

Purificación y desalación de aguas mediante membranas

Autores: PhD. Aldo Saavedra Fenoglio, Universidad de Santiago de Chile;
PhD. Hugo Valdés Riquelme, Universidad Católica del Maule, Talca; y, PhD. Carlos Zúñiga Espinoza, INIA La Cruz.

INFORMATIVO INIA LA CRUZ N° 039

DOCUMENTO TÉCNICO INIA - CNR N° 39, AÑO 2022

Introducción

Los procesos de desalación tienen como objetivo producir agua con menor contenido salino a partir de aguas salobre o saladas. La planta desaladora es alimentada con agua cruda (agua salada o salobre), e independiente del tipo de proceso fracciona la alimentación en un producto purificado (salinidad baja o muy baja) y en un concentrado o rechazo (agua más el conjunto de solutos que fueron separados). A nivel mundial, las desaladoras producen sobre 110 Mton de producto destinado preferentemente a consumo humano (55%), y se estima que el 5% se utiliza en riego agrícola tecnificado.

La desalación a escala comercial se basa en dos tipos de procesos: térmica y por membranas. La desalación térmica utiliza cambios de fase para obtener agua purificada. Existen dos tipos de procesos térmicos: (1) evaporación con la consiguiente condensación del agua de una solución salina acuosa (destilación flash multietapa (MSF) y destilación multiefecto (MED)), y (2) congelación del agua de una solución salina, lo que provoca la formación de sólidos libres de solutos (sales). Por otro lado, la desalación por membrana utiliza una barrera física selectiva para obtener agua purificada, donde las principales tecnologías comerciales son: osmosis inversa y nanofiltración.

En este informativo se describen las características de la desalación por osmosis inversa (Figura 1).

Osmosis inversa (OI)

La OI es la tecnología de mayor eficiencia energética para la desalación, con consumos de energía menores de 3,0 kWh/m³. La Figura 2 muestra el proceso de desalación, operando a temperatura ambiente sin necesidad de cambios de fase como ocurre con los procesos térmicos. En la OI, una fracción del agua salada es conducida bajo presión a través de una membrana polimérica semipermeable. La presión aplicada debe exceder la presión osmótica de la corriente de concentrado. Además, la alimentación fluye tangencialmente a la superficie de la membrana, mientras el permeado es extraído en forma perpendicular a la misma. Esta modalidad se denomina "filtración con flujo tangencial" o "crossflow filtration", que es mucho más eficiente que la "filtración convencional".

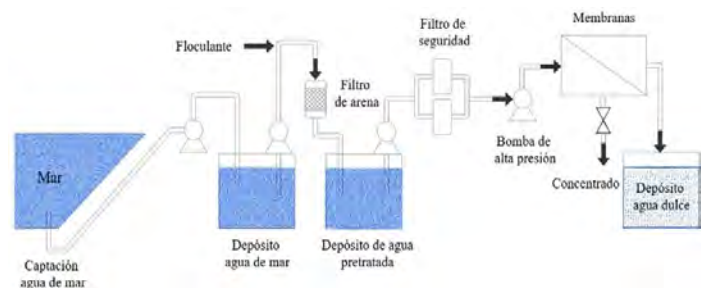


Figura 2. Diagrama genérico de una planta de OI.

