

DESIGN OF A REVERSE OSMOSIS SEAWATER DESALINATION PLANT EQUIPPED WITH AN SPECIFIC PREVENTIVE MAINTENANCE UNIT

Arnal Arnal, José Miguel; García Fayos, Beatriz; Giménez Antón, Adriá Carles; Sancho Fernández, María

¹ Universitat Politècnica de València

The reduction of the quality water of natural resources for consumption due to either overexploitation or pollution, coupled with a growing demand, forces people in many areas of our planet to look for alternative processes for drinking water production. Seawater desalination plants using reverse osmosis membranes have shown to be a suitable solution to ensure quality water supply. Currently, a decrease of its high operating costs should be reached in order to make this water treatment more affordable. The key to minimize costs related to the process is to improve design of installation and maintenance. In this work, a design of seawater desalination plant is shown, which includes the design of a membrane cleaning installation that allow to carry out an specific preventive maintenance. Designed system allows to increase membranes lifetime by means of the application of a specific cleaning procedure, attending to the fouling phenomenon observed. Consequently, membranes replacement costs will decrease and installation performance will improve in terms of exploitation costs.

Keywords: Reverse osmosis; desalination plant; installation design; membrane cleaning; lifetime

DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA EQUIPADA CON UN MANTENIMIENTO PREVENTIVO ESPECÍFICO

La reducción de los recursos naturales de agua de calidad para el consumo, sea por sobreexplotación o por contaminación, junto con la creciente demanda, hacen que en muchas zonas geográficas del planeta se recurra a procesos alternativos de obtención de agua potable. Las instalaciones de desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa han mostrado ser una solución adecuada para asegurar el suministro de agua de calidad. En la actualidad, la estrategia para expandir este tipo de tratamientos pasa por reducir su elevado coste de explotación. El correcto diseño de la instalación y del mantenimiento es clave para minimizar los costes asociados al proceso. En el presente trabajo se muestra el diseño de una instalación de desalación de agua de mar equipada con una instalación de limpieza de membranas que permitirá llevar a cabo un mantenimiento preventivo específico. El sistema diseñado, aplicando un protocolo de limpieza específico al ensuciamiento observado, permitirá prolongar la vida útil de las membranas, reduciendo así los costes asociados a la reposición de las mismas y mejorando el rendimiento global de la instalación.

Palabras clave: Ósmosis inversa; instalación de desalación; diseño de instalación; limpieza de membranas; vida útil

1. Introducción

La desalación de agua de mar mediante Ósmosis Inversa (OI) ha experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas. La creciente demanda de agua para el consumo y la reducción de los recursos naturales de agua de calidad son las causas de que en muchas zonas geográficas del planeta se recurra, desde hace muchos años, a procesos alternativos de agua potable. Las primeras instalaciones de desalación de agua de mar se construyeron al principio de los años 50, todas ellas de evaporación, debido a los precios bajos de los combustibles fósiles. En los años 70 comenzó a aplicarse la tecnología de membranas a la desalación de agua de mar y salobre, y en los años 90 la tecnología de membranas, fundamentalmente la OI, se impone en el mercado de las instalaciones de desalación de pequeña y mediana capacidad.

Este rápido desarrollo se debió en gran medida a las ventajas que presentaba la tecnología de membranas frente a las tecnologías evaporativas. Sus costes de inversión son menores, es adecuada también para agua salobre, su estructura modular permite una mayor flexibilidad en la cantidad y calidad del agua producida y sus requerimientos de espacio son menores (Lora et al., 2002). Sin embargo, la tecnología de membranas, y más concretamente la desalación mediante OI, cuenta con dos inconvenientes: la necesidad de trabajar a presiones elevadas y el ensuciamiento de las membranas.

La investigación acerca de los materiales que componen la membrana ha logrado reducir ligeramente la presión nominal requerida por los módulos de OI, pero el fenómeno del ensuciamiento continúa suponiendo un reto para el desarrollo del proceso. Cuando se acumula ensuciamiento en la membrana, los requerimientos de presión para mantener el rendimiento del proceso aumentan, incrementando los costes energéticos, y la vida útil de las membranas se ve reducida, debido a las sucesivas etapas de limpieza que, aplicadas de forma estandarizada, envejecen progresivamente la membrana. El fenómeno del ensuciamiento, por tanto, afecta negativamente y de manera directa a los costes energéticos del proceso, a los costes asociados a la limpieza de membranas, que pueden llegar a suponer el 50% de los costes de operación (Ridgway, 2003), y a los costes de reposición de membranas. Todo esto hace que los costes de operación de las instalaciones de desalación mediante OI se vean incrementados de forma considerable.

