor apropiado y la regulación lo permite.

Descarga marina

Es una alternativa común para grandes plantas SWRO costeras.

Descarga a alcantarillado

Puede ser viable para determinados caudales y composiciones.

Pozos de inyección

Pueden utilizarse en determinadas condiciones geológicas.

Lagunas de evaporación

Son más aplicables a determinadas instalaciones continentales y condiciones climáticas.

Concentración adicional

Permite disminuir el volumen líquido que debe disponerse.

MLD

Busca reducir sustancialmente la descarga líquida sin necesariamente llegar a una descarga líquida cero.

ZLD

Busca eliminar prácticamente la descarga líquida y obtener un residuo sólido.

La elección depende de:

legislación;

ubicación;

volumen;

composición;

costos;

disponibilidad de terreno;

energía;

impacto ambiental.

La National Academies señala que la descarga superficial puede ser una alternativa de bajo consumo energético y bajo nivel tecnológico, pero requiere considerar salinidad, mezcla, diseño de difusores y efectos potenciales sobre organismos acuáticos.

14.15 DESCARGA MARINA

En plantas SWRO costeras, el concentrado puede descargarse al mar mediante un emisario diseñado adecuadamente.

El problema de ingeniería no es simplemente:

"descargar la salmuera al mar".

Debe determinarse:

- caudal;
- salinidad;
- temperatura;
- densidad;
- composición;
- ubicación;
- profundidad;
- geometría del emisario;
- número de difusores;
- velocidad de descarga;
- características hidrodinámicas del receptor.

El concentrado es normalmente más denso que el agua de mar, por lo que puede presentar tendencia a desplazarse hacia el fondo.

El diseño de difusores permite favorecer la mezcla y reducir la concentración local.

La National Academies destaca precisamente la importancia de los difusores multipuerto para acelerar la mezcla y reducir impactos potenciales sobre comunidades bentónicas.

14.16 GESTIÓN DEL CONCENTRADO EN PLANTAS CONTINENTALES

La situación cambia cuando la planta no se encuentra cerca del mar.

En una planta BWRO continental pueden considerarse:

- descarga superficial;

- descarga a alcantarillado;
- inyección profunda;
- lagunas de evaporación;
- concentración adicional;
- cristalización;
- MLD;
- ZLD.

En estos casos, aumentar la recuperación puede tener un beneficio importante porque disminuye el volumen de concentrado.

Por ejemplo:

$$Y = 50\ \%$$

implica:

$$Qc = 0.50\ Qf$$

Mientras:

$$Y = 90\ \%$$

implica:

$$Qc = 0.10\ Qf$$

Pero el beneficio volumétrico se obtiene a costa de aumentar considerablemente la concentración de sales.

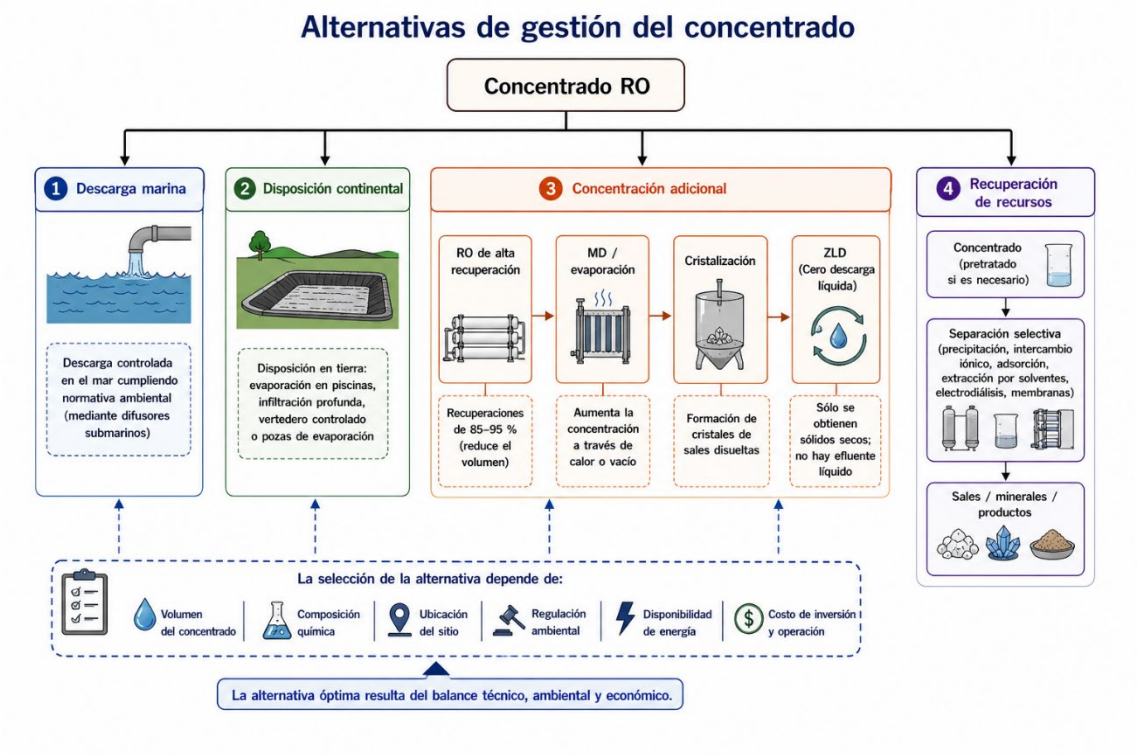
Por ello:

Mayor recuperación → menor volumen → mayor concentración

14.17 ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DEL CONCENTRADO

Figura 14.3

Alternativas de gestión del concentrado



Nota. Elaboración propia con base en Mickley (2009), Voutchkov (2013) y Panagopoulos et al. (2020).

Descripción para elaborar la figura:

Diagrama de decisión que comience con "Concentrado RO". Desde allí deben aparecer cuatro grandes rutas:

1. descarga marina;
2. disposición continental;
3. concentración adicional;
4. recuperación de recursos.

La ruta de concentración adicional debe dividirse en:

RO de alta recuperación → MD/evaporación → cristalización → ZLD

La ruta de recuperación debe dividirse en:

Concentrado → separación selectiva → sales/minerales/productos

El diagrama debe indicar que la selección depende de volumen, composición, ubicación, regulación, energía y costo.

La selección de alternativas de gestión depende de factores técnicos, ambientales, regulatorios y económicos.

14.18 MINIMAL LIQUID DISCHARGE

El concepto de Minimal Liquid Discharge, MLD, busca reducir sustancialmente la corriente líquida de rechazo sin necesariamente llegar a una descarga líquida nula.

La ventaja principal es que puede reducir:

- consumo energético;
- CAPEX;
- OPEX;
- complejidad del sistema

respecto de un sistema ZLD completo.

Panagopoulos y Haralambous comparan MLD y ZLD y señalan que MLD puede alcanzar recuperaciones de agua elevadas con menores requerimientos energéticos que ZLD. En el caso analizado por los autores, la recuperación total fue 84.6 % para MLD y 98.15 % para ZLD, mientras que los consumos energéticos fueron 5.4 y 10.43 kWh/m3, respectivamente. Estos valores corresponden a su caso de estudio y no deben interpretarse como valores universales.

Esto permite introducir una idea importante:

La mejor solución ambiental no necesariamente es ZLD.

Debe evaluarse la relación:

Beneficio ambiental / energía / costo / recuperación

14.19 ZERO LIQUID DISCHARGE

ZLD significa Zero Liquid Discharge.

El objetivo conceptual es:

Agua de alimentación → tratamiento → recuperación máxima de agua + sólido

Un sistema ZLD apunta a reducir al mínimo, o eliminar, la corriente líquida que se descarga.

Un esquema conceptual puede ser:

RO → concentración avanzada → evaporación → cristalización → sólidos

Las tecnologías que pueden participar son:

- RO de alta recuperación;

- HPRO;
- FO;
- ED/EDR;
- MD;
- evaporación;
- cristalización;
- eutectic freeze crystallization;
- otras tecnologías de concentración.

Panagopoulos et al. señalan que los sistemas ZLD pueden recuperar prácticamente toda el agua y generar sales sólidas, aunque a costa de mayores requerimientos energéticos y económicos.

14.20 ESQUEMA GENERAL DE UN SISTEMA ZLD

Un sistema conceptual puede expresarse como:

Alimentación

↓

Pretratamiento

↓

RO

↓

Permeado reutilizable

↓

Concentrado

↓

Concentración adicional

↓

Evaporación

↓

Cristalización

↓

Agua recuperada + sólidos

El objetivo no es necesariamente utilizar todas estas operaciones.

La configuración debe determinarse mediante balances de masa y energía.

14.21 BALANCE DE MASA SIMPLIFICADO PARA ZLD

Supongamos:

$$Qf = 100 \text{ m3/d}$$

$$YRO = 80 \%$$

Entonces:

Qp, RO = 80 m3/d

Qc, RO = 20 m3/d

Si una etapa posterior recupera 90 % del agua del concentrado:

Qagua, post = 0.90 x 20

Qagua, post = 18 m3/d

El agua total recuperada será:

Qagua, total = 80 + 18

Qagua, total = 98 m3/d

La recuperación global será:

Yglobal = 98 / 100

Yglobal = 98 %

La corriente final líquida sería:

Qfinal = 20 - 18

Qfinal = 2 m3/d

Todavía existe descarga líquida.

Para alcanzar ZLD debe tratarse esta corriente final hasta obtener esencialmente una corriente sólida o una condición compatible con el objetivo de descarga establecido.

14.22 RECUPERACIÓN DE SALES

El concentrado no debe considerarse necesariamente como un residuo sin valor.

Puede contener:

- NaCl;
- CaSO4;
- Mg;
- Ca;
- K;
- Li;
- B;
- otros elementos.

Sin embargo, "tener una sustancia presente" no significa automáticamente que sea económicamente recuperable.

Para evaluar una recuperación de recursos deben analizarse:

1. concentración;
2. selectividad;
3. pureza;
4. recuperación;
5. costo del proceso;
6. mercado;
7. disposición de residuos secundarios.

El concepto puede expresarse:

Valor del producto recuperado > costo adicional de recuperación

14.23 BRINE MINING

El concepto de "brine mining" consiste en transformar el concentrado en una fuente potencial de recursos.

El esquema general es:

Concentrado

↓

Concentración

↓

Separación selectiva

↓

Purificación

↓

Producto comercial

Entre los recursos potencialmente estudiados se encuentran:

- NaCl;
- Mg;
- Ca;
- K;
- Li;
- otros elementos traza.

No obstante, que sea viable depende mucho de la composición propia de la salmuera.

No debe presentarse la recuperación de litio, por ejemplo, como una consecuencia automática de disponer de una salmuera.

La concentración debe ser suficiente y la separación debe ser técnica y económicamente viable.

14.24 INTEGRACIÓN RO-MD

La destilación por membranas puede utilizarse como etapa posterior a RO para tratar corrientes con salinidad elevada.

El esquema conceptual es:

RO → concentrado → MD → agua adicional + concentrado más concentrado

Una ventaja de MD es que puede operar utilizando una fuente térmica de baja calidad relativa.

Por ello puede integrarse con:

- calor residual;

- energía solar térmica;
- geotermia;
- procesos industriales.

La integración debe analizarse mediante:

- balance de masa;
- balance de energía;
- disponibilidad de calor;
- temperatura;
- flux;
- ensuciamiento;
- consumo eléctrico.

14.25 INTEGRACIÓN ENERGÉTICA

Una planta avanzada puede integrar diferentes formas de energía:

Energía eléctrica → bombas

Energía hidráulica → ERD

Calor residual → MD/evaporación

Energía solar → generación eléctrica o térmica

La meta debe ser menor consumo de energía primaria y menor huella ambiental.

Pero debe evitarse una conclusión simplista como:

"Energía renovable = planta de costo cero".

Las instalaciones renovables requieren:

- CAPEX;
- espacio;
- almacenamiento cuando sea necesario;
- mantenimiento;
- equipos de conversión;
- respaldo.

Por ello debe realizarse un análisis técnico-económico.

14.26 ENERGÍA SOLAR Y DESALINIZACIÓN

La energía solar puede utilizarse de dos maneras principales:

Solar fotovoltaica

Produce electricidad para:

bombas;

ERD;

instrumentación;

sistemas auxiliares.

Solar térmica

Produce calor para:

- MD;
- evaporación;
- otros procesos térmicos.

La selección depende de la tecnología de desalinización.

Para SWRO, la integración fotovoltaica resulta conceptualmente directa:

Sol → electricidad → bomba → RO

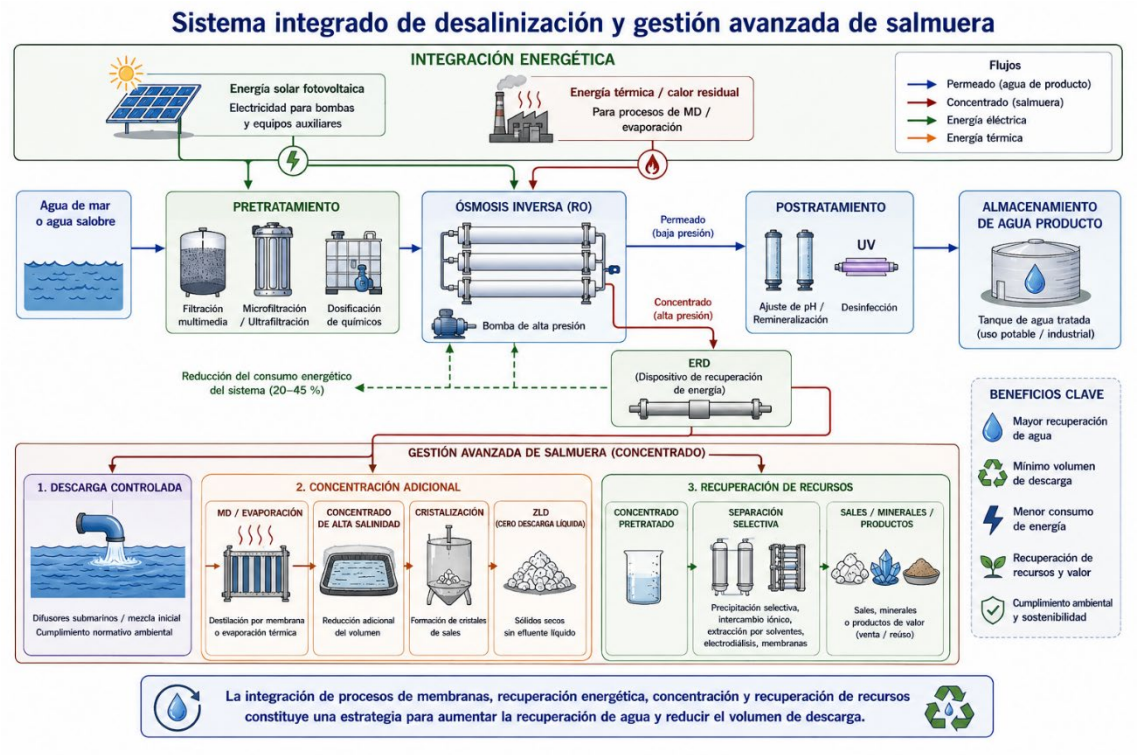
Para MD:

Sol → calor → alimentación caliente → MD

14.27 SISTEMA INTEGRADO DE DESALINIZACIÓN Y GESTIÓN AVANZADA DE SALMUERA

Figura 14.4

Sistema integrado de desalinización y gestión avanzada de salmuera



Nota. Elaboración propia con base en Voutchkov (2013), Mickley (2009) y Panagopoulos et al. (2020).

Combinar procesos de membranas, recuperación de energía, concentración y recuperación de recursos es una estrategia para elevar la recuperación de agua y disminuir el volumen que se descarga.

14.28 COMPARACIÓN ENTRE DESCARGA, MLD Y ZLD

La decisión puede resumirse:

Alternativa	Recuperación de agua	Energía	Complejidad	Residuo final
Descarga directa	Baja-media	Baja	Baja	Concentrado líquido
Descarga controlada	Baja-media	Baja-media	Media	Concentrado
MLD	Alta	Media	Media-alta	Pequeño rechazo líquido
ZLD	Muy alta	Alta	Alta	Sólidos

Esta tabla es conceptual.

Los valores reales dependen de:

- alimentación;
- recuperación;
- tecnología;
- composición;
- temperatura;

- energía disponible;
- requerimientos ambientales.

14.29 CRITERIO DE SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE GESTIÓN

La alternativa puede evaluarse mediante una matriz de decisión.

Criterios:

- CAPEX;
- OPEX;
- consumo energético;
- recuperación;
- impacto ambiental;
- disponibilidad de terreno;
- confiabilidad;
- complejidad;
- valor de productos recuperados;
- restricciones regulatorias.

Una formulación sencilla puede ser:

Puntaje total = Σ (Wi x Si)

donde:

Wi = peso del criterio

Si = puntuación de la alternativa

con:

Σ Wi = 1

Este procedimiento permite comparar objetivamente:

Alternativa A: descarga marina

Alternativa B: MLD

Alternativa C: ZLD

Alternativa D: recuperación de recursos

14.30 EJEMPLO DE SELECCIÓN

Supongamos que se comparan tres alternativas:

A = descarga controlada

B = MLD

C = ZLD

Se asignan pesos:

Costo = 0.30

Energía = 0.20

Impacto ambiental = 0.30

Recuperación = 0.20

Cada alternativa recibe una puntuación de 1 a 5.

El estudiante puede calcular:

Puntaje A = 0.30 x CA + 0.20 x EA + 0.30 x IA + 0.20 x RA

y realizar el mismo cálculo para B y C.

El resultado no sustituye el diseño de ingeniería, pero ayuda a estructurar la decisión.