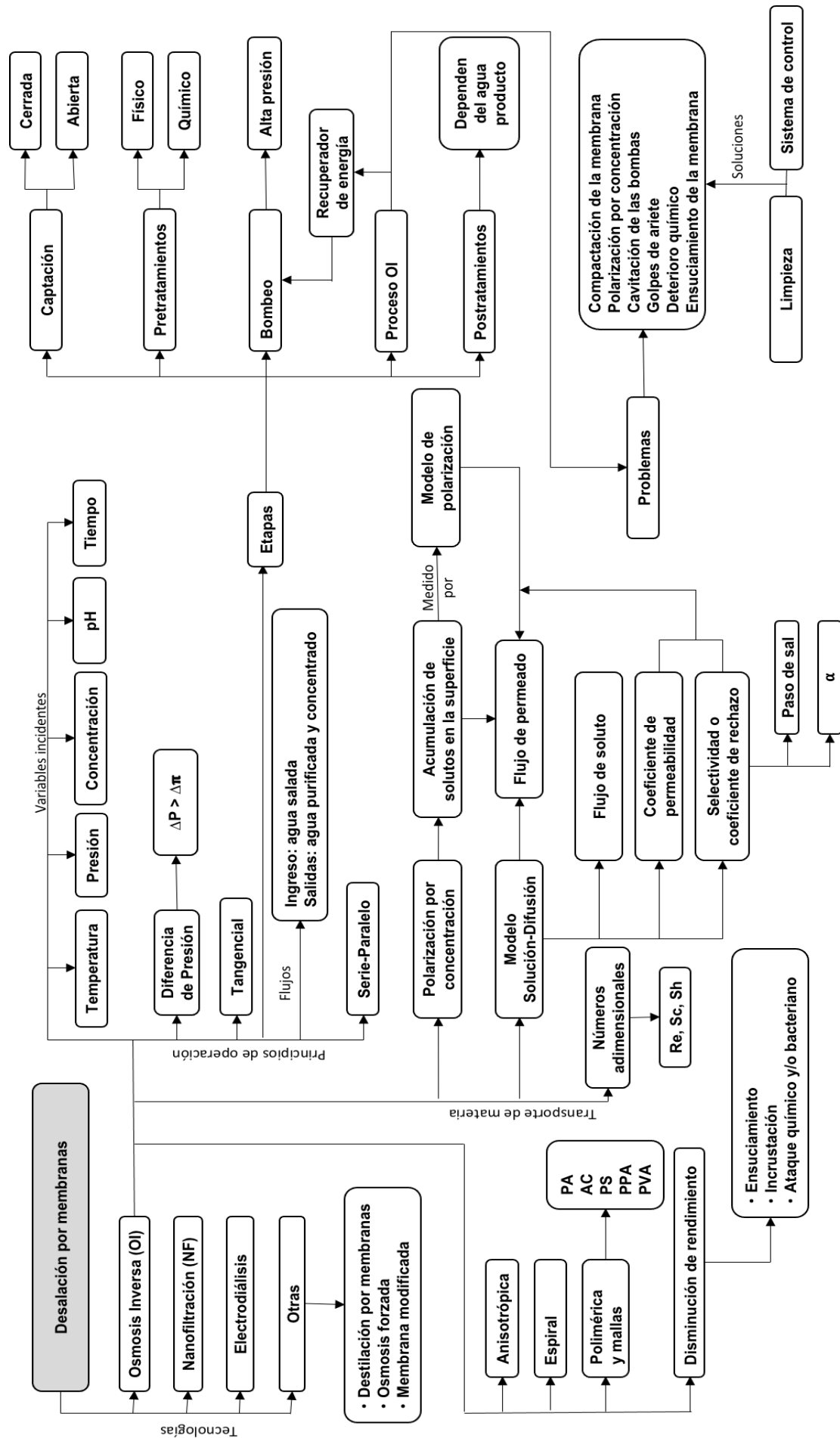


Figura 1. Mapa conceptual de la desalación por membrana enfocado en la osmosis inversa.

Componentes de una planta de osmosis inversa

Independientemente del uso final del agua purificada por OI, el proceso de desalación se compone de las cuatro etapas siguientes (ver Figura 3):

- Captación de la alimentación (agua cruda).
- Pretratamientos físicos y químicos.
- Bombeo presurizado de la alimentación y proceso de OI.
- Postratamientos del agua purificada.

El diseño técnico de cada una de estas etapas depende esencialmente del tipo y características fisicoquímicas del agua cruda (salobre o salada).