El fenómeno del ensuciamiento puede resultar extremadamente complejo, y puede estar producido por uno o varios de los siguientes tipos de compuestos: depósitos inorgánicos o *scaling*, materia coloidal, materia orgánica y ensuciamiento biológico o *biofouling*. En general, el problema más frecuente es el ensuciamiento de carácter biológico (*biofouling*). Otros problemas significativos son los depósitos de naturaleza coloidal, asociados sobre todo a silicatos y aluminio, las incrustaciones salinas por precipitación (*scaling*), siendo las más comunes CaSO_4 , CaCO_3 , CaF_2 , BaSO_4 , SiO_2 , SrSO_4 y Mg(OH)_2 , y los fenómenos de adsorción de compuestos orgánicos de origen natural o industrial (Minnery et al., 2002; Tran et al., 2007; Vrouwenvelder et al., 2003). La identificación temprana del tipo de ensuciamiento que afecta a las membranas de la instalación es fundamental a la hora de eliminarlo.

Hay cinco acciones fundamentales a considerar para minimizar el efecto del ensuciamiento de las membranas de OI: prevención (pretratamiento), predicción, detección, caracterización y limpieza. De hecho, la susceptibilidad de las membranas de OI al ensuciamiento tiene dos consecuencias directas en el diseño de instalaciones de desalación: exige que cuenten con un pretratamiento eficaz para proteger las membranas; y requiere de un sistema de limpieza periódica de las membranas paralelo a la línea productiva que logre mantener la cantidad y calidad del agua producida.

Durante los primeros años de vida de una instalación de desalación mediante OI, el grado de reposición de membranas es bajo. A medida que va aumentando la edad media de las membranas, se va incrementando su grado de deterioro y, por tanto, las necesidades de reposición. Según M. Hernández (2011), las necesidades de reposición de las membranas cuando se trabaja con agua de mar superficial son del 10%-18% anual. Dependiendo de la calidad del agua que llega a las membranas, su vida media suele estar entre 5 y 8 años, siendo valores por debajo de 5 años indicadores de la necesidad de intensificar el pretratamiento.

La limpieza de las membranas juega un papel muy importante en el proceso de desalación de agua de mar mediante OI, ya que su optimización puede lograr una reducción significativa en los costes de operación y en los de reposición de membranas.

2. Objetivos

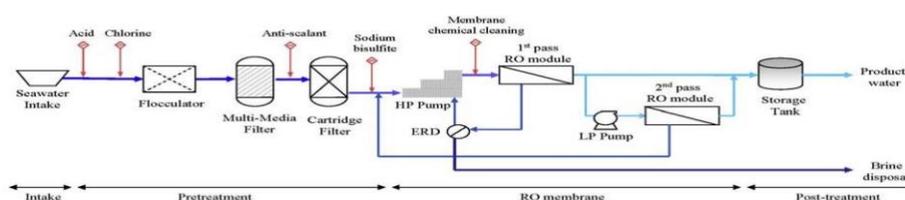
El objetivo general de este trabajo es proponer un diseño de instalación de desalación de agua de mar que cumpla los siguientes objetivos específicos:

- Que el agua producida cumpla con los estándares de calidad para el agua potable, y que el caudal producido haga que el proceso sea viable económicamente.
- Que permita una caracterización del ensuciamiento de las membranas en un breve período de tiempo.
- Que cuente con un protocolo de limpieza de membranas que sea específico al ensuciamiento que éstas presenten.
- Que permita la aplicación de este protocolo antes de que el ensuciamiento sea irreversible, esto es, que la etapa de limpieza sea preventiva.
- Que, con la aplicación de este protocolo de limpieza específico, la vida útil de las membranas de la instalación sea superior a la media de las instalaciones actuales, reduciendo así la cantidad de residuos generados en el proceso y los costes asociados a la reposición de membranas y a la gestión de residuos.

3. Caso de estudio

Las instalaciones de desalación de agua de mar mediante OI están compuestas por cuatro sistemas: el pretratamiento, la desalación mediante OI y el post-tratamiento, que conforman la línea de producción; y el mantenimiento de la planta, en el cual la limpieza de las membranas destaca por su importancia. En la figura 1 se muestra un esquema de las etapas que componen una instalación convencional de desalación de agua de mar mediante OI.