14.31 CASO DE ESTUDIO: SWRO

Considérese una planta:

Qf = 100 000 m3/d

Cf = 35 000 mg/L

Y = 45 %

Paso 1. Permeado

Qp = 0.45 x 100 000

Qp = 45 000 m3/d

Paso 2. Concentrado

Qc = 100 000 - 45 000

Qc = 55 000 m3/d

Paso 3. Factor de concentración

FC = 1 / (1 - 0.45)

FC = 1.82

Paso 4. Concentración aproximada

$$Cc = 35\,000 \times 1.82$$

$Cc \approx 63\,600$ mg/L

Paso 5. Interpretación

La planta produce:

45 000 m3/d de permeado

pero genera:

55 000 m3/d de concentrado

con una salinidad aproximada de:

63 600 mg/L

Por eso, el manejo de la salmuera forma parte esencial del diseño.

14.32 CASO DE AUMENTO DE RECUPERACIÓN

Ahora supongamos que se desea aumentar:

$$Y = 45\ \%$$

a:

$$Y = 60\ \%$$

Entonces:

$$Qp = 60\,000 \text{ m3/d}$$

$$Qc = 40\,000 \text{ m3/d}$$

El factor de concentración será:

$$FC = 1 / (1 - 0.60)$$

$$FC = 2.5$$

La concentración aproximada será:

$$Cc = 35\,000 \times 2.5$$

$$Cc = 87\,500 \text{ mg/L}$$

Se obtiene más agua, pero el concentrado aumenta desde aproximadamente:

63 600 mg/L

hasta:

87 500 mg/L

Por ello, la decisión de subir la recuperación también debe evaluarse desde la perspectiva de:

- scaling;
- presión;
- energía;
- membranas;
- gestión del concentrado.

14.33 CASO DE ALTA RECUPERACIÓN

Si:

$$Y = 80\ \%$$

entonces:

$$FC = 1 / (1 - 0.80)$$

$$FC = 5$$

Por tanto:

$Cc \approx 35\ 000 \times 5$

$Cc \approx 175\ 000$ mg/L

En este punto ya no puede tratarse la corriente como un concentrado convencional de SWRO.

La composición química, la precipitación y las propiedades físicas pasan a ser mucho más importantes.

Esto justifica la incorporación de:

- concentración avanzada;
- MD;
- evaporación;
- cristalización;
- recuperación selectiva.

14.34 PROBLEMAS DE INCRUSTACIÓN EN SALMUERAS CONCENTRADAS

Cuando aumenta la recuperación aumenta la concentración de las especies.

Para una reacción de precipitación:

IP > Ksp

indica una condición termodinámicamente favorable para precipitación.

Sin embargo:

IP > Ksp

no significa necesariamente que la precipitación ocurra instantáneamente.

La velocidad depende de:

- sobresaturación;
- temperatura;
- nucleación;
- superficie disponible;
- tiempo de residencia;
- composición;
- inhibidores.

Por ello, el análisis de scaling debe combinar termodinámica y cinética.

14.35 CONCENTRACIÓN Y CRISTALIZACIÓN

Si se sigue quitando agua a una salmuera, en algún momento ciertas especies pueden llegar a la sobresaturación.

El proceso conceptual es:

Concentración ↑

↓

Saturación

↓

Sobresaturación

↓

Nucleación

↓

Crecimiento cristalino

↓

Cristales

La cristalización puede ser:

- un problema que debe evitarse;
- o un objetivo del proceso.

En RO convencional, lo deseable es que no se forme precipitado en la membrana.

En ZLD se puede buscar deliberadamente la precipitación en un cristalizador controlado.

Esta diferencia es fundamental.

14.36 ASPECTOS AMBIENTALES DE LA SALMUERA

La salmuera puede contener:

- alta concentración de sales;
- productos químicos de pretratamiento;
- antiincrustantes;
- trazas de metales;
- otros componentes específicos del agua de alimentación.

Por ello, el impacto ambiental no debe evaluarse solamente mediante TDS.

Debe analizarse:

- salinidad;
- temperatura;
- composición química;
- volumen;
- toxicidad;
- densidad;
- dispersión;
- sensibilidad del ecosistema.

La National Academies advierte que algunos concentrados de aguas subterráneas salobres pueden contener elementos traza potencialmente problemáticos y que su descarga debe evaluarse según la composición específica de la fuente.

14.37 DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA AVANZADA

Un procedimiento de diseño puede organizarse en:

Paso 1

Caracterizar el agua.

Paso 2

Definir producción.

Paso 3

Seleccionar BWRO o SWRO.

Paso 4

Definir recuperación inicial.

Paso 5

Realizar balance hidráulico.

Paso 6

Realizar balance de sales.

Paso 7

Evaluar scaling.

Paso 8

Seleccionar sistema ERD.

Paso 9

Calcular energía.

Paso 10

Determinar caudal y composición del concentrado.

Paso 11

Seleccionar alternativa de gestión.

Paso 12

Evaluar MLD/ZLD cuando corresponda.

Paso 13

Evaluar recuperación de recursos.

Paso 14

Comparar CAPEX y OPEX.

Paso 15

Realizar análisis ambiental.

Paso 16

Seleccionar la alternativa óptima.

Este procedimiento se enlaza de modo directo con el diseño integral que se tratará en el Capítulo 15.

14.38 INTEGRACIÓN CON LOS CAPÍTULOS ANTERIORES

Este capítulo no debe repetir los fundamentos de membranas ya estudiados.

Su función es integrar:

Caracterización

↓

RO

↓

Recuperación

↓

Energía

↓

Concentrado

↓

Gestión

↓

Recuperación de recursos

La secuencia permite pasar de:

"desalinizar agua"

a:

"diseñar un sistema completo de gestión de agua, energía y sales".

14.39 APLICACIÓN PARA PROFESIONALES

Un profesional que reciba un proyecto de desalinización debería ser capaz de solicitar como mínimo:

Información de alimentación

- caudal;
- TDS;
- composición iónica;
- temperatura;
- pH;
- SDI;
- turbidez;
- sílice;
- alcalinidad;
- dureza.

Información de producción

- caudal requerido;
- calidad requerida;
- disponibilidad anual;
- variabilidad de demanda.

Información energética

- costo eléctrico;
- disponibilidad de energía;
- calor residual;
- potencial solar.

Información del concentrado

- caudal;
- composición;
- temperatura;
- ubicación de descarga;
- restricciones ambientales.

Información económica

- CAPEX;
- OPEX;
- costo energético;
- costo de membranas;
- costo de disposición.

Sin estos datos, el diseño solamente puede considerarse preliminar.

14.40 PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 14.1

Una planta BWRO recibe:

$$Qf = 5000 \text{ m3/d}$$

y opera con:

$$Y = 70 \%$$

Calcular:

a) permeado

b) concentrado

c) factor de concentración

Solución:

$$Qp = 0.70 \times 5000$$

$$Qp = 3500 \text{ m3/d}$$

$$Qc = 5000 - 3500$$

$$Qc = 1500 \text{ m3/d}$$

$$FC = 1 / (1 - 0.70)$$

$$FC = 3.33$$

Problema 14.2

Una planta SWRO recibe agua con:

$$Cf = 38\ 000\ mg/L$$

y opera a:

$$Y = 45\ \%$$

Estimar la concentración del concentrado.

Solución:

$$FC = 1 / (1 - 0.45)$$

$$FC = 1.82$$

$Cc \approx 38\ 000 \times 1.82$

$Cc \approx 69\ 100\ mg/L$

Problema 14.3

Una planta produce:

$$Vp = 50\ 000\ m3/d$$

y consume:

$$E = 150\ 000\ kWh/d$$

Calcular:

$$SEC = E / Vp$$

$$SEC = 150\ 000 / 50\ 000$$

$$SEC = 3.0\ kWh/m3$$

Problema 14.4

Una planta tiene:

$$Qf = 100\ 000\ m3/d$$

$$Y = 50\ \%$$

Se propone aumentar la recuperación a 80 %.

Calcular el cambio en el caudal de concentrado.

Para 50 %:

$$Qc = 50\ 000\ m3/d$$

Para 80 %:

$$Qc = 20\ 000\ m3/d$$

Reducción:

50 000 - 20 000 = 30 000 m3/d

Pero debe calcularse simultáneamente el incremento de concentración y evaluar el riesgo de scaling.

14.41 PREGUNTAS DE DISCUSIÓN

Pregunta 1

¿Por qué una planta SWRO requiere más presión que una BWRO?

Respuesta:

Porque la presión osmótica de una alimentación marina es considerablemente mayor.

Pregunta 2

¿Por qué aumentar la recuperación reduce el volumen de concentrado?

Respuesta:

Porque una fracción mayor del agua de alimentación termina como permeado.

Pregunta 3

¿Por qué aumentar recuperación puede ser problemático?

Respuesta:

Porque las especies se concentran más en el concentrado, con mayor riesgo de precipitación, y además se alteran la presión y la energía necesarias.

Pregunta 4

¿Por qué son importantes los ERD?

Respuesta:

Porque el concentrado sale presurizado y esos equipos recuperan una fracción de esa energía hidráulica.

Pregunta 5

¿ZLD es siempre la mejor alternativa?

Respuesta:

No. Debe compararse técnicamente, ambientalmente y económicamente con otras alternativas.

Pregunta 6

¿Cuál es la diferencia fundamental entre MLD y ZLD?

Respuesta:

MLD busca reducir significativamente la descarga líquida, mientras ZLD busca eliminar prácticamente la descarga líquida y producir principalmente sólidos.

Pregunta 7

¿Por qué la salmuera puede considerarse un recurso?

Respuesta:

Porque contiene sales y otros componentes que potencialmente pueden recuperarse si su concentración, selectividad y valor económico justifican el proceso.

Pregunta 8

¿Por qué no debe suponerse automáticamente que una salmuera es económicamente aprovechable?

Respuesta:

Porque la recuperación requiere procesos de separación y purificación cuyo costo puede superar el valor del producto.

14.42 PROYECTO APLICATIVO

Se propone al estudiante analizar una planta desalinizadora de:

$$Qf = 50\ 000\ m3/d$$

con:

$$Cf = 40\ 000\ mg/L$$

Debe comparar tres escenarios.

Escenario A

RO con:

$$Y = 45\ \%$$

Escenario B

RO con:

Y = 60 %

Escenario C

RO + concentración avanzada con:

Yglobal = 85 %

Para cada escenario debe calcular:

- caudal de permeado;
- caudal de concentrado;
- factor de concentración;
- concentración aproximada;
- energía;
- SEC;
- estrategia de gestión.

Posteriormente debe determinar:

¿Cuál produce más agua?

¿Cuál produce menos concentrado?

¿Cuál genera la mayor concentración?

¿Cuál presenta mayor riesgo de scaling?

¿Cuál requiere mayor energía?

¿Cuál sería técnicamente más apropiado para una planta costera?

¿Cuál podría ser más apropiado para una planta continental?

14.43 INTEGRACIÓN CON EL PROYECTO INTEGRADOR

El estudiante deberá incorporar al proyecto:

1. Caracterización del agua.
2. Selección BWRO o SWRO.
3. Recuperación seleccionada.
4. Balance de agua.
5. Balance de sales.
6. Concentración del concentrado.

7. Evaluación energética.
8. Selección del ERD.
9. Alternativa de gestión de concentrado.
10. Evaluación MLD/ZLD cuando corresponda.
11. Evaluación de recuperación de recursos.
12. Análisis ambiental.
13. Conclusión técnico-económica.

14.44 CONCLUSIONES

La desalinización avanzada debe analizarse como un sistema integrado de:

agua + energía + sales + ambiente + economía.

La recuperación está entre las variables de mayor peso, pues regula al mismo tiempo:

producción de agua;

caudal de concentrado;

concentración de sales;

riesgo de incrustación;

consumo energético;

costos.

El balance fundamental es:

$$Qf = Qp + Qc$$

y la recuperación:

$$Y = Qp / Qf$$

La concentración aproximada del concentrado puede estimarse mediante:

$Cc \approx Cf / (1 - Y)$

cuando se cumplen las condiciones simplificadoras correspondientes.

El aumento de recuperación reduce el volumen de concentrado pero incrementa fuertemente su concentración.

En las plantas SWRO actuales, la recuperación de energía es una parte esencial.

El concentrado lleva energía hidráulica, y los ERD la reaprovechan para reducir la electricidad neta que demanda la planta.

Conviene pensar en el concentrado desde que se empieza a diseñar, en lugar de tratarlo luego como un problema aparte.

Las alternativas incluyen:

- descarga marina;
- disposición continental;
- inyección;
- evaporación;
- MLD;
- ZLD;
- recuperación de recursos.

MLD puede constituir una alternativa intermedia entre una descarga convencional y ZLD cuando se busca reducir la descarga sin asumir necesariamente los costos energéticos y económicos de una descarga líquida cero. El análisis de Panagopoulos et al. ilustra claramente este compromiso entre recuperación, energía y complejidad.

Finalmente, el concepto de desalinización está evolucionando desde:

"producir agua"

hacia:

"maximizar la recuperación de agua, minimizar energía y residuos y, cuando sea viable, recuperar recursos".

De esta transición se pasa sin más al diseño integral de plantas, tema del capítulo siguiente.

CAPÍTULO 15

OPERACIÓN, CONTROL, MONITOREO, DIAGNÓSTICO Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE MEMBRANAS

15.1 INTRODUCCIÓN

Dimensionar bien una planta de membranas es solo una parte del trabajo de ingeniería. Una instalación bien calculada igual puede sufrir en su producción, en la calidad del permeado, en el gasto de energía o en la duración de las membranas, si se opera o mantiene mal.

En una planta real las condiciones de operación no permanecen constantes. La temperatura del agua cambia, la composición de la alimentación puede variar, el caudal requerido puede aumentar o disminuir, pueden producirse modificaciones en el pH, turbidez, SDI, dureza, sílice y materia orgánica, y las membranas pueden experimentar progresivamente ensuciamiento, incrustación, compactación o deterioro químico.

De ahí que la ingeniería de membranas no concluya al fijar el número de elementos y la presión de trabajo. Se requiere un sistema para medir el desempeño de la planta, detectar los desvíos frente a las condiciones de referencia y aplicar correcciones.

DuPont Water Solutions plantea en su manual que, para evitar ensuciamiento, incrustaciones, obstrucciones y deterioro de las membranas, importan tanto el diseño como la puesta en marcha y la operación bien hechas. Recomienda además llevar registros completos y normalizar los datos de operación, de modo que se conozca el rendimiento verdadero de la planta.

Por ello, la operación puede entenderse mediante la siguiente secuencia:

Medición → registro → normalización → diagnóstico → acción correctiva → verificación

Quien opere con criterio profesional una planta OI o NF encontrará su base en esta secuencia.

El objetivo de este capítulo es que el estudiante no solamente sepa calcular el desempeño de una planta, sino que pueda interpretar los datos de operación y responder preguntas de ingeniería como:

- ¿La planta está produciendo lo que debería?
- ¿La caída del permeado viene de una temperatura más baja o del ensuciamiento?
- ¿La presión de operación está aumentando innecesariamente?
- ¿Existe evidencia de incrustación?
- ¿La membrana está perdiendo capacidad de rechazo?
- ¿Cuándo debe realizarse una limpieza?
- ¿La limpieza fue efectiva?
- ¿Debe modificarse la recuperación?
- ¿Existe un problema de instrumentación?
- ¿El consumo energético es razonable?

15.2 OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

1. Saber cuáles son las variables principales de operación en plantas de OI/NF.
2. Realizar balances de masa de agua y sales durante la operación.
3. Calcular recuperación, rechazo, flux y consumo específico de energía.
4. Interpretar las principales variables de presión, caudal, temperatura y calidad.
5. Explicar el concepto de normalización del desempeño.
6. Recurrir al flujo normalizado, al paso de sales y a la presión diferencial para saber en qué condición están las membranas.
7. Diagnosticar preliminarmente problemas de ensuciamiento, incrustación y pérdida de rechazo.
8. Establecer criterios técnicos para la limpieza química.
9. Explicar los procedimientos básicos de puesta en marcha y parada.
10. Diseñar un esquema básico de monitoreo e instrumentación.
11. Interpretar tendencias históricas de operación.

12. Proponer estrategias de mantenimiento preventivo y basado en condición.
13. Calcular indicadores de desempeño de una planta.
14. Relacionar los datos de operación con los modelos desarrollados mediante simulación.
15. Formular estrategias básicas de optimización operacional.

15.3 LA OPERACIÓN COMO CONTINUACIÓN DEL DISEÑO

Una planta de OI puede haber sido diseñada para una determinada condición de alimentación, por ejemplo:

Cf = 35 000 mg/L de TDS

T = 25 °C

Y = 45 %

P = 60 bar

Sin embargo, durante la operación real pueden presentarse:

Cf = 38 000 mg/L

T = 18 °C

Y = 42 %

P = 64 bar

En consecuencia, el desempeño real no coincidirá con el calculado para las condiciones de diseño.

El operador debe distinguir entre dos situaciones:

1. Cambio normal debido a las condiciones de alimentación.
2. Cambio producido por deterioro de la planta.

Esta distinción es fundamental.

Un caso típico: el flujo de permeado baja solo porque se enfrió el agua. Si se corrige por temperatura y el flujo sigue cayendo, entonces sí hay un cambio real en la membrana.

El manual de DuPont recomienda utilizar el desempeño inicial como referencia y comparar posteriormente el comportamiento de la planta con dicha condición de referencia.

15.4 VARIABLES FUNDAMENTALES DE OPERACIÓN

Las principales variables que deben medirse pueden agruparse en seis categorías.