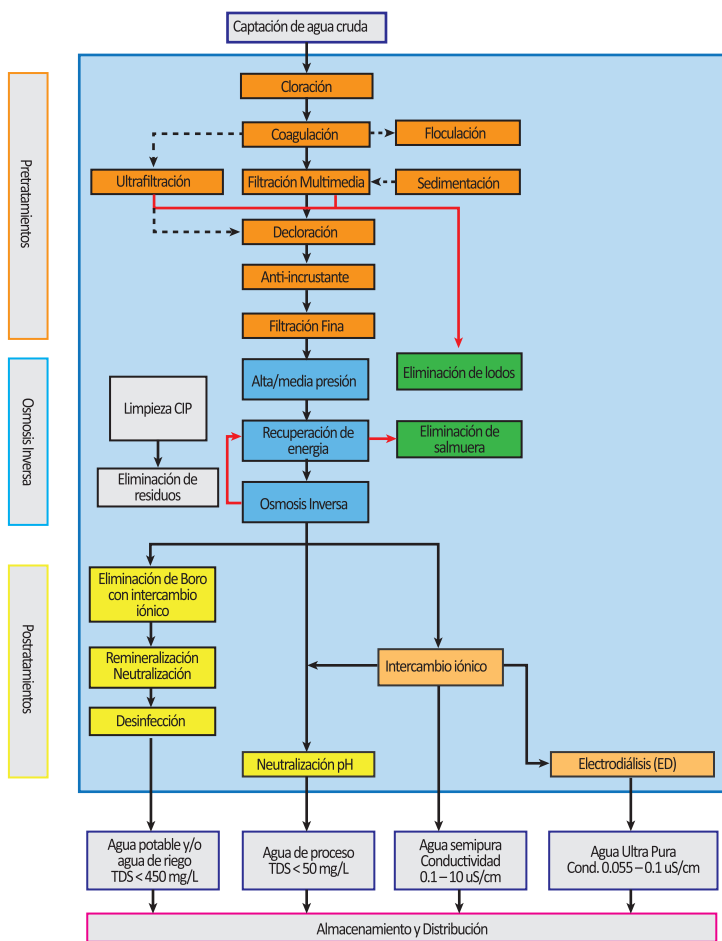


Figura 3. Esquema general del proceso de obtención de agua a partir de OI.

La modalidad de la captación de agua depende tanto de la localización como del caudal de extracción de agua cruda. Existen dos tipos principales de captación: cerrada y abierta o superficial. La captación cerrada se realiza de dos formas diferentes: mediante pozos aislados o utilizando una cámara común. En desalación de aguas salobres es común el uso de pozos aislados. Las tecnologías para captación cerrada más comunes son: pozos verticales, pozos horizontales, pozos inclinados, pozos horizontales con perforación dirigida, pozos radiales horizontales y galerías de infiltración con medio filtrante. Por otro lado, la captación abierta se realiza de dos formas distintas: empleando una toma de agua superficial (captación abierta directa) o una toma de agua sumergida (inmisario o domo sumergido).

Las operaciones de pretratamiento permiten adecuar las características fisicoquímicas y biológicas del agua cruda a las necesidades del proceso de desalación, evitando la corrosión, la formación de incrustaciones o ensuciamiento (scaling y fouling) y el deterioro prematuro de los equipos, fundamentalmente bombas y membranas. Los pretratamientos son una parte fundamental del proceso de desalación, y su diseño condiciona de una manera importante las inversiones, los costos de mantenimiento y de operación de la planta desaladora. Los pretratamientos (Figura 4) más empleados y sus características principales son:

- La filtración convencional, permite eliminar partículas y sólidos en suspensión (0,1–100 µm) para reducir la turbidez.
- La coagulación–floculación, evita la precipitación de material suspendido sobre las membranas, agrupando coloides orgánicos e inorgánicos que se encuentran en el agua cruda. Esto se logra mediante la adición de reactivos químicos tales como polielectrolitos o sales de hierro.
- La clarificación o sedimentación, permite retener/separar los floculos de coloides formados en la etapa de coagulación–floculación.
- La flotación, permite que las partículas, las células de algas, el aceite y la grasa que no pueden eliminarse por sedimentación, sean flotadas y eliminadas.
- La ultrafiltración y la microfiltración, el pequeño tamaño de poros de estas membranas y medios filtrantes, entre 0,01 y 5 µm absolutos evitan el paso de material particulado que puede dañar la bomba de alta presión y las membranas de osmosis inversa. El uso de membranas de ultrafiltración otorga seguridad al equipo pero tiene el inconveniente de que se incurre en costos mayores razón por la cual su espacio está sólo reservado en la desalación de grandes volúmenes de agua de mar.

- El intercambio iónico, sus resinas permiten disminuir el contenido de dureza de la alimentación, y algunos compuestos que son pobremente rechazados por las membranas, tales como boro y arsénico.
- La precipitación, permite disminuir la concentración de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} en aguas muy duras, evitando la incrustación de las membranas por carbonatos y sulfatos insolubles.
- La acidificación, disminuye la incrustación de carbonato de calcio en las membranas, reduce la velocidad de oxidación del ion ferroso y ralentiza la velocidad de hidrólisis de las membranas. Para tal efecto, se utilizan ácidos minerales, tal como ácido sulfúrico, los cuales se dosifican de manera continua en la línea de la alimentación.
- La adición de anti-incrustantes, que evita la precipitación de sales poco solubles sobre las membranas. Se utilizan reactivos dispersantes, químicamente compatibles con las membranas.
- La desinfección, permite disminuir la actividad biológica, evitando que los microorganismos proliferen en ductos, filtros, módulos de membranas y portamembranas. Se utilizan reactivos oxidantes, tales como el hipoclorito de sodio.
- La dechloración, etapa necesaria para evitar que las membranas se expongan al cloro residual u otros agentes oxidantes que pudieran estar presentes en el agua de alimentación. Se utilizan agentes reductores como el bisulfito sódico.