Figura 1. Esquema de una instalación de desalación SWRO convencional (Kim et al., 2009)



3.1. Pretratamiento

Las etapas básicas que componen el pretratamiento convencional en los procesos de desalación mediante OI son coagulación, filtración multilecho, acondicionamiento del

alimento (regulación de pH, adición de antiincrustantes) y filtración con cartuchos. Sin embargo, cada vez son más las instalaciones que optan por un pretratamiento basado en membranas de Microfiltración (MF) o Ultrafiltración (UF). Según Wolf&Siverns (2004), las ventajas del pretratamiento basado en la UF frente al pretratamiento convencional son una reducción en la tasa de reposición anual de las membranas del 14 al 10%, un aumento en la densidad de flujo de permeado (de 14 a 18 L/(m²·h)), una disminución en la frecuencia de limpieza de las membranas (de 4-12 limpiezas/año a 1-2 limpiezas/año) y una mayor estabilidad en la calidad del efluente del pretratamiento.

El principal inconveniente del pretratamiento con membranas es el propio ensuciamiento de dichas membranas. El ensuciamiento más problemático es el producido por hidrocarburos y sustancias poliméricas extracelulares (EPS) (Brehant et al., 2003; Jian et al., 1998). Cuando se emplea NF, también puede existir el fenómeno *scaling* (Le Gouellec & Elimelech, 2002). Hay que tener en cuenta que los antiincrustantes y los coagulantes interactúan entre sí, produciendo compuestos que ensucian las membranas y son difíciles de eliminar. Por ello, si el pretratamiento es mediante membranas, los antiincrustantes se dosificarán en el efluente de las membranas, previo al proceso de OI. Otro inconveniente es el coste de reemplazamiento de las membranas del pretratamiento. La vida útil de las membranas de MF y UF empleadas como pretratamiento a la desalación de agua de mar mediante OI se estima que es de 5-10 años (Pearce, 2007).

Sin embargo, haciendo balance, el aumento de costes destinados al pretratamiento cuando éste se basa en tecnología de membranas se compensa con una reducción en los costes del proceso de OI, a consecuencia de un menor ensuciamiento de estas membranas, prolongándose su vida útil y facilitando la limpieza química.

3.2. Sistema de membranas de OI

Tras el pretratamiento, el agua de mar acondicionada entra en los módulos de OI, impulsada por una bomba de alta presión por cada bastidor. El número de bastidores que componen el sistema depende de la capacidad de producción instalada. La configuración de estos bastidores, suele ser en una o dos etapas (ver figuras 2 y 3), siendo la segunda etapa de concentración del rechazo. Cada una de las etapas está formada por un número variable de tubos de presión, en función de la capacidad instalada en la planta, pero limitado por la potencia de la bomba. Cada tubo de presión suele contener entre 5 y 7 módulos de membrana de OI operando en serie. Se monitorizan las corrientes de entrada y salida de cada bastidor y para cada tubo de presión, de forma que se conoce en todo momento el caudal de permeado producido, su concentración de sales y la pérdida de carga de cada tubo de presión.

La adición de una segunda etapa produce un incremento en la conversión global del proceso (aumentando la producción de permeado y reduciéndose el volumen de salmuera a verter) pero sin mejorar la calidad del permeado, y requiere de la instalación de una segunda bomba adicional para alimentar cada bastidor en la segunda etapa. Es la configuración más típica y permite además utilizar diferentes modelos de membrana en cada etapa. Esto resulta interesante, pues el alimento de la segunda etapa está más concentrado en sales, por lo que conviene que las membranas de la segunda etapa sean de rechazo elevado.

Figura 2. Configuración de un bastidor de desalación en una sola etapa o paso.