Variables hidráulicas

Caudal de alimentación, Qf

Caudal de permeado, Qp

Caudal de concentrado, Qc

Variables de presión

Presión de alimentación, Pf

Presión de concentrado, Pc

Presión de permeado, Pp

Presión diferencial, ΔP

Variables de calidad

Conductividad

TDS

pH

Turbidez

SDI

Temperatura

Dureza

Alcalinidad

Sílice

Hierro

Materia orgánica

Cloro libre

ORP

Variables de desempeño

Recuperación

Rechazo de sales

Flux

Flujo normalizado

Paso de sales normalizado

Presión diferencial

Variables energéticas

Potencia de las bombas

Energía consumida

Consumo específico de energía

Variables de equipos

Estado de bombas

Vibración

Temperatura

Corriente eléctrica

Estado de válvulas

Alarmas

El manual de DuPont recomienda registrar, entre otras variables, temperatura, pH, conductividad, SDI, ORP, presiones y caudales, y disponer de alarmas relacionadas con conductividad, pH, dureza y temperatura.

15.5 BALANCE HIDRÁULICO

La primera comprobación operacional debe ser el balance de agua.

Para una planta de OI:

$$Qf = Qp + Qc$$

donde:

Qf = caudal de alimentación

Qp = caudal de permeado

Qc = caudal de concentrado

La recuperación de la planta se calcula mediante:

$$Y = Qp / Qf$$

Si se desea expresar como porcentaje:

$$Y(\%) = (Qp / Qf) \times 100$$

Ejemplo 15.1

Una planta recibe:

$$Qf = 1000 \text{ m3/d}$$

y produce:

$$Qp = 400 \text{ m3/d}$$

La recuperación es:

$$Y = 400 / 1000$$

$$Y = 0.40$$

Por tanto:

$$Y = 40 \%$$

El concentrado será:

$$Qc = Qf - Qp$$

$$Qc = 1000 - 400$$

$$Qc = 600 \text{ m3/d}$$

Con este cálculo sencillo se tiene una de las primeras formas de comprobar que los datos de operación sean consistentes.

Si un sistema registra:

$$Qf = 1000 \text{ m3/d}$$

$$Qp = 450 \text{ m3/d}$$

$$Qc = 400 \text{ m3/d}$$

entonces:

$$Qp + Qc = 850 \text{ m3/d}$$

Como:

$$850 \neq 1000$$

existe una diferencia de 150 m3/d que debe investigarse.

Las posibles causas incluyen:

- error de medición;
- recirculación;
- derivación;

- fuga;
- flujo no medido;
- error en el sistema de adquisición de datos.

15.6 BALANCE DE SALES

Para una especie disuelta que puede considerarse conservativa:

$$Qf \times Cf = Qp \times Cp + Qc \times Cc$$

donde:

Cf = concentración en la alimentación

Cp = concentración en el permeado

Cc = concentración en el concentrado

El balance permite comprobar si las concentraciones medidas son físicamente consistentes.

El rechazo aparente se calcula como:

$$R(\%) = [1 - (Cp / Cf)] \times 100$$

Ejemplo 15.2

Si:

$$Cf = 500 \text{ mg/L}$$

$$Cp = 10 \text{ mg/L}$$

entonces:

$$R (\%) = [1 - (10 / 500)] \times 100$$

$$R (\%) = 98 \%$$

Por tanto, el rechazo aparente es 98 %.

Debe tenerse presente que la conductividad es una variable operacional muy útil, pero no equivale exactamente al TDS. Cuando se necesita conocer la composición química del agua, debe realizarse el análisis correspondiente.

15.7 FLUX DE LA MEMBRANA

Se define el flux como el caudal de permeado dividido por el área de membrana.

$$J = Qp / Am$$

donde:

J = flux

Qp = caudal de permeado

Am = área efectiva de membrana

Si Qp se expresa en L/h y Am en m2:

J se expresa en L/(m2 h)

Tanto al diseñar como al operar, conviene tener muy presente el flux.

Sin embargo, el operador debe tener cuidado al interpretar un cambio de flux.

Una disminución del flux puede deberse a:

- disminución de temperatura;
- aumento de concentración;
- aumento de presión osmótica;
- disminución de presión;
- ensuciamiento;
- incrustación;
- compactación;
- deterioro de la membrana.

Por esta razón se utiliza la normalización.

15.8 NORMALIZACIÓN DEL DESEMPEÑO

La normalización consiste en convertir los datos observados durante la operación a unas condiciones de referencia.

Su finalidad es responder a la pregunta:

¿La membrana realmente está perdiendo desempeño o simplemente están cambiando las condiciones de operación?

El manual de DuPont explica que la normalización permite comparar el rendimiento real con un rendimiento de referencia considerando los efectos de las condiciones operacionales. También indica que es recomendable registrar diariamente el desempeño normalizado para detectar tempranamente incrustaciones y ensuciamiento.

Las variables más importantes son:

- flujo de permeado normalizado;

- paso de sales normalizado;
- presión diferencial.

15.9 EFECTO DE LA TEMPERATURA

La temperatura influye con fuerza en el flujo de agua que atraviesa la membrana.

En general:

T ↑ → viscosidad ↓ → permeabilidad ↑ → Qp ↑

Por el contrario:

T ↓ → viscosidad ↑ → permeabilidad ↓ → Qp ↓

Por ello, comparar directamente el caudal de permeado de dos días con diferentes temperaturas puede llevar a conclusiones equivocadas.

DuPont proporciona factores de corrección de temperatura para normalizar el desempeño de sus elementos. Para membranas FilmTec, el manual utiliza las siguientes expresiones.

Para $T \geq 25$ °C:

$$TCF = EXP[2640 \times (1/298 - 1/(273 + T))]$$

Para $T \leq 25$ °C:

$$TCF = EXP[3020 \times (1/298 - 1/(273 + T))]$$

donde:

TCF = factor de corrección de temperatura

T = temperatura en °C

Para este libro es importante que el estudiante entienda el significado físico antes de utilizar la ecuación.

La finalidad del TCF no es introducir una nueva variable matemática, sino corregir el efecto de la temperatura para poder comparar adecuadamente el desempeño.

15.10 FLUJO NORMALIZADO

Se normaliza el flujo relacionando el valor medido con la presión efectiva, la temperatura y la presión osmótica.

De manera conceptual:

Flujo normalizado = función de Qp, ΔP, $\Delta\pi$ y T

donde:

Qp = caudal de permeado

ΔP = diferencia de presión hidráulica

Δπ = diferencia de presión osmótica

T = temperatura

En una aplicación industrial debe utilizarse la ecuación y metodología correspondiente al fabricante de la membrana. No es recomendable combinar indiscriminadamente ecuaciones provenientes de distintos fabricantes.

El manual de DuPont proporciona las ecuaciones específicas para normalización y define las variables utilizadas, incluyendo presión de alimentación, caída de presión, presión del permeado, presión osmótica y factor de corrección de temperatura.

15.11 PASO DE SALES NORMALIZADO

El segundo indicador fundamental es el paso de sales.

De manera básica:

SP(%) = (Cp / Cf) x 100

donde:

SP = paso de sales

Cp = concentración del permeado

Cf = concentración de la alimentación

El rechazo y el paso de sales están relacionados:

R(%) = 100 - SP(%)

siempre que ambas concentraciones sean comparables y se utilice la misma base.

Un aumento del paso de sales puede indicar:

- deterioro de la membrana;
- daño químico;
- oxidación;
- defectos;
- problemas de sellado;
- daño mecánico;
- problemas en juntas tóricas;

- pérdida de integridad de un elemento.

15.12 PRESIÓN DIFERENCIAL

Como aproximación, el cálculo de la presión diferencial en el lado de la alimentación sería:

$$\Delta P = Pf - Pc$$

donde:

Pf = presión de alimentación

Pc = presión de concentrado

Cuando el sistema cuenta con buena instrumentación, ΔP ayuda mucho a valorar su condición hidráulica.

Un aumento progresivo de ΔP puede asociarse con:

- acumulación de sólidos;
- fouling;
- biofouling;
- scaling;
- obstrucción;
- reducción del área hidráulica disponible.

Por ello, la interpretación debe realizarse conjuntamente con NPF y NSP.

15.13 LOS TRES INDICADORES FUNDAMENTALES

Para el diagnóstico operacional se propone utilizar conjuntamente:

1. Flujo normalizado.
2. Paso de sales normalizado.
3. Presión diferencial.

La interpretación general puede resumirse de la siguiente manera.

Situación 1

NPF ↓

NSP ≈ constante

ΔP ↑

Interpretación probable:

Ensuciamiento o incrustación.

Situación 2

NPF ≈ constante

NSP ↑↑

ΔP ≈ constante

Interpretación probable:

Pérdida de rechazo, daño de membrana o problema de integridad.

Situación 3

NPF ↓

NSP ↑

ΔP ↑

Interpretación probable:

Deterioro importante que requiere investigación inmediata.

Situación 4

NPF ↓

pero la temperatura también disminuye significativamente.

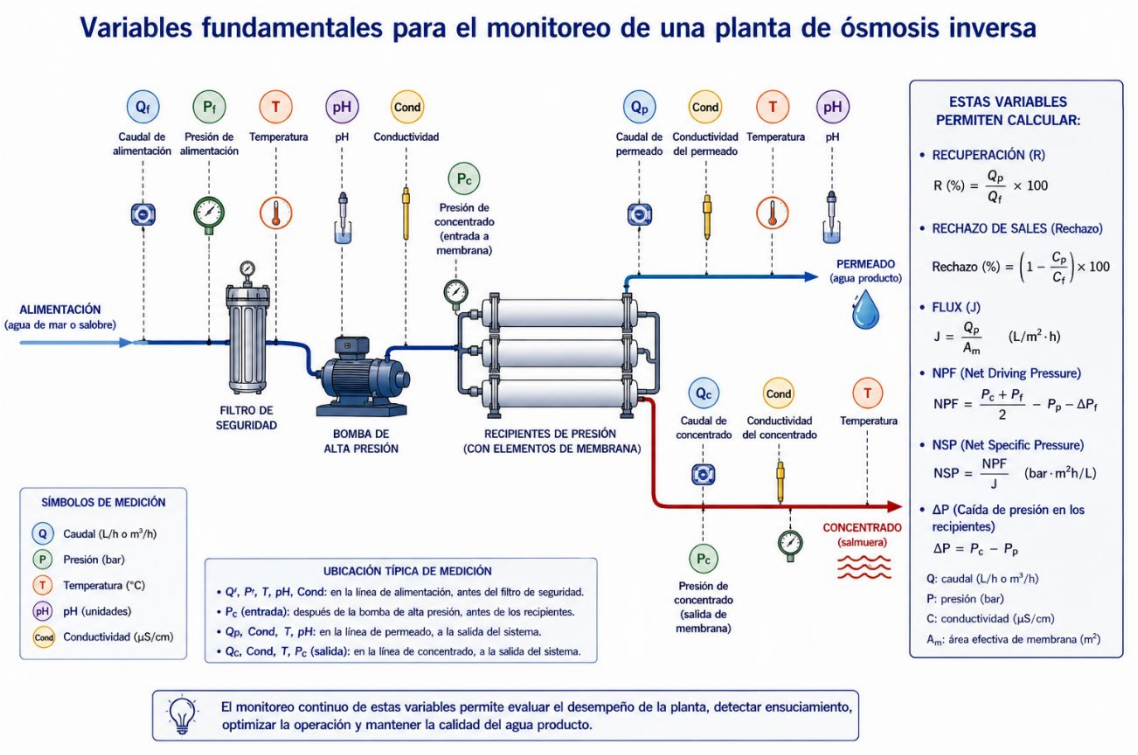
Interpretación:

No puede concluirse todavía que exista fouling. Primero debe normalizarse el desempeño.

15.14 VARIABLES FUNDAMENTALES PARA EL MONITOREO DE UNA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA

Figura 15.1

Variables fundamentales para el monitoreo de una planta de ósmosis inversa



Nota. Elaboración propia a partir de DuPont Water Solutions (2026), *Manual de diseño de ósmosis inversa y nanofiltración*.

Se recomienda registrar de manera sistemática las variables de presión, caudal, temperatura, pH, conductividad y otros parámetros de operación.

15.15 DIAGNÓSTICO MEDIANTE TENDENCIAS

Una planta no debe diagnosticarse únicamente mediante un valor instantáneo.

Es más importante observar:

Valor actual + valor de referencia + tendencia

Por ejemplo:

Día 1:

$$NPF = 100\ \%$$

Día 10:

$$NPF = 98\ \%$$

Día 20:

$$NPF = 95\ \%$$

Día 30:

$$NPF = 90\ \%$$

Existe una disminución progresiva.

Si simultáneamente:

$$\Delta P = 1.8 \rightarrow 2.0 \rightarrow 2.4 \rightarrow 2.8 \text{ bar}$$

existe evidencia adicional de deterioro hidráulico.

En cambio, si:

$$NPF = 100 \rightarrow 85\ \%$$

con un descenso de temperatura de 25 °C a 10 °C, primero se normaliza y recién entonces se concluye si hay fouling.

La tendencia es, por tanto, más importante que una medición aislada.

15.16 ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS

Se llama ensuciamiento o fouling a la acumulación de materiales sobre la membrana o dentro de su estructura, lo que puede reducir el flujo y alterar la presión diferencial.

Puede clasificarse en:

- ensuciamiento particulado;
- ensuciamiento coloidal;
- ensuciamiento orgánico;
- ensuciamiento biológico;
- incrustación mineral;
- ensuciamiento mixto.

Puede originarse en la calidad del agua o en cómo se opera.

Entre los factores que deben investigarse se encuentran:

- turbidez;
- SDI;
- pretratamiento;
- dosificación química;
- recuperación;
- velocidad de flujo;
- condiciones hidráulicas;

- calidad microbiológica.

El manual de DuPont incorpora procedimientos específicos para incrustaciones de sulfato, carbonato, hierro, materia orgánica y ensuciamiento biológico.

15.17 INCRUSTACIÓN

La incrustación se produce cuando una especie disuelta alcanza condiciones que favorecen su precipitación.

El problema puede aumentar cuando:

Y ↑ → concentración en el concentrado ↑ → riesgo de precipitación ↑

Por ello, la recuperación debe establecerse considerando el potencial de incrustación y no solamente la cantidad de permeado deseada.

Una aproximación simplificada para una especie completamente rechazada es:

$$Cc \approx Cf / (1 - Y)$$

donde:

Cc = concentración aproximada en el concentrado

Cf = concentración en la alimentación

Y = recuperación expresada como fracción

Ejemplo 15.3

Si:

$$Cf = 500 \text{ mg/L}$$

$$Y = 0.50$$

entonces:

$$Cc \approx 500 / (1 - 0.50)$$

$$Cc \approx 1000 \text{ mg/L}$$

Si:

$$Y = 0.75$$

entonces:

$$Cc \approx 500 / (1 - 0.75)$$

$$Cc \approx 2000 \text{ mg/L}$$

El ejemplo demuestra por qué aumentar la recuperación puede aumentar considerablemente la concentración en el concentrado.

El manual de DuPont señala que cuando aumenta el potencial de formación de incrustaciones puede ser necesario reducir la conversión del sistema o modificar la estrategia de operación.

15.18 PRETRATAMIENTO Y OPERACIÓN

Una planta de OI no puede analizarse separadamente de su pretratamiento.

Puede expresarse conceptualmente:

Calidad del pretratamiento → condición de alimentación → condición de membrana → desempeño de RO

Un mal pretratamiento puede generar:

- aumento de SDI;
- fouling;
- scaling;
- biofouling;
- pérdida de producción;
- aumento de presión;
- mayor frecuencia de limpieza.

En la puesta en marcha, DuPont pide comprobar que el pretratamiento cumpla las especificaciones antes de arrancar la unidad de membranas.

15.19 INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación debe permitir conocer como mínimo:

¿Cuánto entra?

¿Cuánto permeado se produce?

¿Cuánto concentrado se genera?

¿A qué presión se opera?

¿Qué temperatura tiene el agua?

¿Qué calidad tiene el permeado?

¿Está cambiando el desempeño de la membrana?

Los instrumentos principales son:

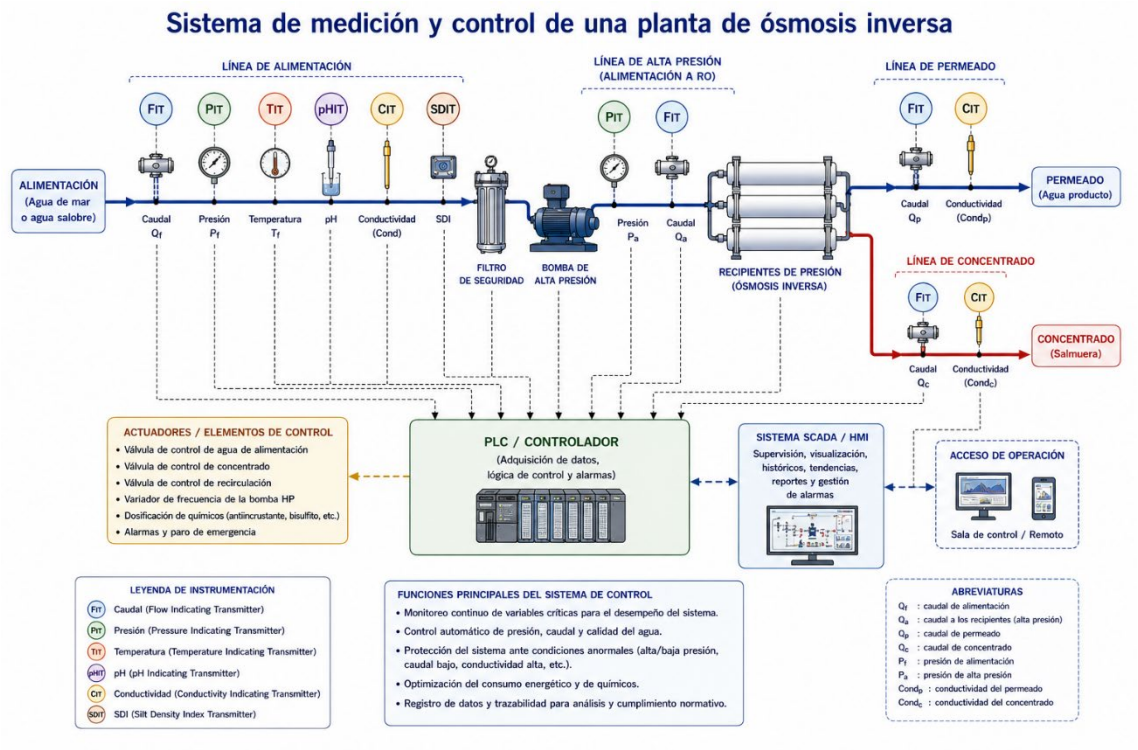
- caudalímetros;
- transmisores de presión;
- transmisores de presión diferencial;
- sensores de temperatura;
- pH-metros;
- conductímetros;
- turbidímetros;
- analizadores de ORP;
- sensores de nivel;
- medidores de potencia.