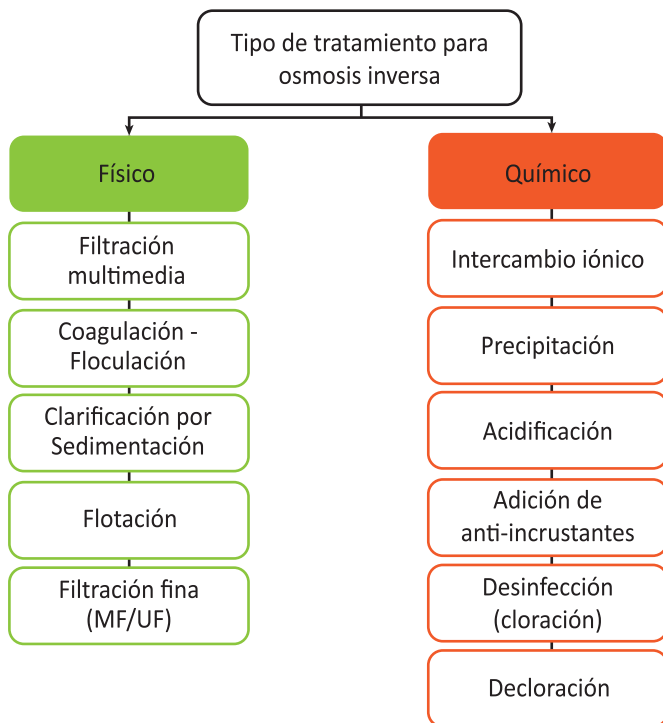


Figura 4. Esquema de los tipos de pretratamiento del agua cruda en OI.

El agua pretratada es a continuación impulsada por una bomba de alta presión para hacer su ingreso a los bancos o bastidores de membranas. Esta es la etapa que consume más energía, por esto es muy importante seleccionar la bomba en función de: (1) rendimiento, (2) mantenimiento, (3) nivel de ruido, (4) presión de bombeo y (5) caudal de producción. Las bombas de alta presión pueden ser de dos tipos: bombas de desplazamiento positivo o alternativas y bombas centrífugas. Las bombas pueden operar a presiones altas cercanas a 60-70 bar para agua de mar y 10-25 bar para agua salobre. En estos rangos de presión, la potencia está entre 4 y 100 hp.

Posterior a la bomba de alta presión el flujo ingresa a los bancos o bastidores de membranas. Aquí se encuentra la etapa más relevante y crítica de la planta desaladora, puesto que es aquí donde se produce el proceso de desalación. Las membranas espirales (módulos) se instalan en el interior de portamembranas o tubos de presión. En un tubo de presión se suelen colocar entre 3 a 8 membranas, las que se conectan entre si instalando tubos colectores de permeado para formar un conjunto estanco. Los módulos se disponen en arreglos en serie o en paralelo (ver Figura 5), diseño que debe ser previamente calculado con el objetivo de obtener la mayor producción posible de agua purificada. Los módulos comerciales más empleados son de geometría espiral (spiral wound). Sus dimensiones están estandarizadas en términos de diámetro y longitud nominal, lo que permite emplear y combinar módulos de diferente procedencia en una planta de osmosis. Diversas empresas fabrican y comercializan membranas, entre ellas Hydranautics, KOCH Membrane, Dow FilmTec, GE Membrane (Osmonics), Toray, Nitto, LGChem y CSM Membrane, entre otras.

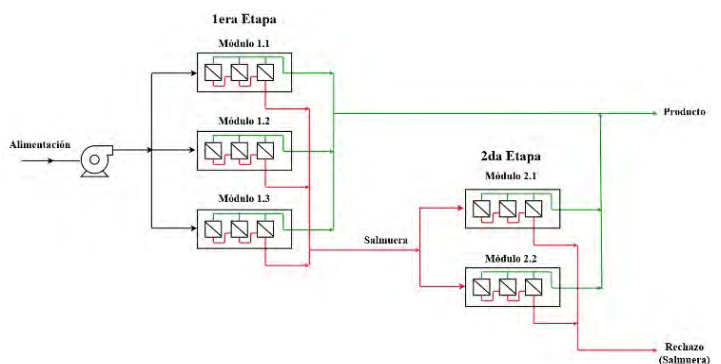


Figura 5. Esquema genérico de una planta OI.