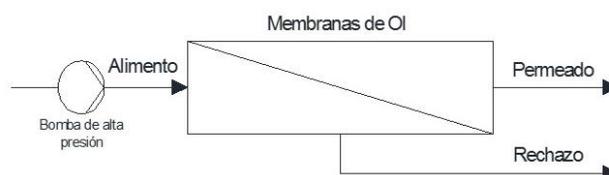
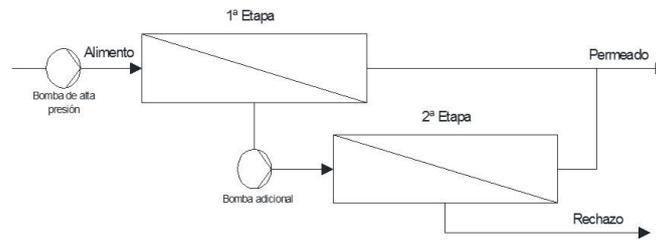
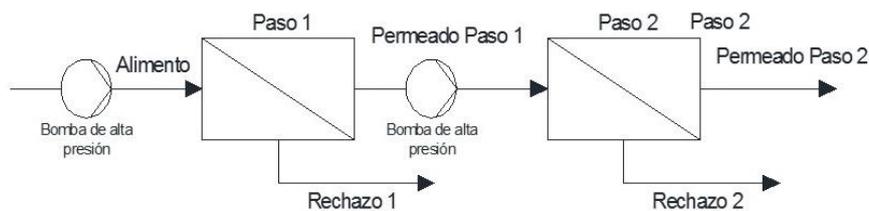


Figura 3. Configuración de un bastidor de desalación en dos etapas de concentración.



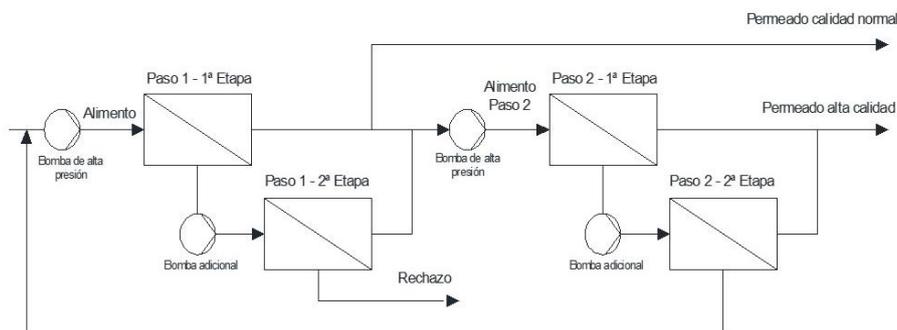
Otro tipo de configuración de los bastidores de desalación es en dos pasos, la cual se puede observar en la figura 4. En este caso, el alimento de la segunda etapa es el permeado de la primera. Esta configuración mejora la calidad del permeado pero incrementa el coste energético, ya que hay que presurizar el permeado de la primera etapa antes de que entre en la segunda. Conviene, al igual que con la configuración en dos etapas, emplear modelos de membrana diferentes en cada etapa, optimizando así el proceso. Esta configuración tiene interés cuando se plantea la mejora de una instalación existente para asegurar el cumplimiento de los requerimientos de calidad, o en aquellas aplicaciones en las que lo que premie es la calidad.

Figura 4. Configuración de un tren de desalación en dos pasos de permeado.



Estas son las configuraciones básicas del proceso de desalación. Sin embargo, estas configuraciones pueden combinarse mediante by-pass, recirculación y/o mezclas de corrientes, con el objetivo de aprovechar al máximo cada corriente y minimizar los vertidos. De este modo, además, se puede producir agua de distintas calidades, en función de la demanda. En la figura 5 se puede apreciar un ejemplo de este tipo de combinaciones.

Figura 5. Configuración combinada de un tren de desalación con dos etapas y dos pasos



Cabe destacar, de entre las optimizaciones mostradas en la figura 5, el reaprovechamiento energético del concentrado o rechazo, que es muy importante en procesos como la desalación mediante OI en los que el consumo es elevado. Como la corriente de rechazo sale de los bastidores a una presión elevada (la pérdida de carga suele ser pequeña, de 1-4 bar), se instalan equipos para el aprovechamiento energético, como inicialmente fueron las turbinas Francis o Pelton y, en la actualidad, las cámaras isobáricas. Estos equipos

aprovechan la presión de la corriente de rechazo para reducir la presión necesaria en las bombas de alta presión ubicadas al inicio de los trenes de OI.

3.3. Post-tratamiento

A la salida de los bastidores de OI, el permeado tiene una cantidad de sales disueltas inferior a la exigida por los estándares legales para el agua potable, por lo que es necesario incluir una última etapa de remineralización, que puede ser llevada a cabo por diferentes procesos, pero todos ellos basados en la adición de cal.