El manual de DuPont recomienda disponer durante la puesta en marcha de termómetro, medidor de pH, conductímetro, equipo de SDI y equipos para analizar diferentes parámetros químicos.

15.20 SISTEMA DE MEDICIÓN Y CONTROL DE UNA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA

Figura 15.2

Sistema de medición y control de una planta de ósmosis inversa



Nota. Elaboración propia a partir de DuPont Water Solutions (2026), *Manual de diseño de ósmosis inversa y nanofiltración*.

Se recomienda el registro continuo de variables de operación y la incorporación de alarmas para parámetros críticos.

15.21 PUESTA EN MARCHA

El arranque es una etapa decisiva, porque define la condición de referencia con la que se comparará la planta.

Antes del arranque deben verificarse:

- funcionamiento del pretratamiento;
- instalación correcta de los elementos;
- calibración de instrumentos;
- válvulas;
- tuberías;
- bombas;
- sistemas de dosificación;
- sistemas de seguridad;
- puntos de muestreo.

DuPont recomienda completar las evaluaciones del pretratamiento, la carga de elementos y la calibración de instrumentos antes de iniciar la puesta en marcha.

Durante la puesta en marcha deben registrarse:

Qf

Qp

Qc

Pf

Pc

Pp

T

pH

conductividad de alimentación

conductividad de permeado

SDI

Después deben calcularse:

Y

R

J

NPF

NSP

ΔP

Los datos iniciales serán utilizados posteriormente como línea base.

15.22 ESTABILIZACIÓN DE LA MEMBRANA

En las horas iniciales de operación, el comportamiento de la membrana puede variar.

DuPont señala que las membranas húmedas suelen presentar un comportamiento estable de manera más inmediata, mientras que las membranas secas pueden presentar

inicialmente un flujo diferente. Asimismo, el rechazo de sales puede aumentar durante las primeras horas o días hasta alcanzar una condición estable.

No conviene, entonces, dar por definitivo el comportamiento de la membrana según lo medido en la primera hora.

15.23 REGISTRO DE OPERACIÓN

Un sistema profesional debe disponer de una hoja de operación diaria.

Tabla 15.1. Registro básico de operación

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal de alimentación	m3/d	
Caudal de permeado	m3/d	
Caudal de concentrado	m3/d	
Recuperación	%	
Presión de alimentación	bar	
Presión de concentrado	bar	
Presión diferencial	bar	
Temperatura	°C	
pH	—	
Conductividad alimentación	µS/cm	
Conductividad permeado	µS/cm	
SDI	—	
Potencia	kW	
Consumo específico	kWh/m3	
NPF	%	
NSP	%	
Observaciones	—	

La documentación de DuPont contempla registros de puesta en marcha, operación de RO, pretratamiento, mantenimiento y normalización.

15.24 OPERACIÓN DE SISTEMAS DE DOS ETAPAS

En un sistema de dos etapas:

Alimentación → RO 1 → permeado 1 → RO 2 → permeado 2

El segundo paso recibe agua de mejor calidad y, por tanto, puede operar bajo condiciones diferentes.

El manual de DuPont señala que el segundo paso puede funcionar con flux y conversión superiores debido a que su alimentación corresponde al permeado del primer paso.

En un sistema de doble paso es especialmente importante:

- controlar pH;
- controlar conductividad;
- controlar la calidad del permeado del primer paso;
- evitar enviar agua de calidad inadecuada al segundo paso;
- establecer correctamente la secuencia de arranque.

DuPont indica que el primer paso debe estar operativo durante un período suficiente antes de permitir que su permeado alimente el segundo paso.

15.25 CONTROL DE LA RECUPERACIÓN

Dentro de los límites que fija el diseño, el operador puede ajustar la recuperación.

Pero aumentar recuperación significa normalmente:

Y ↑

y, por tanto:

Cc ↑

Esto puede aumentar el riesgo de:

- $CaSO_4$;
- $BaSO_4$;
- $SrSO_4$;
- $CaCO_3$;
- sílice;
- otras especies potencialmente precipitables.

Por ello, el control de recuperación debe estar vinculado con los cálculos de scaling desarrollados en capítulos anteriores.

15.26 CONTROL DE PRESIÓN

La presión aporta la fuerza impulsora para vencer la presión osmótica y producir permeado.

Una aproximación conceptual es:

$$NDP = \Delta P - \Delta \pi$$

donde:

NDP = presión impulsora neta

ΔP = diferencia de presión hidráulica

Δπ = diferencia de presión osmótica

Aumentar la presión puede incrementar el flujo, pero tiene consecuencias energéticas.

Por ello:

P ↑ → Qp ↑

no significa necesariamente:

P ↑ → operación óptima

El objetivo debe ser obtener el caudal requerido con la menor presión compatible con:

- producción;
- calidad;
- recuperación;
- estabilidad;
- límites de la membrana.

15.27 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

El consumo específico de energía es de los indicadores que más cuentan en una planta desalinizadora.

$$SEC = E / Vp$$

donde:

SEC = consumo específico de energía

E = energía consumida

Vp = volumen de permeado producido

Si:

E = 18 000 kWh/d

Vp = 9000 m3/d

entonces:

SEC = 18 000 / 9000

SEC = 2.0 kWh/m3

Este indicador permite comparar el desempeño:

- entre diferentes días;
- entre diferentes trenes;
- antes y después de una modificación;
- antes y después de mantenimiento;
- entre diferentes estrategias de presión.

15.28 EFICIENCIA DE LAS BOMBAS

En una planta RO, la bomba de alta presión es de los mayores consumidores de energía.

El operador debe vigilar simultáneamente:

Q

P

Potencia

Eficiencia

SEC

Si la presión aumenta pero la producción no aumenta proporcionalmente, puede existir una pérdida de eficiencia.

Las posibles causas incluyen:

- fouling;
- aumento de presión osmótica;
- desgaste de bomba;
- deterioro del sistema de recuperación de energía;
- válvulas parcialmente cerradas;
- obstrucciones;
- cambios en la alimentación.

15.29 PARADAS NORMALES Y DE EMERGENCIA

Las paradas pueden clasificarse en:

Parada normal

Programada para:

- mantenimiento;
- inspección;
- limpieza;
- modificaciones;
- baja demanda.

Parada de emergencia

Puede deberse a:

- presión excesiva;
- pérdida de energía;
- fuga;
- falla de bomba;
- temperatura excesiva;
- pérdida de alimentación;
- alarma crítica.

Parada prolongada

Debe evitarse que las membranas se sequen y debe controlarse el crecimiento microbiológico.

DuPont señala que, para sistemas que permanecen parados durante períodos prolongados, deben adoptarse medidas de protección microbiológica y, cuando corresponda, procedimientos de preservación.

15.30 LIMPIEZA QUÍMICA

La limpieza química debe ser considerada una medida correctiva y no una sustitución del buen diseño y operación del pretratamiento.

La estrategia debe ser:

Prevención → monitoreo → detección → diagnóstico → limpieza → verificación

El manual de DuPont presenta procedimientos diferenciados para distintos tipos de ensuciamiento, incluyendo sulfatos, carbonatos, hierro, materia orgánica y ensuciamiento biológico.

15.31 ¿CUÁNDO DEBE LIMPIARSE UNA MEMBRANA?

No debe establecerse un único criterio universal.

La decisión debe considerar:

- fabricante;
- tipo de membrana;
- condición de referencia;
- calidad del agua;
- tendencia de NPF;
- tendencia de NSP;
- tendencia de ΔP;
- análisis químico;
- frecuencia histórica de limpieza.

El principio general es:

NPF ↓ + ΔP ↑ → investigar fouling/scaling

NSP ↑ → investigar pérdida de rechazo

NPF ↓ + NSP ↑ + ΔP ↑ → investigar deterioro severo

La limpieza debe efectuarse después de establecer razonablemente la causa del deterioro.

15.32 EVALUACIÓN DE LA LIMPIEZA

La eficacia de la limpieza debe evaluarse mediante comparación antes-después.

Por ejemplo:

NPF antes = 82 %

NPF después = 96 %

La recuperación del flujo fue:

Incremento de NPF = 96 - 82 = 14 puntos porcentuales

También deben compararse:

- NSP antes y después;
- ΔP antes y después;
- producción;
- consumo energético.

Si después de la limpieza:

NPF ↑

ΔP ↓

NSP ≈ constante

la limpieza probablemente fue efectiva contra el problema hidráulico.

Si:

NPF ≈ constante

NSP sigue ↑

entonces el problema probablemente no era solamente fouling.

15.33 DESINFECCIÓN

La desinfección es especialmente importante cuando existe actividad microbiológica.

DuPont diferencia la desinfección de sistemas detenidos de la dosificación de biocidas en operación, y avisa que las biopelículas pueden dañar la calidad microbiológica del permeado y el funcionamiento de la planta.

El procedimiento debe estar estrictamente basado en:

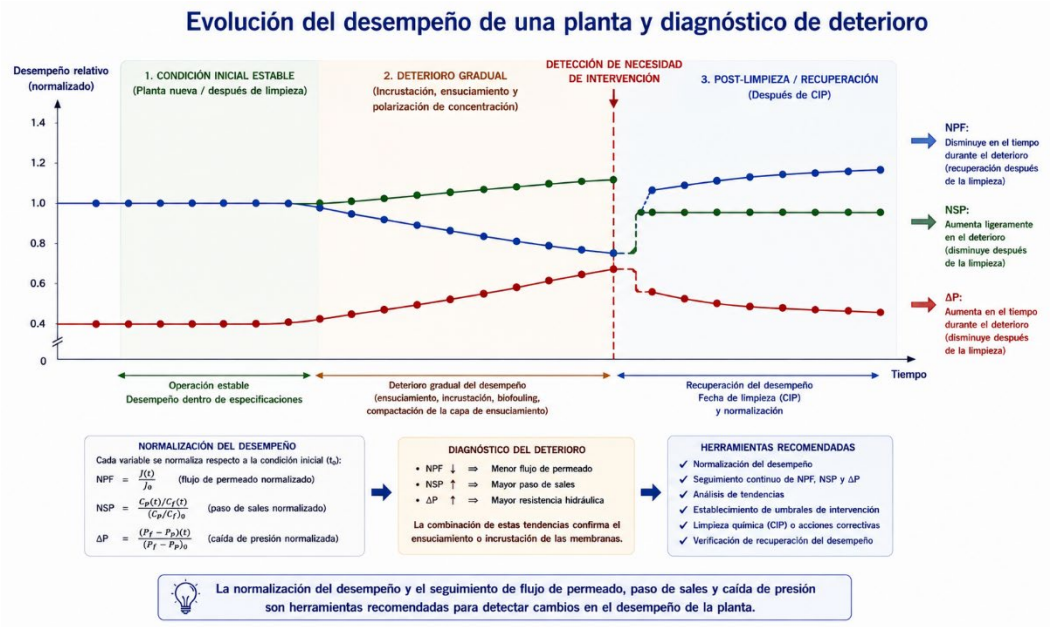
- compatibilidad química de la membrana;
- concentración;
- temperatura;
- tiempo de contacto;
- calidad del agua utilizada;
- recomendaciones del fabricante.

Por ejemplo, DuPont señala que la utilización de peróxido de hidrógeno debe considerar especialmente temperatura y presencia de hierro, porque pueden favorecer el deterioro de la membrana.

15.34 EVOLUCIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA PLANTA Y DIAGNÓSTICO DE DETERIORO

Figura 15.3

Evolución del desempeño de una planta y diagnóstico de deterioro



Nota. Elaboración propia a partir de DuPont Water Solutions (2026), *Manual de diseño de ósmosis inversa y nanofiltración*.

Normalizar el desempeño y vigilar el flujo de permeado, el paso de sales y la caída de presión es lo que se recomienda para notar cambios en cómo rinde la planta.

15.35 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento debe comprender:

Bombas

inspección;

vibración;

lubricación;

sellos;

rodamientos;

consumo eléctrico.

Válvulas

funcionamiento;

fugas;

actuadores;

posicionamiento.

Instrumentación

calibración;

limpieza;

verificación de señales;

comparación con instrumentos portátiles.

Membranas

NPF;

NSP;

ΔP;

limpieza;

sustitución.

Filtros

pérdida de carga;

calidad del filtrado;

frecuencia de cambio.

15.36 MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN

El mantenimiento tradicional puede programarse cada determinado número de horas.

El mantenimiento basado en condición utiliza el comportamiento real del equipo.

Por ejemplo, si una bomba presenta:

Vibración ↑

Corriente ↑

Caudal ↓

Presión ↓

debe investigarse aunque todavía no se haya alcanzado la fecha programada de mantenimiento.

La misma filosofía se aplica a las membranas:

NPF ↓

NSP ↑

ΔP ↑

puede justificar una intervención aunque todavía no haya transcurrido el período convencional entre limpiezas.

15.37 REGISTRO DE MANTENIMIENTO

El registro debería incluir:

- fecha;
- equipo;
- actividad;
- condición encontrada;
- causa probable;
- acción realizada;
- repuesto utilizado;
- responsable;
- horas de operación;
- resultado posterior.

La documentación de DuPont incluye registros específicos de funcionamiento, pretratamiento, mantenimiento y normalización.

15.38 SCADA Y ADQUISICIÓN DE DATOS

En una planta moderna los sensores transmiten información a un sistema de control.

La estructura conceptual es:

Sensores → PLC → SCADA → base de datos → análisis → decisión

El SCADA debe permitir:

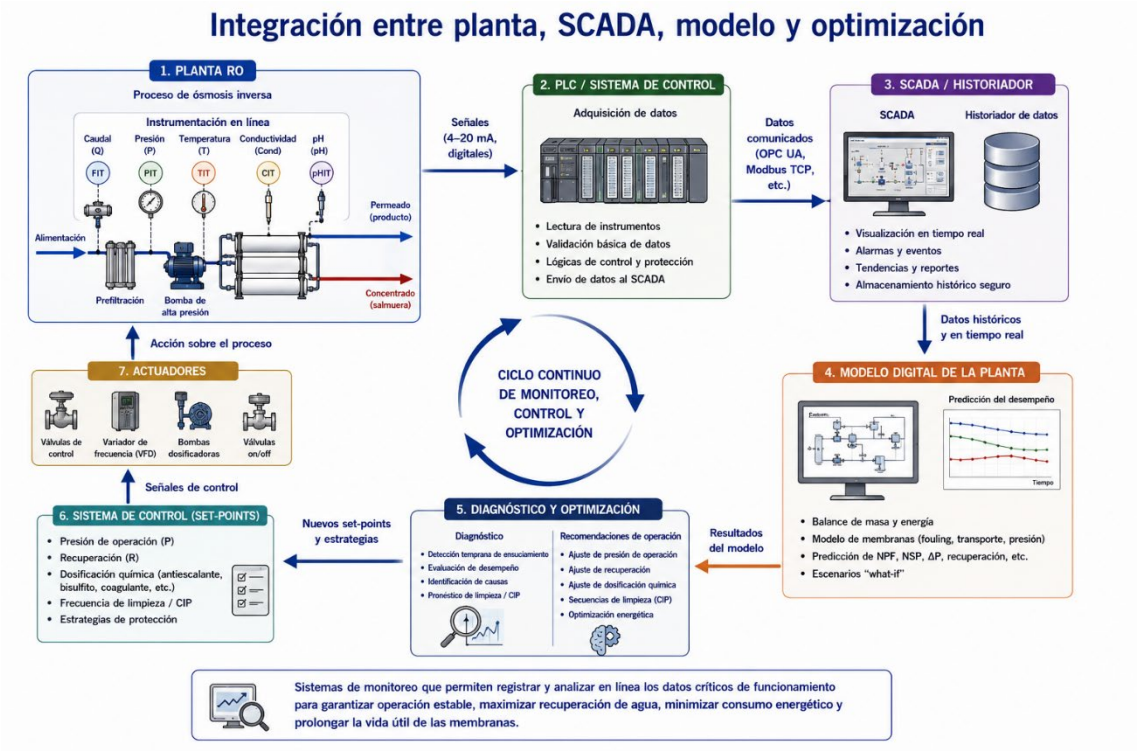
- visualizar variables;
- registrar tendencias;
- generar alarmas;
- consultar históricos;
- comparar condiciones;
- detectar desviaciones.

Más que muchas pantallas, lo que importa es que los datos se vuelvan información que ayude a tomar decisiones.

15.39 INTEGRACIÓN ENTRE PLANTA, SCADA, MODELO Y OPTIMIZACIÓN

Figura 15.4

Integración entre planta, SCADA, modelo y optimización



Nota. Elaboración propia a partir de DuPont Water Solutions (2026), *Manual de diseño de ósmosis inversa y nanofiltración*.

Se recomienda sistemas de monitoreo que permitan registrar y analizar en línea los datos críticos de funcionamiento.