Una fracción importante de los costos de operación en OI corresponde a la energía eléctrica consumida para el bombeo a alta presión. Para minimizar este consumo se han desarrollado los denominados recuperadores de energía cuya función es recuperar una fracción de la energía que posee el rechazo, en forma de presión y cinética, a la salida del concentrado. Existen diferentes tipos de recuperadores de energía: turbinas Pelton o de impulsión, conversores hidráulicos centrífugos y conversores hidráulicos dinámicos. La turbina Pelton utiliza la energía de presión de la corriente de rechazo para transformarla en energía cinética, bajo forma de un flujo de líquido que circula a alta velocidad. El convertidor hidráulico centrífugo (turbocharger) consta de dos zonas diferenciadas: lado de la bomba y lado de la turbina, unidas por un eje común. El rotor de la turbina extrae la energía hidráulica de la corriente de rechazo y la convierte en energía mecánica. El rotor que funciona como bomba, convierte la energía producida por la turbina en presión y el flujo de alimentación es llevado al módulo de OI. El convertidor hidráulico dinámico (CHD) utiliza cilindros o tuberías para transformar la presión del rechazo en presión de la solución de aportación. El recuperador ERI-PX es el CHD más utilizado, tiene eficiencia cercana al 98%, lo cual permite reducir la energía consumida por la OI entre 50% y 60%.

Finalmente, los postratamientos del agua desalada garantizan las condiciones adecuadas del producto, según sea para uso potable, riego, procesos, producción de vapor, etc (ver Tabla 1). El permeado debe ser normalmente acondicionado para cumplir con las características de calidad normadas. Al respecto, el agua producida tiene un pH levemente ácido, una concentración de SDT entre 70 y 350 mg/L, predominantemente sales monovalentes, un bajo contenido de carbonatos de calcio y magnesio. El boro y el arsénico es rechazado entre 50 y 70%. Para el caso de agua para riego se deberá considerar el contenido mineralógico del permeado, ajustar el índice RAS (relación de adsorción de sodio), y abatir el exceso de boro y arsénico que no fue rechazado por las membranas. La RAS y la conductividad eléctrica permiten cuantificar el equilibrio iónico entre sodio, calcio y magnesio, para asegurar una buena filtración/permeabilidad del suelo. El nivel de boro se mitiga con resinas específicas de intercambio iónico y luego se remineraliza.

Tabla 1. Resumen de los postratamientos según tipo de agua producto. Fuente: (Lenntech, s.f.).

Proceso	Agua potable	Agua de regadío	Agua de proceso
Eliminar Cloruro sódico	2º paso OI (BW or SW)*	–	2º paso OI (BW or SW)*
Añadir Calcio/Magnesio	Remineralización	Remineralización	–
Neutralizar pH +/-7	Inyección NaOH / HCl	Inyección NaOH / HCl	Inyección NaOH / HCl
Eliminar Boro	Inyección de soda cáustica	intercambio iónico	–
Desinfectar	Requerido	No requerido	No requerido

*BW: agua salobre; SW: agua de mar.

Balance de masa en osmosis inversa

La Figura 6 muestra un esquema de un módulo de membrana, sobre el que se establecen los balances de materia. La alimentación consiste en una solución acuosa con solutos (sales) y las concentraciones máxicas están referidas al contenido de solutos en agua.

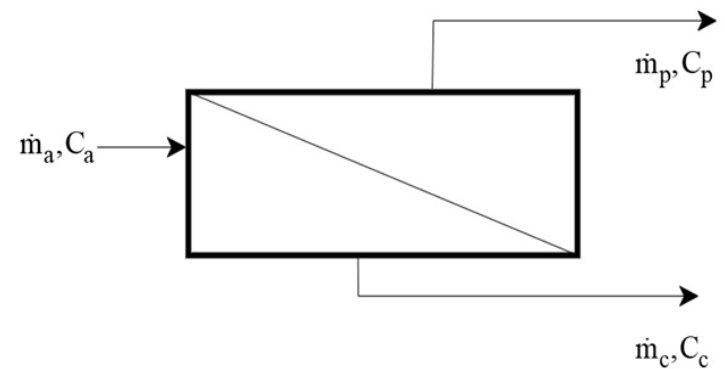


Figura 6. Esquema de las corrientes en un proceso de filtración por membrana.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_c + \dot{m}_p \quad (1)$$