3.4. Predicción del ensuciamiento

La predicción del ensuciamiento se basa en una serie de índices del potencial de ensuciamiento y en las analíticas completas del agua de mar que alimenta a la instalación. El indicador más empleado es el SDI (*silt density index*), aunque hay otros como el MFI (*modified fouling index*), MFI-UF (*modified fouling index Ultrafiltration*), LSI (*Langelier saturation index*) y S&DI (*Stiff and Davies index*). Los valores de estos índices para el agua que entra en el pretratamiento son de utilidad para calcular la dosis requerida de coagulante. Los valores medidos sobre el agua que alimenta a las membranas de OI pueden consultarse para establecer el protocolo de limpieza a priori más adecuado (disoluciones, secuencia y frecuencia de la limpieza). Sin embargo, la predicción atendiendo a estos indicadores sólo es útil a modo orientativo, ya que el fenómeno de ensuciamiento es muy complejo. La caracterización química completa del agua de mar que se procesa puede ser de utilidad para completar la información que proporcionan los índices del potencial de ensuciamiento.

3.5. Caracterización del ensuciamiento. Autopsia de la membrana

En las instalaciones de desalación, la caracterización del ensuciamiento se realiza generalmente mediante la autopsia de un módulo de membrana retirado del proceso debido a su grave estado de deterioro. La autopsia de la membrana es un método destructivo, y acostumbra a incluir una serie de técnicas analíticas, entre las que destacan la microscopía electrónica de barrido acoplada con emisión de rayos X (SEM-EDX), la microscopía de fuerza atómica (AFM), la espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) o el análisis dispersivo con rayos X (T-EDXA). Mediante estas técnicas se puede conocer mejor la naturaleza del ensuciamiento de la membrana (Butt et al., 1997; Luo et al., 2001; Gwon et al., 2003, Schneider et al., 2005).

El principal problema de esta manera de proceder para la caracterización del ensuciamiento es que no se puede conocer la naturaleza del ensuciamiento hasta que no haya transcurrido el tiempo suficiente para que al menos un módulo de membrana alcance el fin de su vida útil, y esto puede suponer varios años.

3.6. Limpieza de membranas

De forma paralela al proceso productivo de agua desalada, la instalación de desalación requiere de un sistema de limpieza con equipamiento propio y un protocolo de limpieza que programe y establezca la forma en la que se han de realizar las limpiezas periódicas de las membranas. Por norma general, el protocolo de limpieza en las instalaciones de desalación consiste en aplicar con periodicidad de 1-7 días enjuagues directos con permeado a una gran velocidad de flujo cruzado durante unos minutos (*flushing*), y aplicar una limpieza química de 1 a 12 veces al año. Como norma general, se considera que una membrana está sucia y debe pararse la producción para ejecutar el protocolo de limpieza química cuando se produce alguna de las siguientes condiciones (Lora et al., 2002):

- Disminución del flujo de permeado en un 10-15%
- Aumento de la concentración de sal en el permeado en un 10-15%

- Aumento de la pérdida de carga en el tubo de presión en un 15-20%

Tabla 1. Disoluciones de limpieza recomendadas por los fabricantes de membranas de OI