15.40 INTEGRACIÓN CON EL MODELO DE SIMULACIÓN

Este punto permite cerrar conceptualmente los capítulos 14 y 15.

En el capítulo anterior se estudió:

Modelo → simulación → validación → optimización

En este capítulo se estudia:

Planta → datos → normalización → diagnóstico → acción

La ingeniería moderna debe integrar ambas secuencias.

Por ejemplo, el modelo predice:

$$Qp = 1000 \text{ m3/d}$$

pero la planta produce:

$$Qp = 850 \text{ m3/d}$$

Entonces deben investigarse las causas.

El modelo puede calcular el desempeño esperado para las condiciones actuales de:

- temperatura;
- salinidad;
- presión;
- recuperación.

Si aun después de considerar estas variables el modelo predice 1000 m3/d y la planta produce solamente 850 m3/d, existe evidencia de una pérdida real de desempeño.

Así, el modelo se convierte en una herramienta de diagnóstico.

15.41 OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL

La operación puede plantearse como un problema de optimización.

Por ejemplo, se desea minimizar el costo:

Costo total = costo energético + costo químico + costo de mantenimiento + otros costos

sujeto a:

$Qp \geq Qp$ requerido

$Cp \leq Cp$ máximo

$Y \leq Y$ máximo

$P \leq P$ máximo

$NPF \geq NPF$ mínimo

$NSP \leq NSP$ máximo

La importancia de esta formulación es que demuestra que la operación no consiste simplemente en producir el máximo volumen de agua.

La condición óptima es aquella que satisface simultáneamente:

- producción;
- calidad;
- consumo energético;
- estabilidad;
- vida útil de membranas;
- seguridad;
- costo.

15.42 INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO

Se recomienda que el estudiante conozca al menos los siguientes indicadores.

Producción

$$Qp = \text{caudal de permeado}$$

Recuperación

$$Y = Qp / Qf$$

Rechazo

$$R\ (\%) = [1 - (Cp / Cf)] \times 100$$

Flux

$$J = Qp / Am$$

Presión diferencial

$$\Delta P = Pf - Pc$$

Consumo específico de energía

$$SEC = E / Vp$$

Frecuencia de limpieza

$$FCIP = \text{número de limpiezas / año}$$

Disponibilidad

Disponibilidad (%) = [tiempo disponible / tiempo total] x 100

Estos indicadores permiten transformar la operación cotidiana en información cuantitativa.

15.43 CASO INTEGRAL DE DIAGNÓSTICO 1

Una planta presenta los siguientes datos.

Variable	Condición inicial	Condición actual
NPF	100 %	84 %
NSP	2.0 %	2.2 %
ΔP	2.0 bar	3.0 bar
Temperatura	25 °C	24 °C
SEC	2.2 kWh/m3	2.8 kWh/m3

Análisis

La temperatura prácticamente no cambió.

Por tanto, no puede atribuirse la pérdida de desempeño principalmente a temperatura.

Se observa:

NPF ↓

ΔP ↑

NSP ≈ constante

El diagnóstico preliminar es:

fouling o scaling

Antes de limpiar deben investigarse:

1. SDI.
2. Turbidez.
3. Recuperación.
4. Calidad del pretratamiento.

5. Dosificación de antiscalant.
6. Presión diferencial por etapa.
7. Potencial de incrustación.
8. Historial de operación.

15.44 CASO INTEGRAL DE DIAGNÓSTICO 2

Ahora se observa:

Variable	Condición inicial	Condición actual
NPF	100 %	97 %
NSP	2.0 %	5.5 %
ΔP	2.0 bar	2.1 bar

La interpretación cambia.

El NPF prácticamente se mantiene.

El NSP aumenta significativamente.

La presión diferencial permanece prácticamente constante.

Por tanto, debe investigarse:

- pérdida de integridad;
- daño de membrana;
- oxidación;
- defectos;
- juntas;
- sellos;
- conexiones.

No sería técnicamente correcto concluir automáticamente que se necesita una limpieza química.

15.45 ALGORITMO DE DIAGNÓSTICO

El procedimiento general puede ser:

1. Detectar una desviación.
2. Verificar los instrumentos.
3. Revisar las condiciones de alimentación.

4. Normalizar los datos.
5. Analizar NPF.
6. Analizar NSP.
7. Analizar ΔP.
8. Revisar tendencias históricas.
9. Investigar el pretratamiento.
10. Revisar recuperación.
11. Realizar análisis químico cuando corresponda.
12. Establecer una causa probable.
13. Aplicar acción correctiva.
14. Verificar el resultado.

El principio fundamental es:

No actuar sobre el síntoma sin investigar primero la causa.

15.46 ACTIVIDAD PRÁCTICA PARA ESTUDIANTES

Se recomienda entregar al estudiante una base de datos correspondiente a 30 o 60 días de operación.

Los datos deben incluir:

- Qf;
- Qp;
- Qc;
- Pf;
- Pc;
- T;
- conductividad de alimentación;
- conductividad de permeado;
- potencia;
- pH.

El estudiante deberá calcular:

Y

R

J

ΔP

SEC

y, utilizando las ecuaciones del fabricante proporcionadas en el curso:

NPF

NSP

Posteriormente deberá elaborar las tendencias de:

NPF vs. tiempo

NSP vs. tiempo

ΔP vs. tiempo

SEC vs. tiempo

Finalmente deberá responder:

¿En qué momento comenzó el deterioro de la planta?

¿Qué variable constituye la primera evidencia?

¿Cuál es la causa más probable?

¿Qué información adicional debería obtenerse?

¿Qué acción correctiva recomienda?

Esta actividad es mucho más representativa del trabajo profesional que simplemente solicitar el cálculo de una recuperación.

15.47 PROBLEMAS PROPUESTOS

Problema 15.1

Una planta recibe 2500 m3/d y produce 1000 m3/d de permeado.

Calcular:

a) recuperación

b) caudal de concentrado

Solución:

$$Y = 1000 / 2500$$

$$Y = 0.40$$

$$Y = 40\ \%$$

$$Qc = 2500 - 1000$$

$$Qc = 1500\ m3/d$$

Problema 15.2

Una alimentación contiene 850 mg/L de una especie disuelta y el permeado contiene 17 mg/L.

Calcular el rechazo.

$$R(\%) = [1 - (17 / 850)] \times 100$$

$$R(\%) = 98\ \%$$

Problema 15.3

Una planta consume 18 000 kWh/d y produce 9000 m3/d.

Calcular el consumo específico.

$$SEC = 18\ 000 / 9000$$

$$SEC = 2.0\ kWh/m3$$

Problema 15.4

Una planta presenta:

NPF: 100 % → 82 %

NSP: 2.1 % → 2.3 %

ΔP: 2.0 bar → 3.2 bar

¿Qué problema debe investigarse primero?

Respuesta:

La combinación de disminución del NPF, aumento de ΔP y cambio relativamente pequeño de NSP indica principalmente fouling o scaling.

15.48 PREGUNTAS DE DISCUSIÓN

Pregunta 1

¿Qué impide diagnosticar fouling mirando únicamente el caudal de permeado?

Respuesta:

Porque el caudal también depende de temperatura, presión osmótica y presión de operación. Es necesario normalizar el desempeño.

Pregunta 2

¿Qué significa un aumento de la presión diferencial?

Respuesta:

Puede indicar acumulación de sólidos, fouling, scaling, biofouling u obstrucción hidráulica.

Pregunta 3

¿Qué significa un aumento importante del paso de sales?

Respuesta:

Indica una disminución del rechazo y requiere investigar la integridad de la membrana, posibles daños químicos y problemas de sellado.

Pregunta 4

¿Por qué es importante registrar la puesta en marcha?

Respuesta:

Porque los datos estabilizados iniciales proporcionan una referencia para evaluar el desempeño futuro.

Pregunta 5

¿Debe aumentarse automáticamente la presión cuando disminuye la producción?

Respuesta:

No. Primero debe determinarse la causa de la disminución.

Pregunta 6

¿Por qué aumentar la recuperación puede incrementar el riesgo de scaling?

Respuesta:

Porque aumenta la concentración de especies disueltas en el concentrado.

Pregunta 7

¿Cuál es la utilidad del SCADA?

Respuesta:

Permite visualizar, registrar y analizar variables de proceso, generar alarmas y estudiar tendencias.

Pregunta 8

¿Por qué el mantenimiento basado en condición puede ser superior al mantenimiento exclusivamente por calendario?

Respuesta:

Porque permite intervenir el equipo cuando los datos indican deterioro, antes de que ocurra una falla.

15.49 PROYECTO INTEGRADOR

Se propone como trabajo final del capítulo:

"Diagnóstico y optimización operacional de una planta de ósmosis inversa"

El estudiante deberá analizar una base de datos real o simulada.

Parte 1. Balance hidráulico

Calcular:

Qf

Qp

Qc

Y

Parte 2. Balance de sales

Calcular:

Cf

Cp

Cc

R

Parte 3. Desempeño

Calcular:

J

NPF

NSP

ΔP

Parte 4. Energía

Calcular:

SEC

Parte 5. Diagnóstico

Determinar:

- cuándo comenzó el deterioro;
- qué indicadores lo muestran;
- cuál es la causa probable.

Parte 6. Acción correctiva

Proponer:

- modificación del pretratamiento;
- cambio de recuperación;
- ajuste de presión;
- limpieza;
- mantenimiento;
- inspección de membranas.

Parte 7. Optimización

Determinar una condición operacional que minimice el costo manteniendo:

- producción;
- calidad;
- seguridad;
- estabilidad;
- vida útil de membranas.

15.50 CONCLUSIONES

Operar una planta de membranas es una etapa que no puede separarse del diseño.

Una planta debe evaluarse mediante variables hidráulicas, de presión, calidad, desempeño y energía.

Los balances fundamentales son:

$$Qf = Qp + Qc$$

$$Y = Qp / Qf$$

$$R(\%) = [1 - (Cp / Cf)] \times 100$$

$$J = Qp / Am$$

$$\Delta P = Pf - Pc$$

$$SEC = E / Vp$$

Sin embargo, el cálculo de estos valores no es suficiente.

El desempeño se debe analizar con tendencias y, en especial, normalizando el flujo de permeado y el paso de sales.

La combinación de:

NPF

NSP

ΔP

constituye una herramienta fundamental para el diagnóstico operacional.

El pretratamiento determina de manera directa cuán estables se mantienen las membranas.

Al controlar la recuperación hay que tener presente que las especies se concentran en el concentrado y que existe potencial de incrustación.

La limpieza química debe utilizarse como una acción correctiva basada en evidencias y no como sustituto de un buen pretratamiento y una correcta operación.

La puesta en marcha debe establecer una condición de referencia confiable.

El registro sistemático de los datos permite detectar cambios antes de que se conviertan en fallas importantes. DuPont considera los registros exhaustivos y la normalización elementos esenciales para comprender el desempeño real y aplicar medidas correctivas.

Finalmente, la evolución natural de la ingeniería de membranas conduce hacia la integración:

Planta → sensores → SCADA → datos históricos → modelo → diagnóstico → optimización → control

Así, la simulación vista en el capítulo anterior ya no sirve solo para diseñar: también se usa para operar y optimizar una planta real.

CAPÍTULO 16

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AACE International. (2020). Cost estimate classification system—Recommended practice No. 18R-97. AACE International.

Alvarado, L., & Chen, A. (2014). Electrodeionization: Principles, strategies and applications. Electrochimica Acta, 132, 583–597.

American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2023). Standard methods for the examination of water and wastewater (24th ed.). APHA Press.

American Water Works Association. (2019). Electrodialysis and ion-exchange membrane systems (AWWA Standard B116-19). AWWA.

American Water Works Association. (2022). Reverse osmosis and nanofiltration systems for water treatment (AWWA Standard B114-22). AWWA.

American Water Works Association. (2023). Membrane bioreactor systems (AWWA Standard B130-23). AWWA.

American Water Works Association. (2026). Nanofiltration and reverse osmosis (AWWA Manual M46, 3rd ed.). AWWA.

Amjad, Z. (1993). Reverse osmosis: Membrane technology, water chemistry, and industrial applications. Van Nostrand Reinhold.

Baker, R. W. (2012). Membrane technology and applications (3rd ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781118359686

Basile, A., & Charcosset, C. (Eds.). (2016). Integrated membrane systems and processes. John Wiley & Sons.

Benyahia, F. (2019). Membrane distillation in desalination. CRC Press.

Bernardes, A. M., Rodrigues, M. A. S., & Ferreira, J. Z. (Eds.). (2014). Electrodialysis and water reuse: Novel approaches. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40249-4

Cath, T. Y., Childress, A. E., & Elimelech, M. (2006). Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. Journal of Membrane Science, 281, 70–87. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.048

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). MWH's water treatment: Principles and design (3rd ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781118131473

DuPont Water Solutions. (2026). FilmTec™ reverse osmosis/nanofiltration membranes technical manual (Form No. 45-D01504-en, Rev. 19). DuPont.

Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. Science, 333(6043), 712–717. https://doi.org/10.1126/science.1200488

Fane, A. G., Tang, C. Y., & Wang, R. (2011). Membrane technology for water: Microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, and reverse osmosis. In P. A. Wilderer (Ed.), Treatise on water science (Vol. 4, pp. 301–335). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00091-9

FAO. (2023). The state of food and agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cc7724en

Flemming, H.-C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. Nature Reviews Microbiology, 8, 623–633.

Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. Desalination, 216(1–3), 1–76. https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.009

Geise, G. M., Paul, D. R., & Freeman, B. D. (2014). Fundamental water and salt transport properties of polymeric materials. Progress in Polymer Science, 39(1), 1–42. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.07.001

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., & Moulin, P. (2009). Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. Water Research, 43(9), 2317–2348. https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010

Hermia, J. (1982). Constant pressure blocking filtration laws—Application to power-law non-Newtonian fluids. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 60(3), 183–187.

Hillis, P. (Ed.). (2000). Membrane technology in water and wastewater treatment. Royal Society of Chemistry.

Ismail, A. F., & Matsuura, T. (Eds.). (2016). Membrane technology for water and wastewater treatment, energy and environment. CRC Press.

Jijingi, H. E., Kazemi Yazdi, S., Abakar, Y. A., & Etim, E. (2024). Evaluation of membrane bioreactor (MBR) technology for industrial wastewater treatment and its application in developing countries: A review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 10, 100886.

Johnson, R. A., & Nguyen, M. H. (2017). Understanding membrane distillation and osmotic distillation. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118880319

Judd, S. (2011). The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment (2nd ed.). Elsevier.

Kehrein, P., Jafari, M., Slagt, M., Cornelissen, E., Osseweijer, P., Posada, J., & van Loosdrecht, M. (2021). A techno-economic analysis of membrane-based advanced treatment processes for the reuse of municipal wastewater. Water Reuse, 11(4), 705–725.

Khan, Z. U., Moronshing, M., Shestakova, M., Al-Othman, A., Sillanpää, M., Zhan, Z., Song, B., & Lei, Y. (2023). Electro-deionization (EDI) technology for enhanced

water treatment and desalination: A review. Desalination, 548, 116254. https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116254

Khayet, M., & Matsuura, T. (2011). Membrane distillation: Principles and applications. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2009-0-17487-1

Kolmetz, K., Firdaus, M. A., & Dwijayanti, A. (2014). Membrane technology: Selection, sizing and troubleshooting. KLM Technology Group.

Lau, W. J., Ismail, A. F., Misdan, N., & Kassim, M. A. (2012). A recent progress in thin film composite membrane: A review. Desalination, 287, 190–199. https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.004

Meng, F., Chae, S.-R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.-S., & Yang, F. (2009). Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. Water Research, 43, 1489–1512.

Metcalf & Eddy/AECOM. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Mickley, M. C. (2009). Treatment of concentrate from desalination plants. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

Mulder, M. (1996). Basic principles of membrane technology (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1766-8

National Research Council. (2008). Desalination: A national perspective. The National Academies Press.

Panagopoulos, A., & Haralambous, K.-J. (2020). Minimal liquid discharge (MLD) and zero liquid discharge (ZLD) strategies for wastewater management and resource recovery—Analysis, challenges and prospects. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(5), 104418. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104418

Peinemann, K.-V., & Pereira Nunes, S. (Eds.). (2010). Membrane technology: Volume 4, Membranes for water treatment. Wiley-VCH.

Pinnekamp, J. (Ed.). (2005). Membrane technology for waste water treatment. RWTH Aachen University.

Porter, M. C. (Ed.). (1990). Handbook of industrial membrane technology. Noyes Publications.

Schäfer, A. I., Fane, A. G., & Waite, T. D. (Eds.). (2005). Nanofiltration: Principles and applications. Elsevier.

Schwantes, R., Cipollina, A., Gross, F., Koschikowski, J., Pfeifle, D., Rolletschek, M., & Subiela, V. (2013). Membrane distillation: Solar and waste heat driven demonstration plants for desalination. Desalination.

Scott, K. (1995). Handbook of industrial membranes (2nd ed.). Elsevier.

Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. Nature, 452, 301–310.

Strathmann, H. (2011). Introduction to membrane science and technology. Wiley-VCH.

U.S. Environmental Protection Agency. (2005). Membrane filtration guidance manual (EPA 815-R-06-009). U.S. EPA, Office of Water.

U.S. Environmental Protection Agency. (2020). National Water Reuse Action Plan: Collaborative implementation (Version 1) (EPA 820-R-20-001). U.S. EPA.

UNESCO World Water Assessment Programme. (2023). The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO.

UNESCO World Water Assessment Programme. (2024). The United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace. UNESCO. https://doi.org/10.54679/WZDQ6209

Voutchkov, N. (2013). Desalination engineering: Planning and design. McGraw-Hill.

Wachinski, A. M. (2013). Membrane processes for water reuse. McGraw-Hill.