$$\dot{m}_a \cdot C_a = \dot{m}_c \cdot C_c + \dot{m}_p \cdot C_p \quad (2)$$

donde, \dot{m}_a , \dot{m}_c y \dot{m}_p son el flujo másico (kg/h) de alimentación (agua salada o salobre), concentrado y permeado, respectivamente, a su vez, C_a , C_c y C_p son las concentraciones de soluto (kg soluto/kg solución) en el agua salada, concentrado y permeado, respectivamente.

La recuperación másica R_{O1} , que relaciona el flujo másico de permeado con respecto al flujo másico de alimentación:

$$R_{O1} = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_a} \quad (3)$$

Por otro lado, se define el coeficiente de rechazo (o rechazo), ξ , que cuantifica la selectividad de la membrana de acuerdo con:

$$\xi = 1 - \frac{C_p}{C_a} \quad (4)$$

Puesto que la concentración salina varía punto a punto por el lado del concentrado, a lo largo del módulo de membrana, resulta conveniente emplear el coeficiente promedio de rechazo en función de la concentración promedio:

$$\xi = 1 - \left(\frac{C_p}{\bar{C}} \right) \quad (5)$$

$$\bar{C} = \frac{(C_a + C_c)}{2} \quad (6)$$

La información técnica sobre membranas de OI entrega el coeficiente de rechazo en base al NaCl, debido a que tiene dimensiones más pequeñas con respecto a iones di y trivalentes.

Indicadores para el proceso osmosis inversa

Se pueden diferenciar dos tipos de indicadores: (1) los que permiten conocer y evaluar el funcionamiento de las distintas etapas del proceso de desalación y, (2) los que permiten conocer y evaluar el estado de la maquinaria e infraestructuras y el grado de cumplimiento del plan de mantenimiento. La definición de estos indicadores permite establecer los datos relevantes necesarios para la supervisión del funcionamiento de la planta. Por ejemplo, en el caso de la desalación de agua salobre para producir agua para riego, al definir la concentración de boro en el permeado como un indicador de calidad del agua, se establece que es un dato importante a recolectar durante el proceso.

Tanto para la supervisión del funcionamiento del proceso como para verificar el estado de los equipos se aplican tres procedimientos:

- Lectura automática de instrumentación en línea y almacenamiento de datos directamente en SCADA (Supervisory

Control And Data Acquisition) o en algún otro software equivalente.

- Supervisión realizada por personal calificado, incorporada en planillas de control y seguimiento.
- Controles periódicos de parámetros específicos y que complementan la información obtenida por los procedimientos anteriores.

Con el objetivo de determinar las necesidades de pretratamiento de la alimentación es necesario establecer valores de referencia (ver Tabla 2). Además, en la Tabla 3 se entrega un listado de datos que deben ser recolectados de forma manual y/o automática para evaluar el funcionamiento de las membranas. Se indica cuáles deben ser registrados continuamente en línea, diariamente y de manera periódica (semanal).

Tabla 2. Valores de referencia para el control de la calidad del agua de alimentación.

Parámetros	Valores guía
Temperatura (°C)	15 - 30
Conductividad (µS/cm)	4.700 – 16.000
Turbidez (NTU)	< 0,5
STD (mg/L)	3.000 – 10.000
SS (mg/L)	10 – 70
pH (25°C) ⁽¹⁾	6,5 – 9,0
SDI	< 3
Bacterias ⁽²⁾ (UFC/100 ml)	< 10
Cloro libre (mg/L)	0
Bicarbonato (mg/L)	250
Calcio (mg/L)	350
Cloruro (mg/L)	400 - 600
Nitrato (mg/L)	< 0,02
Sulfato (mg/L)	500
Sodio (mg/L)	250 - 350
Potasio (mg/L)	390
Amonio (mg/L)	< 0,1
Magnesio (mg/L)	200
Bario (mg/L)	<0,015
Hierro como ion (Fe ⁺²) (mg/L)	<0,02
Hierro total (mg/L)	<0,03
Manganeso (mg/L)	<0,01
Aluminio (mg/L)	< 0,1
Sílice total (mg/L)	5 - 50
Boro (mg/L)	5 - 20

(1) Varía según pretratamiento; (2) Parámetro microbiológico; (3) Intensidad de Fluorescencia Media, utilizando una membrana de 0,45 µm.