	HYDRANAUTICS		DOW FILMTEC	TORAY
Ensuciamiento	Limpieza suave	Limpieza severa		
<i>Scaling</i> (CaCO ₃)	40°C Ácido cítrico 2%	35°C pH = 2.5 HCl 0.5%	25°C, pH = 1-2 HCl 0.2%	pH = 2-4 Ácido cítrico 1-2%
<i>Scaling</i> (sulfatos)	40°C, pH=10 Tripolifosfato sódico (STPP) 2% Na-EDTA 0.8%	35°C, pH = 2.5 HCl 0.5%	35°C, pH = 12 NaOH 0.1% Na4-EDTA 1%	pH = 2-4 Ácido cítrico 1-2%
Óxidos o hidróxidos metálicos	40°C Ácido cítrico 2%	35°C, pH = 4-6 Hidrosulfito sódico 1%	25°C, pH = 5 Hidrosulfito sódico 1%	pH = 2-4 Ácido cítrico 1-2%
Coloides inorgánicos	40°C Ácido cítrico 2% (p)	35°C, pH = 2.5 HCl 0.5% (w)	35°C, pH = 12 NaOH 0.1% Dodecil sulfato sódico (SDS) 0.025%	pH = 2-4 Ácido cítrico 1-2%
Mezcla de coloides orgánicos e inorgánicos	40°C, pH=10 STPP 2% Na-EDTA 0.8%	30°C, pH = 11.5 NaOH 0.1% (w) SDS 0.03%	35°C, pH = 12 NaOH 0.1% SDS 0.025%	NA
Capa de sílice polimérica	-	30°C, pH = 11.5 NaOH 0.1%	35°C, pH = 12 NaOH 0.1% SDS 0.025%	NA
Ensuciamiento biológico	40°C, pH=10 STPP 2% Na-EDTA 0.8% ó 40°C, pH=10 STPP 2% Sal sódica de sulfonato de dodecilbenceno 0.025%	30°C, pH = 11.5 NaOH 0.1% (w) SDS 0.03%	35°C, pH = 12 NaOH 0.1% SDS 0.025%	pH = 9-11 NaOH ó SDS 0.1-0.5% con NaOH ó Polioxietilen lauril sulfato sódico (PSLS), 0.1-0.5% con NaOH
Materia orgánica natural (MON)	40°C, pH=10 STPP 2% Na-EDTA 0.8% ó 40°C, pH=10 STPP 2% Sal sódica de sulfonato de dodecilbenceno 0.025%	30°C, pH = 11.5 NaOH 0.1% SDS 0.03%	35°C, pH = 12 NaOH 0.1% SDS 0.025%	pH = 9-11 NaOH ó SDS 0.1-0.5% con NaOH ó Polioxietilen lauril sulfato sódico (PSLS), 0.1-0.5% con NaOH

Nota: Hydranautics y Dow Filmtec recomiendan una presión de 4 bar durante la limpieza, mientras que Toray recomienda una presión de 2 bar y la máxima temperatura que tolere la membrana.

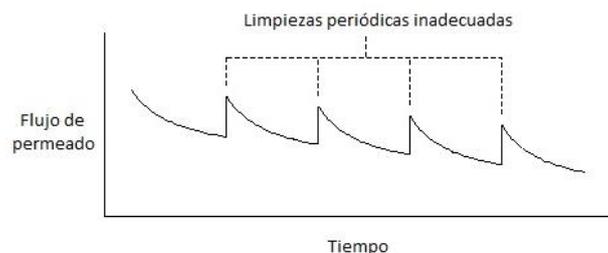
Actualmente, en las plantas de desalación se tiende a aplicar protocolos de limpieza estándares siguiendo las recomendaciones de los fabricantes de membranas en función del tipo de ensuciamiento que supuestamente afecta a la membrana. La tabla 1 muestra un resumen de las recomendaciones que los fabricantes de membranas proponen para la selección de la disolución de limpieza más adecuada. Además de estas disoluciones de composición conocida, existe una amplia gama de productos de limpieza comerciales recomendados por los fabricantes de membranas y cuya composición exacta no se publica.

Un ciclo convencional de limpieza suele realizarse en los siguientes pasos (Fritzmann et al., 2007):

- Enjuague del tubo de presión con permeado o agua destilada
- Bombeo, a bajo caudal y 4 bar de presión (presión recomendada por la mayoría de fabricantes de membranas), de la disolución de limpieza precalentada a la temperatura que establezca el protocolo
- Recirculación de la disolución de limpieza hasta que se establezca la temperatura, ajustando el pH si es necesario
- Reposo de la disolución en el interior del módulo de membrana durante 1-15 horas, en función del tipo y grado de ensuciamiento
- Bombeo a elevada velocidad de flujo para arrastrar los compuestos que producían el ensuciamiento y la disolución de limpieza fuera del sistema
- Enjuague del tubo a presión con permeado o agua destilada

Cuando un protocolo de limpieza no es adecuado al sistema membrana-ensuciamiento, la membrana recupera parcialmente su capacidad de producción de permeado tras la limpieza, pero la tendencia del flujo de permeado con el tiempo es decreciente, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Evolución del flujo de permeado de una membrana cuando el protocolo de limpieza no es adecuado



Dada la complejidad del fenómeno de ensuciamiento y de la importancia del protocolo de limpieza para la recuperación de la capacidad de producción de la membrana (Madaeni, 2010), aunque el ciclo de limpieza convencional es el descrito anteriormente, resulta mucho más eficaz adaptar dicho protocolo de forma específica a cada sistema membrana-ensuciamiento. De hecho, el ensuciamiento de una membrana no será nunca de un único tipo, sino que siempre hay diferentes tipos que intervienen en el fenómeno, así que la mejor solución será particular para cada sistema membrana-ensuciamiento.