Wang, L. K., Chen, J. P., Hung, Y.-T., & Shammas, N. K. (Eds.). (2011). Membrane and desalination technologies. Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-278-6

Water Environment Federation. (2018). Water reuse: Manual of practice. WEF.

Wilf, M., Awerbuch, L., Bartels, C., Mickley, M., Pearce, G., & Voutchkov, N. (2007). The guidebook to membrane desalination technology: Reverse osmosis, nanofiltration and hybrid systems process design, applications and economics. Balaban.

Yonar, T. (Ed.). (2020). Electrodialysis. IntechOpen.

ANEXO A Metodología para el diseño profesional de plantas de ósmosis inversa

A.1 Introducción

Diseñar una planta de ósmosis inversa es un trabajo multidisciplinario: reúne ingeniería química, hidráulica, mecánica y eléctrica, además de automatización, economía y gestión ambiental.

En proyectos industriales de gran capacidad, el diseño suele desarrollarse en cuatro etapas sucesivas:

- Ingeniería conceptual.
- Ingeniería básica.
- Ingeniería FEED (Front End Engineering Design).
- Ingeniería de detalle.

Con cada una de ellas la información técnica y económica gana precisión, y la incertidumbre del proyecto baja paso a paso.

A.2 Ingeniería conceptual

La ingeniería conceptual responde a la pregunta:

¿Es técnicamente viable el proyecto?

En esta etapa se definen los aspectos fundamentales del proceso.

Actividades principales

• Caracterización del agua.
• Estimación de demanda.
• Selección de la tecnología.
• Selección preliminar del sitio.
• Definición del proceso.
• Balance preliminar de materia.
• Balance preliminar de energía.
• Estimación preliminar del CAPEX.
• Estimación preliminar del OPEX.
• Cronograma general.
• Identificación de riesgos.

Nivel de precisión del costo

±30 %

A.3 Ingeniería básica

Durante esta etapa se desarrolla el proceso seleccionado con mayor detalle.

Se realizan:

- balances completos;
- simulaciones;
- dimensionamiento preliminar;
- especificaciones generales.

Es también en este punto donde se acuerdan las pautas de diseño que todas las especialidades aplicarán después.

Productos generados

• Bases de diseño.
• Diagramas de flujo del proceso (PFD).
• Balance de materia.
• Balance de energía.
• Lista preliminar de equipos.
• Filosofía de operación.
• Filosofía de control.
• Lista preliminar de instrumentos.

A.4 Ingeniería FEED

La FEED hace de enlace: viene después del diseño conceptual y antes de la ingeniería de detalle.

Aquí prácticamente queda definida toda la planta.

Incluye:

- especificaciones técnicas;
- selección definitiva de equipos;
- modelado hidráulico;
- modelado energético;
- instrumentación;
- automatización;

- costos actualizados.

Nivel de precisión

±15 %

A.5 Ingeniería de detalle

Corresponde al conjunto de documentos utilizados directamente durante la construcción.

Incluye:

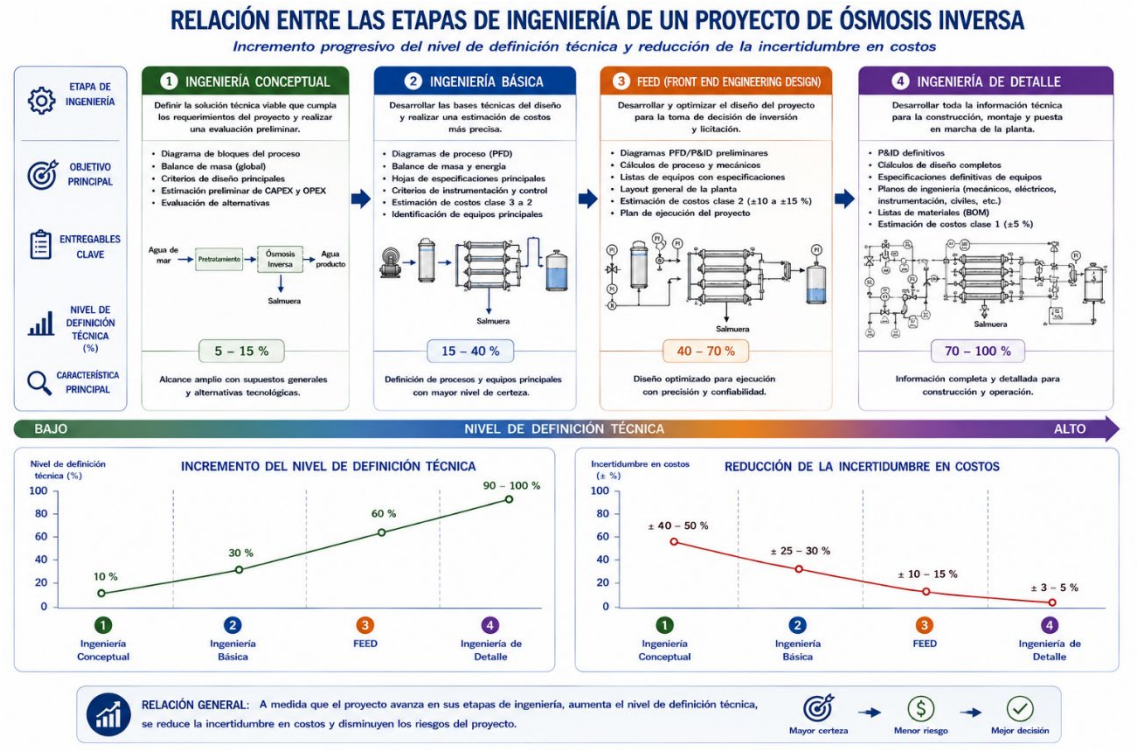
- planos constructivos;
- isométricos;
- P&ID;
- listas de líneas;
- listas de válvulas;
- planos eléctricos;
- planos civiles;
- memorias de cálculo.

Precisión económica

±5 %

Figura A.1

Fases de ingeniería de un proyecto de ósmosis inversa y cómo se relacionan



Nota. Elaboración propia.

A.6 Bases de diseño

Todo proyecto debe comenzar con un documento denominado:

Bases de Diseño (Basis of Design, BOD).

Este documento constituye el principal referente técnico durante todo el proyecto.

Debe contener:

Información general

- objetivo del proyecto;
- ubicación;
- propietario;
- capacidad.

Agua de alimentación

- análisis completo;
- variaciones estacionales;
- temperatura;
- SDI;

- materia orgánica;
- microbiología.

Agua producto

- calidad requerida;
- normativa aplicable;
- uso previsto.

Condiciones de operación

- recuperación;
- disponibilidad;
- presión;
- temperatura;
- vida útil.

Tabla A.1

Información mínima de las Bases de Diseño

Información	Requerida
Calidad del agua	Sí
Producción	Sí
Vida útil	Sí
Disponibilidad	Sí
Normativa	Sí
Restricciones ambientales	Sí
Condiciones climáticas	Sí

Nota. Elaboración propia.

A.7 Diagramas de Flujo del Proceso (PFD)

El **PFD (Process Flow Diagram)** representa el esquema general del proceso.

Debe mostrar:

- equipos principales;
- corrientes;
- caudales;
- temperaturas;

- presiones;
- composición.

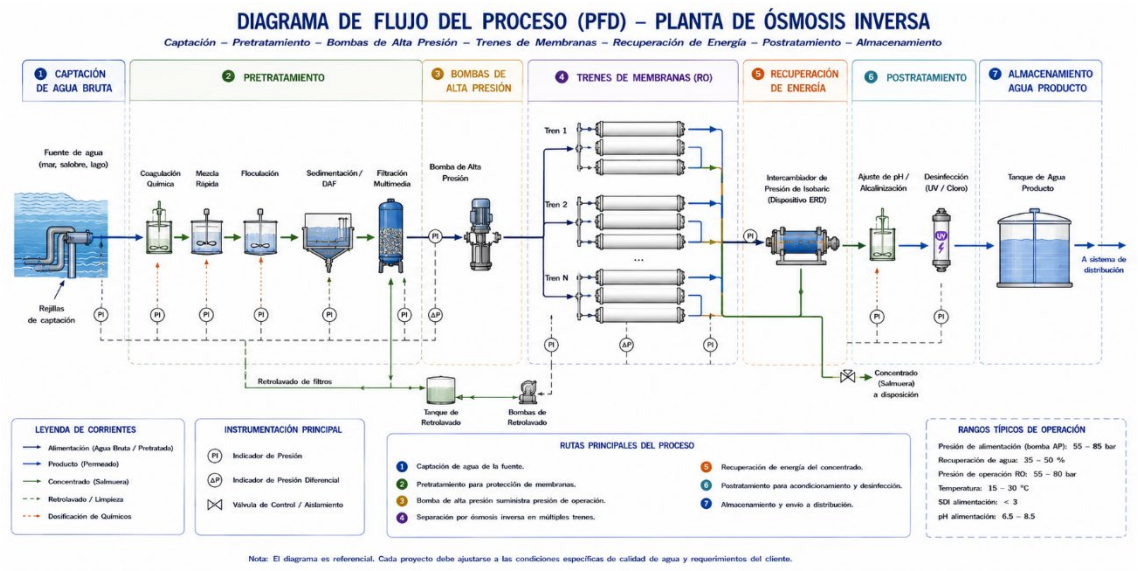
No incluye instrumentación detallada.

Los PFD sirven para:

- balances;
- simulaciones;
- revisión del proceso.

Figura A.2.

Planta de ósmosis inversa: PFD o Diagrama de Flujo del Proceso



Nota. Elaboración propia.

A.8 Diagramas P&ID

El **Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)** constituye el documento más importante durante la construcción y operación.

Incluye:

- tuberías;
- válvulas;
- bombas;
- instrumentos;
- lazos de control;

- señales eléctricas;
- sistemas de seguridad.

Cada válvula e instrumento posee un código único.

Tabla A.2.

Abreviaturas comunes utilizadas en diagramas P&ID

Símbolo	Significado
PI	Indicador de presión
PT	Transmisor de presión
FI	Indicador de caudal
FT	Transmisor de caudal
TI	Indicador de temperatura
TT	Transmisor de temperatura
CV	Válvula de control
PSV	Válvula de alivio

Nota. Elaboración propia.

A.9 Hojas de datos (Data Sheets)

Cada equipo importante dispone de una hoja técnica.

Por ejemplo:

Bomba de alta presión

Debe contener:

- fabricante;
- caudal;
- presión;
- potencia;
- eficiencia;
- NPSH;
- materiales;
- temperatura.

Membranas

Incluyen:

- flujo nominal;

- rechazo;
- presión máxima;
- intervalo de pH;
- temperatura máxima;
- limpieza química.

Intercambiador isobárico

Incluye:

- eficiencia;
- pérdidas hidráulicas;
- materiales;
- presión máxima.

A.10 Lista de equipos (Equipment List)

Todo proyecto incorpora una lista codificada.

Ejemplo:

Código	Equipo
P-101	Bomba de alimentación
P-201	Bomba de alta presión
RO-101	Tren RO 1
ERD-101	Recuperador de energía
TK-101	Tanque CIP
HX-101	Intercambiador de calor

Esta codificación facilita la coordinación entre las diferentes disciplinas de ingeniería.

A.11 Lista de líneas (Line List)

Cada tubería debe identificarse mediante:

- diámetro;
- material;
- presión;
- temperatura;
- aislamiento;

- servicio.

A partir de esta información se elaboran los planos isométricos y las especificaciones de montaje.

A.12 Índice de instrumentos (Instrument Index)

El índice de instrumentos contiene, para cada dispositivo:

- código;
- tipo;
- ubicación;
- variable medida;
- rango;
- señal de salida;
- sistema de control asociado.

El documento resulta indispensable para programar el sistema SCADA y el DCS.

A.13 Filosofía de control

La filosofía de control describe cómo operará la planta en condiciones normales y anormales.

Incluye:

- arranque;
- parada;
- operación normal;
- alarmas;
- interbloqueos;
- secuencia de emergencia;
- recuperación después de fallas.

Debe concordar con el HAZOP y con los sistemas instrumentados de seguridad.

A.14 Memorias de cálculo

Las memorias de cálculo deben documentar, de forma trazable y verificable:

- balances de materia;

- balances de energía;
- cálculo de bombas;
- dimensionamiento de tuberías;
- pérdidas de carga;
- selección de membranas;
- recuperación;
- consumo energético;
- dimensionamiento del sistema CIP;
- cálculo de tanques y recipientes.

Cada memoria debe indicar claramente las hipótesis de diseño, ecuaciones utilizadas, datos de entrada, resultados y criterios de validación.

Conclusión del Anexo A

Se piensa a menudo que diseñar una planta de ósmosis inversa produce solo planos y cálculos. No es así: el resto de los papeles es el idioma común que comparten ingenieros químicos, mecánicos, eléctricos y civiles, instrumentistas, especialistas en automatización y operadores. De cuán buenos sean depende en gran parte el éxito de la obra, del arranque y de los años de operación.

ANEXO B Manual de Ingeniería para el Diseño de Plantas de Ósmosis Inversa

B.1 Introducción

El presente manual reúne las principales ecuaciones, correlaciones y criterios utilizados durante el diseño, evaluación y optimización de plantas de ósmosis inversa.

Su objetivo consiste en servir como una guía práctica para:

- ingenieros de diseño;
- consultores;
- operadores;
- estudiantes de maestría;
- investigadores.

Los datos que entregan los fabricantes de membranas y los programas de simulación específicos deben acompañar a las ecuaciones.

B.2 Propiedades del agua

Densidad

La densidad depende principalmente de:

- temperatura;
- salinidad;
- presión.

Para cálculos preliminares puede adoptarse:

Agua dulce

$$\rho=1000 \text{ kg/m}^3$$

Agua de mar

$$\rho=1025 \text{ kg/m}^3$$

Viscosidad

La viscosidad disminuye al aumentar la temperatura.

Este parámetro influye directamente sobre:

- pérdidas de carga;

- flujo de membranas;
- consumo energético.

Calor específico

Para agua líquida:

$$Cp = 4.18 \text{ kJ/(kg·K)}$$

Conductividad térmica

Valor aproximado

0.60 W/(m·K)

Tabla B.1. Propiedades aproximadas del agua

Propiedad	Valor
Densidad	1000 kg/m³
Calor específico	4,18 kJ/kg·K
Conductividad térmica	0,60 W/m·K
Viscosidad (20 °C)	1,00 mPa·s

Nota. Para diseño de detalle se recomienda emplear propiedades dependientes de temperatura, salinidad y presión.

B.3 Balance de materia

Para estado estacionario

$\sum m_{entrada} = \sum m_{salida}$

En ósmosis inversa

$$Qf = Qp + Qc$$

donde

Qf

Caudal de alimentación

Qp

Permeado

Qc

Concentrado

B.4 Recuperación

$$R = Qp / Qf \times 100$$

Valores típicos

Aplicación	Recuperación
Agua de mar	35–50 %
Agua salobre	70–90 %
Reúso	75–90 %

B.5 Rechazo de sales

$$SR=(1-\frac{Cp}{Cf})\times 100$$

donde

Cp

Concentración en permeado

Cf

Concentración de alimentación

B.6 Flujo de permeado

$$J=Qp\ A$$

donde

A

Área efectiva de membrana

Valores habituales

Tipo	LMH
SWRO	12–18
BWRO	18–28
Reúso	15–25

B.7 Presión osmótica

Para soluciones diluidas

$$\pi=iCRT$$

donde

- iii: factor de Van't Hoff.
- CCC: concentración molar.
- RRR: constante universal de los gases.
- TTT: temperatura absoluta.

B.8 Presión neta impulsora

$$NDP = Pf - \Delta\pi - \Delta P/2$$

donde

Pf

Presión de alimentación

$\Delta\pi$

Diferencia de presión osmótica

ΔP

Pérdida de presión en el módulo

Para valorar cómo rinde una membrana en lo hidráulico, la NDP es un parámetro de primer orden.

B.9 Consumo específico de energía

$$SEC = \text{Potencia} / \text{Producción}$$

Unidad

kWh/m^3

Valores típicos

Planta	SEC
SWRO moderna	2,5–3,2
BWRO	0,8–2,0
ZLD	15–30

B.10 Potencia de bombas

$$P = \rho g Q H / \eta$$

donde

Q

Caudal

H

Altura manométrica

η

Eficiencia

B.11 Pérdidas de carga

Para tuberías

$$hf=f\,(L/D)\,(V^2/2g)$$

Al escoger el factor de fricción se toman en cuenta el régimen de flujo y también la rugosidad relativa que presenta la tubería.

B.12 Número de Reynolds

$$Re=\rho VD / \mu$$

Interpretación

Reynolds	Régimen
<2300	Laminar
2300–4000	Transición
>4000	Turbulento

B.13 Índices de incrustación

Durante el diseño deberán calcularse, según corresponda:

- Índice de Saturación de Langelier (LSI).
- Índice de Estabilidad de Ryznar (RSI).
- Índice de Stiff y Davis (S&DSI).
- Índice de Larson-Skold.
- Índice de Sílice.

Qué se elige depende del tipo de aplicación y de la química del agua.

B.14 Parámetros de diseño recomendados

Variable	Agua de mar	Agua salobre
Recuperación	40–50 %	75–90 %
Flujo de diseño	14–18 LMH	20–28 LMH
Presión	55–70 bar	10–25 bar
SDI	<3	<5
Turbidez	<0,2 NTU	<0,5 NTU

B.15 Factores de seguridad

Se recomienda considerar:

Parámetro	Valor
Capacidad hidráulica	10–15 %
Bombas	N+1
Instrumentación crítica	Redundante
Alimentación eléctrica	Redundante
Trenes RO	Reserva parcial

B.16 Lista de verificación para el diseño

Antes de finalizar un proyecto debe verificarse que se hayan desarrollado:

□ Bases de diseño.

□ Caracterización completa del agua.

□ Balance de materia.