Tabla 3. Datos recomendados para la evaluación del funcionamiento de las membranas.

Dato	En línea	Diario	Periódico
Fecha	X	X	X
Hora	X	X	X
Número de horas en operación	X	X	X
Número de tubos en funcionamiento	X	X	X
Agua de entrada – CE	X	X	
Agua de entrada – pH		X	
Agua de entrada – SDI ₁₅ ⁽¹⁾		X	
Agua de entrada – Turbidez	X	X	
Agua de entrada – Temperatura	X	X	
Agua de entrada – Presión	X	X	
Concentración de cloro	X	X	
Concentración de anti-incrustante		X	
HSO ₃ ⁻ sobrante en la salmuera		X	
Iones específicos			X
CE de la salmuera			X
pH de la salmuera			X
Caudal de la salmuera	X	X	
CE del permeado total	X	X	
CE de cada tubo ⁽²⁾			X
Presión del permeado		X	
Caudal total de permeado	X	X	
Caudal de permeado por rack ⁽³⁾		X	
Iones específicos en permeado			X
% de recuperación		X	
% de recuperación por rack			X
Pasos de sales normalizado ⁽⁴⁾			X
Caudales de permeado normalizado ⁽⁴⁾			X
Pérdida de carga normalizado ⁽⁴⁾	X	X	

(1) La ASTM define el SDI de 15 minutos (SDI₁₅) como el intervalo necesario para realizar pruebas precisas y estandarizadas; (2) Mapa de conductividades; (3) rack: conjunto de módulos de membranas; (4) Pueden ser calculados manualmente.

Por otro lado, las necesidades de postratamiento del permeado se observan en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos recomendados para evaluar las operaciones de postratamiento.

Dato	Unidades	Valor guía
CE antes de la remineralización	μS/cm	<600
CE después de la remineralización	μS/cm	<700
ΔCE producido por la remineralización	μS/cm	90 – 100
pH antes de la remineralización		4,82 ⁽¹⁾ – 5,04 ⁽²⁾
pH después de la remineralización		8,2 ± 0,1
Turbidez antes de la remineralización	NTU	<0,3
Turbidez después de la remineralización	NTU	<1
Alc. total después de la remineralización		56 ± 3
Ca total después de la remineralización	mg CaCO ₃ /L	21 ± 2 mg/L
LSI después de la remineralización	mg Ca ²⁺ /L	± 0,15

(1) Valor guía para la remineralización con Ca(OH)₂; (2) valor guía para la remineralización con CaCO₃.

Mantenimiento del proceso osmosis inversa

Algunos problemas a tener en cuenta durante la operación de una planta de OI son: compactación de la membrana, polarización por concentración, cavitación de las bombas, golpes de ariete, deterioro químico y ensuciamiento de la membrana.

Las altas presiones (250–1.000 psi) provoca fenómenos de compresión de las capas que constituyen la membrana, lo cual puede reducir la productividad. Sin embargo esta velocidad de compactación es muy baja, observándose algunos efectos después de meses o años de operación con una misma membrana.

La polarización por concentración, correspondiente al aumento local de la concentración de solutos en la superficie de la membrana en contacto con la alimentación, provoca los siguientes problemas: (1) aumento de la presión osmótica, que provoca una disminución del gradiente impulsor del proceso, (2) disminución de la eficiencia de separación de la membrana debido al aumento de la concentración de solutos en la capa límite y (3) aumento del riesgo de incrustación de la membrana debido a la precipitación de sales que exceden el límite de solubilidad.

La cavitación ocurre en la zona de succión de la bomba, donde se encuentran las condiciones locales de baja presión, lo que provoca que el líquido se transforme en vapor a la entrada del rodete. Este vapor es transportado hasta la zona de descarga de la bomba donde el vacío desaparece y el vapor del líquido es nuevamente comprimido debido a la presión de descarga. Se produce entonces una violenta caída de presión sobre la superficie del rodete. Un rodete

que opera bajo condiciones de cavitación en la succión, terminará presentando fallas por destrucción del rodete, desgaste prematuro del sello mecánico, picaduras, abrasión y erosión de las partes metálicas de la bomba que están en contacto con el fluido.