□ Balance de energía.

□ Simulación hidráulica.

□ Selección de membranas.

□ Dimensionamiento de bombas.

□ Cálculo de recuperación.

□ Evaluación de fouling.

□ Evaluación de scaling.

□ Sistema CIP.

□ Automatización.

□ PFD.

□ P&ID.

□ Lista de equipos.

□ Hojas de datos.

□ Evaluación económica.

□ HAZOP.

□ Estudio ambiental.

□ Manual de operación.

Tabla B.2.

Qué documentos de ingeniería hacen falta en un proyecto de planta de ósmosis inversa

Documento	**Ingeniería conceptual**	**Básica**	**FEED**	**Detalle**
Bases de diseño	✓	✓	✓	✓
Balance de materia	✓	✓	✓	✓

Documento	Ingeniería conceptual	Básica	FEED	Detalle
Balance de energía	✓	✓	✓	✓
PFD	✓	✓	✓	✓
P&ID	—	✓	✓	✓
Lista de equipos	—	✓	✓	✓
Hojas de datos	—	✓	✓	✓
HAZOP	—	—	✓	✓
Planos constructivos	—	—	—	✓
Manual de operación	—	—	✓	✓

Nota. Elaboración propia.

B.17 Recomendaciones para la elaboración de memorias de cálculo

Las memorias de cálculo constituyen el soporte técnico de todas las decisiones de ingeniería adoptadas durante el desarrollo del proyecto. Deben elaborarse de forma estructurada, verificable y trazable, de manera que cualquier ingeniero pueda reproducir los resultados obtenidos.

Cada memoria de cálculo debería contener, como mínimo, los siguientes apartados:

1. Objetivo

Definir claramente el propósito del cálculo, indicando el equipo o sistema que será dimensionado.

Ejemplos:

- Cálculo hidráulico del sistema de alimentación.
- Dimensionamiento de bombas de alta presión.
- Selección de membranas.
- Diseño del sistema CIP.
- Evaluación del consumo energético.

2. Bases de diseño

Se deben indicar:

- capacidad de producción;
- calidad del agua de alimentación;
- calidad requerida del permeado;

- condiciones ambientales;
- normas aplicables;
- factores de seguridad adoptados.

3. Datos de entrada

Todos los datos utilizados deberán presentarse en forma tabulada.

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Caudal	25 000	m³/día	Bases de diseño
Temperatura	25	°C	Caracterización
Conductividad	4 800	µS/cm	Laboratorio
Recuperación	80	%	Criterio de diseño

4. Hipótesis de cálculo

Toda hipótesis deberá justificarse técnicamente.

Ejemplos:

- Flujo estacionario.
- Propiedades constantes.
- Fluido incompresible.
- Régimen turbulento.
- Temperatura uniforme.

5. Desarrollo matemático

Las ecuaciones deberán presentarse en el siguiente orden:

- ecuación general;
- sustitución de valores;
- resultado;
- unidades.

Cada ecuación deberá numerarse para facilitar su referencia en el documento.

6. Resultados

Los resultados deben resumirse en tablas y gráficos.

Es recomendable incluir:

- sensibilidad;
- márgenes de seguridad;

- comparación con literatura;
- comparación con fabricantes.

7. Verificación

Antes de aceptar el cálculo deberán verificarse:

- coherencia dimensional;
- consistencia física;
- comparación con casos similares;
- validación mediante software especializado.

B.18 Control de calidad del diseño

Todo proyecto debe incorporar un procedimiento formal de revisión técnica.

Se recomienda aplicar tres niveles de revisión.

Revisión interna

Realizada por el ingeniero responsable.

Objetivos:

- detectar errores matemáticos;
- verificar unidades;
- revisar criterios de diseño.

Revisión interdisciplinaria

Participan especialistas de:

- procesos;
- hidráulica;
- mecánica;
- electricidad;
- instrumentación;
- automatización.

Su finalidad consiste en asegurar la compatibilidad entre disciplinas.

Revisión independiente

Un especialista externo evalúa:

- coherencia general;
- cumplimiento normativo;
- factibilidad constructiva;
- riesgos técnicos.

Este procedimiento reduce significativamente la probabilidad de errores durante la construcción.

B.19 Gestión documental

En proyectos industriales, la documentación puede superar varios miles de documentos técnicos.

Por ello, debe implementarse un sistema de control documental que garantice:

- trazabilidad;
- control de versiones;
- aprobación formal;
- distribución controlada;
- respaldo digital.

Cada documento debe contener, como mínimo:

- código;
- título;
- disciplina;
- número de revisión;
- fecha;
- autor;
- revisor;
- aprobador.

Tabla B.3

Clasificación de la documentación de ingeniería

Disciplina	**Documentos principales**
Procesos	Bases de diseño, PFD, balances, memorias

Disciplina	Documentos principales
Mecánica	Planos, equipos, tuberías, recipientes
Civil	Planos estructurales y cimentaciones
Eléctrica	Diagramas unifilares, tableros, cargas
Instrumentación	P&ID, listas de instrumentos, lazos de control
Automatización	Filosofía de control, lógica PLC, SCADA
Seguridad	HAZOP, SIL, planes de emergencia
Ambiental	Estudios ambientales y monitoreo

Nota. Elaboración propia.

B.20 Competencias del ingeniero de diseño

Proyectar hoy una planta de ósmosis inversa exige reunir profesionales de distintas especialidades.

El ingeniero de diseño debe poseer competencias en:

- química del agua;
- fenómenos de transporte;
- operaciones de separación;
- hidráulica;
- termodinámica;
- selección de materiales;
- diseño mecánico;
- instrumentación y control;
- automatización industrial;
- simulación de procesos;
- análisis económico;
- gestión de proyectos;
- evaluación ambiental;
- seguridad de procesos.

Adicionalmente, resulta recomendable el dominio de herramientas computacionales como:

- Aspen Plus;
- Aspen HYSYS;

- ROSA;
- WAVE;
- IMSDesign;
- AutoCAD Plant 3D;
- AVEVA E3D;
- Python;
- MATLAB;
- Microsoft Excel avanzado.

B.21 Tendencias en la ingeniería de diseño

La ingeniería de las plantas de tratamiento de agua avanza con rapidez hacia metodologías digitales.

Las principales tendencias incluyen:

- Modelado tridimensional (3D).
- Building Information Modeling (BIM).
- Gemelos digitales (Digital Twins).
- Inteligencia artificial aplicada al diseño.
- Automatización del cálculo hidráulico.
- Optimización multiobjetivo.
- Ingeniería colaborativa en la nube.
- Gestión documental digital.
- Integración con sistemas ERP.
- Modelos de mantenimiento predictivo.

Con estas herramientas se acortan los tiempos de diseño, se cometen menos errores y las disciplinas se coordinan mejor.

B.22 Conclusiones del Anexo B

Para diseñar plantas de ósmosis inversa se necesita un método exigente, basado en principios científicos, criterios de ingeniería y documentos técnicos estandarizados. Aplicar con sistema los balances de materia y energía y los cálculos hidráulicos, escoger

bien los equipos y evaluar riesgos permite levantar instalaciones seguras, eficientes y rentables.

Que los cálculos sean precisos no alcanza para que un proyecto tenga calidad. Importan también la consistencia de lo documentado, el seguimiento de cada decisión de diseño y la coordinación entre las disciplinas implicadas. Desde la ingeniería conceptual hasta la operación de la planta, el proyecto se asegura con memorias de cálculo, diagramas de proceso, hojas de datos, especificaciones técnicas y procedimientos de control de calidad.

Por último, lo digital está cambiando la ingeniería: simulación avanzada, modelado tridimensional, automatización, inteligencia artificial y gemelos digitales rehacen el modo de diseñar plantas de tratamiento de agua. Al ingeniero del mañana se le pedirá una base sólida en ciencias de la ingeniería, sumada a análisis de datos, programación y gestión integral de proyectos, para que aporte soluciones sostenibles frente a la seguridad hídrica global.

Referencias recomendadas para el Anexo B

- American Water Works Association. (2023). *Manual of Water Supply Practices: Reverse Osmosis and Nanofiltration*.
- Baker, R. W. (2012). *Membrane Technology and Applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- International Desalination Association. (2024). *Desalination Yearbook*.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (Eds.). (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9th ed.). McGraw-Hill.
- WEF. (2018). *Water Reuse: Manual of Practice*.
- AACE International. (2020). *Cost Estimate Classification System – Recommended Practice No. 18R-97*.
- ISO 10628-1:2014. *Diagrams for the Chemical and Petrochemical Industry – Part 1: Specification of Diagrams*.

- ISA-5.1. (2022). *Instrumentation Symbols and Identification*.

ANEXO C Manual de Simulación y Modelado de Plantas de Ósmosis Inversa

C.1 Introducción

La simulación computacional constituye una de las herramientas más importantes en el diseño moderno de plantas de tratamiento y desalación de agua. Permite evaluar diferentes configuraciones de proceso, optimizar parámetros de operación, estimar consumos energéticos y analizar escenarios sin necesidad de construir instalaciones piloto.

Actualmente, las principales empresas de ingeniería utilizan programas especializados durante las etapas de ingeniería conceptual, básica, FEED e ingeniería de detalle para reducir incertidumbres técnicas y optimizar el desempeño de las plantas.

Los objetivos de la simulación son:

- dimensionar equipos;
- seleccionar membranas;
- estimar recuperaciones;
- calcular consumos energéticos;
- predecir el comportamiento hidráulico;
- evaluar el potencial de incrustación y ensuciamiento;
- optimizar costos de inversión y operación.

C.2 Flujo general de una simulación

Independientemente del software utilizado, una simulación de ósmosis inversa sigue una secuencia metodológica.

Etapa 1. Definición del problema

Se establecen:

- objetivo del proyecto;
- capacidad de producción;
- calidad del agua de alimentación;
- calidad requerida del permeado;
- restricciones operacionales.

Etapa 2. Recolección de información

Se requiere disponer de:

- análisis químico completo del agua;
- temperatura;
- pH;
- SDI;
- sílice;
- alcalinidad;
- dureza;
- TOC;
- microorganismos cuando corresponda.

Los resultados de la simulación serán tan buenos como lo sean estos datos.

Etapa 3. Definición del proceso

Se selecciona la configuración del sistema.

Ejemplo:

Captación

↓

Pretratamiento

↓

Filtros cartucho

↓

Ósmosis inversa

↓

Postratamiento

↓

Almacenamiento

Etapa 4. Simulación

El software calcula automáticamente:

- recuperación;
- rechazo;
- presión requerida;
- flujo;
- consumo energético;
- presión osmótica;
- polarización de concentración;
- índices de incrustación.

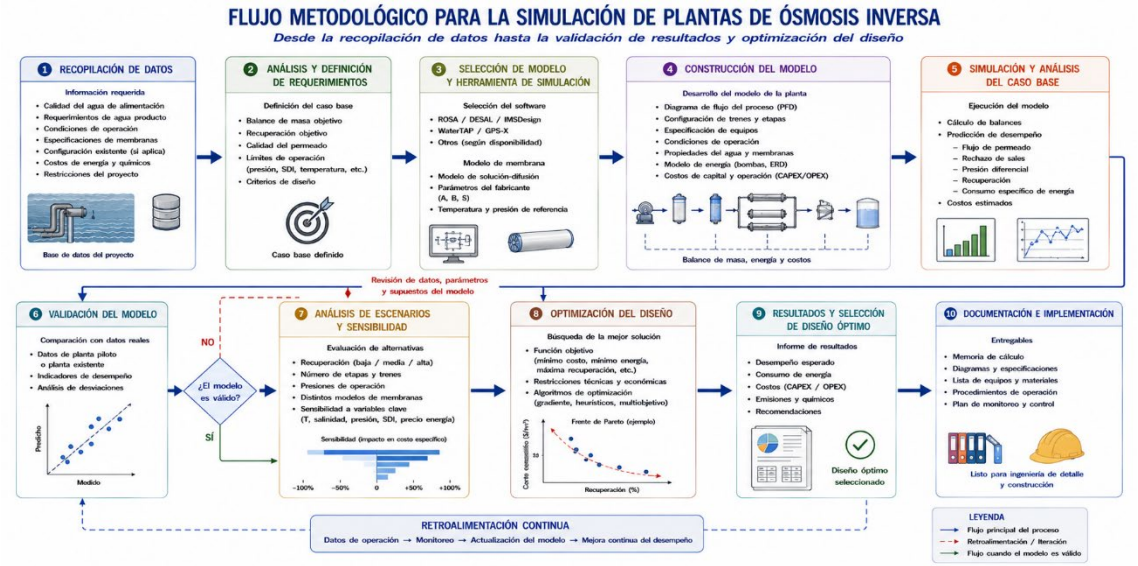
Etapa 5. Validación

Los resultados deberán compararse con:

- datos experimentales;
- plantas similares;
- recomendaciones de fabricantes;
- experiencias operacionales.

Figura C.1

Flujo metodológico para la simulación de plantas de ósmosis inversa.



Nota. Elaboración propia.

C.3 Programas de simulación

Actualmente existen numerosos programas especializados.

Los más utilizados son:

Tabla C.1

Programas de simulación utilizados en ingeniería de membranas y tratamiento de agua.

Software	Aplicación principal
ROSA	Diseño de sistemas RO con membranas FilmTec™
WAVE	Diseño de sistemas con membranas DuPont™
IMSDesign	Diseño con membranas Hydranautics™
TorayDS	Diseño con membranas Toray™
LG Chem Q+	Diseño con membranas LG™
Aspen Plus	Integración con procesos químicos
Aspen HYSYS	Procesos industriales
MATLAB	Modelado matemático
Python	Simulación y optimización personalizada

Nota. La disponibilidad de funciones depende de la versión y licencia de cada software.

C.4 Simulación con ROSA

ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) está entre los programas que más se emplean para diseñar plantas de ósmosis inversa.

Permite:

- seleccionar membranas;
- calcular recuperación;
- estimar presión;
- analizar el flujo por elemento;
- verificar límites operacionales;
- estimar frecuencia de limpieza.

Información requerida

- composición química del agua;
- temperatura;
- producción requerida;
- recuperación;

- configuración de membranas.

Resultados obtenidos

- presión de alimentación;
- caudal de permeado;
- concentración del concentrado;
- rechazo de sales;
- flujo por membrana;
- consumo específico.

C.5 Simulación con WAVE

WAVE permite analizar sistemas completos de tratamiento de agua.

Puede integrar:

- ultrafiltración;
- nanofiltración;
- ósmosis inversa;
- intercambio iónico.

Entre sus principales ventajas destacan:

- evaluación de múltiples escenarios;
- comparación de membranas;
- análisis económico;
- optimización del consumo energético.

C.6 Simulación con IMSDesign

IMSDesign facilita el diseño de sistemas de membranas considerando:

- recuperación;
- presión;
- número de elementos;
- configuración hidráulica;
- potencial de incrustación.

Es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y municipales.

C.7 Modelado en Aspen Plus

Aspen Plus permite integrar la planta de ósmosis inversa con procesos industriales.

Ejemplos:

- centrales termoeléctricas;
- refinerías;
- plantas petroquímicas;
- producción de hidrógeno;
- sistemas Zero Liquid Discharge.

Entre sus aplicaciones se incluyen:

- balances de materia;
- balances de energía;
- integración térmica;
- análisis económico;
- optimización del proceso.

C.8 Simulación mediante Python

Gracias a su flexibilidad y a la variedad de bibliotecas científicas que ofrece, Python ya es una de las herramientas centrales de la ingeniería moderna.

Las aplicaciones incluyen:

- balances de materia;
- cálculos hidráulicos;
- dimensionamiento preliminar;
- simulación de membranas;
- optimización matemática;
- análisis estadístico;
- inteligencia artificial;
- mantenimiento predictivo.

Bibliotecas recomendadas:

- NumPy;
- SciPy;
- Pandas;
- Matplotlib;
- Plotly;
- Scikit-learn;
- TensorFlow;
- Pyomo.

C.9 Metodología para desarrollar un modelo propio

Cuando el proyecto presenta características particulares, puede desarrollarse un modelo específico.

Se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Definir el objetivo del modelo.
2. Identificar las variables de entrada.
3. Establecer las ecuaciones del proceso.
4. Implementar el modelo computacional.
5. Validar con datos experimentales.
6. Realizar análisis de sensibilidad.
7. Documentar el modelo.
8. Actualizar periódicamente los parámetros.

C.10 Validación de modelos

Todo modelo debe validarse antes de utilizarse para el diseño.

Los principales criterios son:

- comparación con datos reales;
- análisis estadístico del error;
- consistencia física;
- reproducibilidad.

Entre los indicadores utilizados se encuentran:

- Error Medio Absoluto (MAE);
- Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE);
- Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE);
- Coeficiente de Determinación (R^2).

Tabla C.2

Indicadores recomendados para la validación de modelos

Indicador	Aplicación
MAE	Error absoluto promedio
RMSE	Penaliza errores grandes
MAPE	Error relativo
R^2	Calidad del ajuste

Nota. La selección del indicador debe realizarse considerando el tipo de variable y el objetivo del modelo.

C.11 Análisis de sensibilidad

Con el análisis de sensibilidad se descubre qué variables afectan más el desempeño del sistema.

En plantas de ósmosis inversa suelen evaluarse:

- temperatura;
- recuperación;
- presión;
- SDI;
- concentración de sales;
- flujo de diseño;
- eficiencia de bombas.

Saber esto ayuda a optimizar el diseño y a decidir qué estrategias de control atender primero.

C.12 Optimización del proceso

Una vez validado el modelo, puede utilizarse para optimizar la planta.

Los objetivos más frecuentes son:

- minimizar el consumo específico de energía;

- maximizar la recuperación;
- minimizar el consumo de productos químicos;
- prolongar la vida útil de las membranas;
- reducir el costo del agua producida.

Las técnicas de optimización incluyen:

- programación lineal;
- programación no lineal;
- algoritmos genéticos;
- optimización por enjambre de partículas;
- optimización multiobjetivo.

C.13 Integración con inteligencia artificial

Algoritmos de aprendizaje automático pueden sumarse a los modelos de simulación con fines como:

- predicción de fouling;
- predicción de scaling;
- mantenimiento predictivo;
- detección automática de anomalías;
- optimización en tiempo real.

Unir modelos físico-químicos con inteligencia artificial es hoy una de las corrientes más fuertes en la ingeniería del agua.

Conclusiones del Anexo C

Hoy no se concibe diseñar una planta de ósmosis inversa sin simulación. Permite recortar incertidumbres, perfeccionar las configuraciones del proceso y contrastar distintos escenarios antes de levantar la instalación. Eso sí, el criterio del ingeniero no lo reemplaza ningún modelo computacional; lo que resulte dependerá de que los datos de entrada sean confiables, de que las hipótesis estén bien elegidas y de validar con información experimental u operacional.

La tendencia actual apunta a reunir en plataformas digitales los modelos mecanísticos, la simulación de procesos, el análisis estadístico y la inteligencia artificial,

de modo que respalden diseño, operación y mantenimiento predictivo de las plantas. Esta convergencia tecnológica traerá sistemas de tratamiento más eficientes, resilientes y sostenibles, listos para una demanda en aumento, un clima variable y normas ambientales más exigentes.

ANEXO D Biblioteca Profesional de Ingeniería para Plantas de Ósmosis Inversa

D.1 Introducción

Un proyecto de planta de ósmosis inversa se apoya en una larga lista de documentos técnicos. Con ellos se construye la instalación, se la pone en marcha, se la opera y se le da mantenimiento.

Estos documentos deben cumplir principios de:

- uniformidad;
- trazabilidad;
- control documental;
- revisión interdisciplinaria;
- cumplimiento normativo.

El presente anexo presenta la estructura recomendada de los principales documentos de ingeniería utilizados internacionalmente.

D.2 Bases de Diseño (Basis of Design)

Las Bases de Diseño constituyen el documento principal del proyecto.

Toda decisión posterior deberá ser consistente con este documento.

Contenido recomendado

1. Información general

- Nombre del proyecto.
- Cliente.
- Ubicación.
- Objetivos.
- Alcance.

2. Condiciones ambientales

- Temperatura.
- Humedad.
- Viento.

- Sismicidad.
- Corrosividad ambiental.

3. Caracterización del agua

- Análisis químico.
- SDI.
- Turbidez.
- TOC.
- Microbiología.
- Variaciones estacionales.

4. Agua producto

- Calidad requerida.
- Normativa aplicable.
- Producción.

5. Condiciones de operación

- Recuperación.
- Disponibilidad.
- Vida útil.
- Consumo específico esperado.

Tabla D.1

Índice recomendado para las Bases de Diseño

Sección	Contenido
1	Información general
2	Bases del proyecto
3	Caracterización del agua
4	Criterios de diseño
5	Restricciones
6	Normativa
7	Condiciones ambientales
8	Filosofía operacional

Nota. Elaboración propia.

D.3 Lista Maestra de Equipos (Master Equipment List)

Cada equipo recibe un código único.

Ejemplo:

Código	Equipo
P-101	Bomba de alimentación
P-102	Bomba de alta presión
UF-101	Ultrafiltración
RO-101	Tren de ósmosis inversa 1
RO-102	Tren de ósmosis inversa 2
ERD-101	Intercambiador isobárico
TK-101	Tanque CIP
TK-102	Tanque de permeado
HX-101	Intercambiador de calor

Hay que conservar la codificación a lo largo de toda la vida del proyecto.

D.4 Hojas de datos de equipos (Equipment Data Sheets)

Cada equipo principal dispone de una hoja técnica.

Ejemplo: Bomba de alta presión

Información mínima:

- código;
- fabricante;
- modelo;
- caudal;
- altura manométrica;
- presión de descarga;
- eficiencia;
- potencia;
- velocidad;
- NPSH requerido;
- materiales de construcción;
- tipo de sello;
- motor eléctrico;
- normas de fabricación.

Ejemplo: Membranas

La hoja técnica debe incluir:

- fabricante;
- modelo;
- área efectiva;
- flujo nominal;
- rechazo nominal;
- presión máxima;
- intervalo de pH;
- temperatura máxima;
- concentración máxima de cloro;
- procedimientos de limpieza.

D.5 Lista de líneas (Line List)

Cada línea de proceso debe identificarse mediante un código.

Ejemplo:

Línea	Servicio	Material	Diámetro	Presión
L-101	Agua cruda	HDPE	600 mm	6 bar
L-102	Agua filtrada	Acero inoxidable 316L	500 mm	8 bar
L-103	Alimentación RO	Acero inoxidable dúplex	400 mm	70 bar
L-104	Permeado	PVC-U	300 mm	5 bar
L-105	Concentrado	Dúplex	350 mm	68 bar

D.6 Índice de instrumentos (Instrument Index)

Todos los instrumentos deben registrarse.

Ejemplo:

Código	Variable	Tipo
PT-101	Presión	Transmisor
PI-102	Presión	Indicador
FT-201	Caudal	Transmisor
FI-202	Caudal	Indicador
TT-301	Temperatura	Transmisor
CT-401	Conductividad	Analizador
pHT-501	pH	Analizador

Sobre este documento se construye el sistema de control.

D.7 Filosofía de control

La filosofía de control describe el comportamiento esperado de la planta.

Debe incluir:

Arranque

Secuencia automática.

Verificaciones previas.

Permisos de operación.

Operación normal

Control de presión.

Control de recuperación.

Control de caudal.

Control de conductividad.

Parada normal

Secuencia controlada.

Lavado de membranas.

Protección de bombas.

Parada de emergencia

Falla eléctrica.

Alta presión.

Baja presión.

Incendio.

Sismo.

D.8 Matriz de alarmas

Las alarmas deben clasificarse según su criticidad.

Prioridad	Acción
Alta	Parada inmediata
Media	Atención del operador

Prioridad	Acción
Baja	Registro para seguimiento

Ejemplos:

Alta presión.

Alta conductividad.

Baja presión de alimentación.

Falla del recuperador de energía.

Falla de bomba.

Temperatura elevada.

D.9 Matriz Causa–Efecto

Entre los documentos del sistema de control, la matriz Causa–Efecto es de los más importantes.

Ejemplo:

Evento	Acción automática
Alta presión	Detener bomba HP
Baja presión	Detener sistema
Alta conductividad	Desviar permeado
Incendio	Parada total
Falla eléctrica	Activar generador

D.10 Procedimiento FAT

El Factory Acceptance Test (FAT) verifica los equipos antes del envío.

Debe comprobar:

- funcionamiento mecánico;
- instrumentación;
- automatización;
- documentación;
- pruebas eléctricas;
- certificaciones.

D.11 Procedimiento SAT

El Site Acceptance Test (SAT) verifica:

- instalación;
- alineamiento;
- instrumentación;
- cableado;
- comunicaciones;
- operación en sitio.

D.12 Procedimiento de puesta en marcha (Commissioning)

La puesta en marcha comprende:

Etapa mecánica

Inspección.

Limpieza.

Pruebas hidrostáticas.

Alineamiento.

Etapa eléctrica

Pruebas de aislamiento.

Sentido de giro.

Protecciones.

Etapa instrumental

Calibración.

Lazos de control.

SCADA.

Etapa hidráulica

Lavado.

Pruebas de presión.

Pruebas de estanqueidad.

Etapa operacional

Carga progresiva.

Ajuste de recuperación.

Optimización.

Pruebas de desempeño.

D.13 Documentación As-Built

Finalizada la construcción deben actualizarse todos los documentos.

La documentación As-Built comprende:

- PFD finales;
- P&ID finales;
- planos civiles;
- planos eléctricos;
- planos mecánicos;
- listas de equipos;
- listas de instrumentos;
- manuales de operación;
- manuales de mantenimiento;
- certificados de pruebas.

Tabla D.2

Documentación mínima para la entrega de una planta

Documento	Entrega
PFD As-Built	✓
P&ID As-Built	✓
Manual de operación	✓
Manual de mantenimiento	✓
Data Sheets	✓
Lista de equipos	✓
Lista de instrumentos	✓
Certificados FAT/SAT	✓
Protocolos de pruebas	✓
Garantías	✓

Nota. Elaboración propia.

D.14 Gestión del conocimiento

Una vez concluido el proyecto, es recomendable consolidar las lecciones aprendidas mediante un informe técnico que incluya:

- principales problemas encontrados;
- modificaciones realizadas durante la construcción;
- desviaciones respecto al diseño original;
- resultados de las pruebas de desempeño;
- recomendaciones para futuras ampliaciones.

Este proceso facilita la mejora continua y reduce riesgos en proyectos posteriores.

Conclusiones del Anexo D

Toda ingeniería de plantas de ósmosis inversa gira en torno a su documentación técnica. Si está bien hecha, mantiene alineadas a las disciplinas, hace más fácil la construcción, simplifica el arranque y sirve de apoyo firme a la operación y al mantenimiento durante años.

Al estandarizar documentos tales como diagramas de proceso, hojas de datos, matrices de control, listas de equipos e instrumentos, procedimientos de aceptación y Bases de Diseño, se eleva la calidad del proyecto, bajan los errores y se puede rastrear cada decisión de ingeniería.

Dado que hoy la ingeniería se digitaliza, conviene integrar estas herramientas con sistemas de gestión documental, plataformas BIM, gemelos digitales y modelos de datos interoperables. Con ello las disciplinas trabajan en equipo con mayor eficiencia y el ciclo de vida de la infraestructura se gestiona mejor.

ANEXO E Compendio de Normas Técnicas Aplicables al Diseño, Construcción y Operación de Plantas de Ósmosis Inversa

E.1 Introducción

Quien diseña u opera plantas de tratamiento y desalación de agua debe cumplir numerosas normas nacionales e internacionales. Ellas aseguran que las instalaciones sean seguras, de calidad, confiables y sostenibles.

Ninguna norma regula por sí sola todos los aspectos de una planta de ósmosis inversa. Por ello, el ingeniero debe integrar documentos técnicos provenientes de diferentes organizaciones de normalización, asociaciones profesionales y organismos reguladores.

En este anexo se presenta una guía práctica con las normas más empleadas, señalando dónde se aplican y para qué sirven en cada fase del proyecto.

E.2 Clasificación general de las normas

Las normas pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Calidad del agua.
- Diseño de procesos.
- Materiales.
- Tuberías y recipientes a presión.
- Bombas.
- Instrumentación y automatización.
- Electricidad.
- Seguridad industrial.
- Gestión ambiental.
- Construcción.
- Operación y mantenimiento.

E.3 Principales organismos de normalización

Tabla E.1

Organismos internacionales de normalización relevantes para proyectos

Organismo	País/Ámbito	Aplicación principal
ISO	Internacional	Sistemas de gestión, calidad, medio ambiente, ensayos y documentación técnica
ASTM International	Internacional	Métodos de ensayo y especificaciones de materiales
ASME	Estados Unidos	Diseño mecánico, recipientes a presión, tuberías y calderas
ANSI	Estados Unidos	Normalización técnica y coordinación de estándares
AWWA	Internacional	Diseño, operación y mantenimiento de sistemas de agua potable
WEF	Internacional	Tratamiento y reúso de aguas residuales
ISA	Internacional	Instrumentación, automatización y control
IEC	Internacional	Equipos eléctricos y electrónicos
IEEE	Internacional	Sistemas eléctricos y automatización
API	Internacional	Equipos para la industria del petróleo, gas y energía
NFPA	Internacional	Protección contra incendios y seguridad
NACE / AMPP	Internacional	Corrosión y protección de materiales
IDA	Internacional	Desalación y reúso de agua

Nota. La selección de normas depende de la legislación nacional, las especificaciones del cliente y los requisitos contractuales.

E.4 Normas para calidad del agua

Organización Mundial de la Salud (OMS)

Aplicación:

- calidad del agua potable;
- criterios sanitarios;
- parámetros microbiológicos;
- parámetros químicos.

Se utiliza como referencia internacional para definir los requisitos del agua producto.

ISO 5667

Aplicación:

- muestreo de agua;
- preservación de muestras;
- transporte;
- procedimientos de análisis.

Resulta indispensable al caracterizar el agua de alimentación y al monitorear la operación.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

Publicado por APHA, AWWA y WEF.

Aplicación:

- métodos analíticos;
- laboratorio;
- control de calidad;
- validación de resultados.

Es la referencia mundial para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos del agua.

E.5 Normas para materiales

ASTM

Las normas ASTM se utilizan para especificar:

- aceros inoxidables;
- plásticos;
- polímeros;
- elastómeros;
- pinturas;
- revestimientos;
- materiales compuestos.

Ejemplos frecuentes:

- ASTM A240 (placas de acero inoxidable).
- ASTM A312 (tuberías de acero inoxidable).
- ASTM D1785 (tuberías de PVC).

E.6 Normas para recipientes a presión y tuberías

ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)

Aplicación:

- recipientes a presión;
- tanques;
- intercambiadores;
- pruebas hidrostáticas.

ASME B31.3

Aplicación:

- tuberías de proceso.

Incluye:

- diseño;
- fabricación;
- inspección;
- pruebas.

ASME B36

Aplicación:

- dimensiones de tuberías.

E.7 Normas para bombas

ANSI/HI (Hydraulic Institute)

Aplicación:

- selección de bombas;
- curvas de operación;
- NPSH;
- vibraciones;
- eficiencia.

Estas normas son ampliamente utilizadas para el dimensionamiento de bombas de alimentación y alta presión.

E.8 Normas para válvulas

Normas relevantes:

- API 600.

- API 602.
- API 608.
- API 609.
- API 598 (inspección y pruebas).

Aplicación:

- válvulas de compuerta;
- válvulas de bola;
- válvulas mariposa;
- válvulas de retención.

E.9 Normas para instrumentación

ISA-5.1

Aplicación:

- identificación de instrumentos;
- simbología;
- elaboración de P&ID.

Es la norma de referencia para diagramas de instrumentación.

IEC 61511

Aplicación:

- sistemas instrumentados de seguridad (SIS).

IEC 61131

Aplicación:

- programación de PLC.

E.10 Normas para instalaciones eléctricas

IEC 60364

Diseño de instalaciones eléctricas.

IEEE

Aplicación:

- motores;
- protecciones;
- transformadores;
- coordinación eléctrica.

NFPA 70 (National Electrical Code)

Aplicación:

- instalaciones eléctricas industriales;
- seguridad.

E.11 Normas para gestión ambiental

ISO 14001

Sistema de gestión ambiental.

Aplicación:

- construcción;
- operación;
- auditorías ambientales.

ISO 14040 e ISO 14044

Aplicación:

- análisis de ciclo de vida (LCA).

E.12 Normas para gestión de calidad

ISO 9001

Aplicación:

- diseño;
- fabricación;
- construcción;
- operación.

Permite establecer un sistema de gestión de calidad documentado.

E.13 Normas para seguridad y salud ocupacional

ISO 45001

Aplicación:

- seguridad industrial;
- prevención de accidentes;
- gestión de riesgos laborales.

E.14 Normas para corrosión

AMPP (antes NACE)

Aplicación:

- selección de materiales;
- protección catódica;
- corrosión marina;
- recubrimientos.

Resulta esencial en plantas desalinizadoras debido al ambiente altamente corrosivo.

E.15 Normas para documentación de ingeniería

ISO 10628

Diagramas de proceso.

Aplicación:

- elaboración de PFD.

ISO 14617

Símbolos gráficos para diagramas técnicos.

ISA-5.1

P&ID e instrumentación.

E.16 Normas para proyectos

PMI – PMBOK®

Aplicación:

- planificación;
- cronograma;

- costos;
- riesgos;
- adquisiciones;
- gestión de interesados.

Sin ser una norma de diseño, se usa mucho como referencia para gestionar proyectos de ingeniería.

Tabla E.2

Resumen de normas según la etapa del proyecto

Etapa	Normas principales
Caracterización del agua	ISO 5667, Standard Methods, OMS
Diseño del proceso	AWWA, WEF, IDA
Materiales	ASTM, AMPP
Equipos mecánicos	ASME, ANSI/HI, API
Instrumentación	ISA, IEC
Electricidad	IEC, IEEE, NFPA
Gestión de calidad	ISO 9001
Gestión ambiental	ISO 14001, ISO 14040
Seguridad	ISO 45001, IEC 61511
Gestión del proyecto	PMBOK®

Nota. La normativa específica deberá seleccionarse considerando la legislación del país donde se ejecutará el proyecto, los requisitos contractuales y las especificaciones del cliente.

E.17 Recomendaciones para el ingeniero proyectista

Durante el desarrollo de un proyecto se recomienda:

- definir desde el inicio la normativa aplicable;
- evitar combinar versiones incompatibles de una misma norma;
- verificar periódicamente las actualizaciones emitidas por los organismos de normalización;
- documentar en las Bases de Diseño todas las normas adoptadas;
- mantener una matriz de cumplimiento normativo durante todo el proyecto.

Conclusiones del Anexo E

Las normas técnicas, bien aplicadas, son uno de los pilares del diseño de plantas de ósmosis inversa. Dan pautas uniformes para elegir materiales, dimensionar equipos,

preparar la documentación técnica, gestionar la calidad, resguardar la seguridad de procesos y proteger el ambiente.

El ingeniero debe tener claro que una norma no desplaza su criterio profesional: más bien delimita el marco donde se decide el diseño. Integrar y seleccionar bien los estándares internacionales hace que las disciplinas interoperen, rebaja los riesgos técnicos y contractuales, facilita ejecutar el proyecto y ayuda a conseguir instalaciones seguras, eficientes y sostenibles.