El golpe de ariete se origina al cerrar bruscamente una válvula instalada en el extremo de una tubería de cierta longitud. Este fenómeno es muy peligroso, ya que la sobrepresión generada llegará entre 60 y 100 veces la presión normal de la tubería, ocasionando roturas en los accesorios instalados en los extremos. Un método para evitar el golpe de ariete es instalar ventosas de aireación.

El deterioro químico se debe a que los polímeros que constituyen las membranas deben ser químicamente compatibles con los fluidos que se vayan a tratar.

El ensuciamiento de la membrana es imposible de evitar y se presenta debido a la polarización por concentración, o por la presencia de sustancias indeseadas en la corriente de alimentación, tales como compuestos orgánicos, coloides, material biológico, iones metálicos de baja solubilidad, etc. Cuando las partículas se depositan en la superficie de la membrana se creará una resistencia adicional al paso del permeado a través de ella. El resultado final será una disminución en el flujo de agua purificada, lo que traerá consigo un aumento en el requerimiento energético (presión de operación de la bomba) para mantener constante la producción. La experiencia ha demostrado que el ensuciamiento de la membrana puede ser controlado aumentando el flujo de agua de alimentación, operando a recuperaciones volumétricas no altas, y/o aumentando la presión de operación. Sin embargo, las características del agua de alimentación serán también determinantes, incidiendo en los pretratamientos y los rangos de operación, en la idea de minimizar los problemas de precipitación de sales y coloides sobre las membranas, cuyas incrustaciones pueden resultar difíciles de retirar incluso mediante las rutinas de limpieza.

Cuando existen cambios relevantes en algunas variables de proceso de la planta de osmosis, es indicativo de la necesidad de aplicar algún tipo de limpieza. Esto se aplica cuando:

- Disminución del flujo de permeado en un 10% respecto del flujo inicial de operación.

- Aumento de un 15% en el paso de sales.
- Incremento del diferencial de presión, Δp , en un 15%.

Existen muchos tipos de soluciones de limpieza y su selección dependerá de la acción que se requiera aplicar, es decir:

- Limpieza física, implicará arrastrar las partículas depositadas mediante enjuagues con agua a alta velocidad de flujo por el lado del concentrado.
- Limpieza biológica, se aplicarán reactivos disueltos en agua para eliminar la presencia de microorganismos y patógenos.
- Limpieza química, se aplicarán soluciones acuosas de reactivos ácidos, básicos o secuestrantes, para eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos.

Dependiendo del tamaño de la planta de osmosis, la limpieza puede realizarse manual o automáticamente, utilizando la modalidad CIP (cleaning in place) sin desarmar los bancos de membranas. Sólo en casos de extrema suciedad y deterioro, las membranas se extraen de los contenedores (portamembranas) y se limpian con soluciones químicas de lavado.

Control del proceso osmosis inversa

El adecuado control del equipo de OI involucra la medición de diversos parámetros y variables de proceso: presión de operación o de ingreso de la alimentación, presión del lado concentrado, temperatura de operación, flujo de permeado, pH de la alimentación de las membranas, conductividades de la alimentación y del agua producto (permeado). Para la medición y control de caudales de alimentación, presión, pH y temperatura, se emplean sistemas estándares. Es deseable que exista un sistema de adquisición de datos para registrar las condiciones del proceso, lo que permitirá tomar decisiones para mejorar/subsanar eventuales problemas.

Conclusiones

El proceso OI para obtener agua purificada es complejo debido al número de etapas (captación, pre-tratamiento, bombeo a alta presión, proceso de membrana y postratamiento) y precauciones que han de considerarse. En este sentido, el primer paso es contar con profesionales formados en procesos industriales y ambientados con las tecnologías involucradas. Luego, se debe tener claro la calidad de agua objetivo.

INIA LA CRUZ: Chorrillos N° 86 - La Cruz, Región de Valparaíso, Chile.
CNR: Av. Libertador Bernardo O'Higgins #1449, Torre I, Piso 4, Santiago

Este informativo es un material de difusión y transferencia, que forma parte del convenio CNR/INIA "Mejoramiento en la operación de plantas de ósmosis inversa de uso en riego agrícola mediante el fortalecimiento de la capacitación, extensión y transferencia tecnológica a beneficiarios de proyectos de riego".

www.inia.cl | www.cnr.gob.cl

Año 2022
Informativo N° 39



Mejor Riego
para Chile