4. Propuesta de diseño

4.1. Consideraciones iniciales de diseño

Una vez analizado cómo trabajan en general las instalaciones de desalación de agua de mar mediante OI en la actualidad, y prestando especial atención al procedimiento de definición del protocolo de limpieza de las membranas, se realizan las siguientes valoraciones a la hora de proponer el diseño de la instalación:

Pretratamiento

- Se propone un pretratamiento basado en membranas de UF por garantizar una mayor vida media de las membranas, reduciendo la frecuencia de las etapas de limpieza de las membranas de OI.
- Las etapas en serie que componen el pretratamiento propuesto son: ajuste de pH, coagulación-floculación, desinfección, UF y adición de antiincrustantes.
- Se realizarán diariamente analíticas y determinación del SDI del agua de mar antes de entrar al pretratamiento y a la salida de los módulos de UF. En caso de observar un SDI superior a 5 u otros síntomas de ensuciamiento de las membranas de UF, se pararía la línea de pretratamiento afectada para llevar a cabo una limpieza de las membranas de UF empleando NaClO siguiendo indicaciones del fabricante de la membrana de UF.
- La dosificación de coagulante, floculante, antiincrustante y demás aditivos se determina a partir de las analíticas del agua de mar, mediante tablas proporcionadas por los fabricantes de los productos.

Sistema de desalación mediante OI

- El número de bastidores del proceso se estima en función de la capacidad que se desee instalar. Se puede suponer una producción de 400-600 m³/h por cada bastidor.
- Suponiendo que no hay requerimientos especiales en la calidad del agua a producir más allá de los estándares legales para el agua potable, se propone un proceso de desalación en dos etapas, con concentración de la corriente de rechazo, puesto que maximiza la producción de permeado y minimiza la generación de vertido de salmuera. Como la conversión por etapa está entorno al 50%, se ubicarán en la segunda etapa la mitad de tubos de presión que en la primera.
- Los módulos de membrana serían de 8 pulgadas, por ser los más ampliamente utilizados. En la primera etapa de cada bastidor, se instalarían módulos de OI de elevada permeabilidad, mientras que en la segunda etapa se ubicarían módulos de OI de alto rechazo de sales.
- En cada tubo de presión se propone ubicar 6 módulos de membrana en serie.
- Cada bastidor contaría con una bomba de alta presión, una bomba adicional para la segunda etapa y una cámara isobárica para aprovechar la presión de la corriente de rechazo.
- Se monitoriza la pérdida de carga, la concentración de sales y el flujo de permeado a la entrada y salida de cada tubo de presión.

Remineralización del permeado

- La unidad de remineralización del permeado se diseña por el método convencional, por adición de cal.

4.2. Predicción del ensuciamiento mediante módulos de sacrificio

La información a partir de la cual se establecen los protocolos de limpieza en las instalaciones de desalación convencionales no es suficiente para garantizar la eficacia y adecuación de la limpieza de las membranas. Las recomendaciones de los fabricantes de membranas son excesivamente genéricas, por lo que no resultan del todo adecuadas en muchas ocasiones. La información proporcionada por los índices de potencial de ensuciamiento y las analíticas de las corrientes del proceso tampoco permite tomar decisiones concretas al respecto, y los resultados de las autopsias de membranas procedentes del propio proceso, si bien son más precisos y útiles que los anteriores, llegan demasiado tarde y los daños producidos en las membranas a causa del ensuciamiento pueden ser ya irreparables.

Por todo ello, se propone un método de predicción del ensuciamiento basado en la experimentación. Para cada bastidor, se ubican hasta un máximo de 12 módulos de sacrificio: 6 a la cola de la primera etapa, en el interior de un tubo de presión; y otros 6 a la cola de la segunda etapa, en otro tubo de presión. Estos módulos de sacrificio son módulos de membrana de menor diámetro que los del proceso productivo (de 2.5 pulgadas) pero la naturaleza de la membrana es idéntica a la del interior de los módulos de 8 pulgadas, y su configuración, también de arrollamiento en espiral. Los módulos de sacrificio ubicados a la cola de la primera etapa trabajan en condiciones idénticas a los módulos de los tubos de presión de la segunda etapa, que son los que trabajan con el alimento más concentrado y los que se ensuciarán antes. Se ensuciarán, pues, a un ritmo similar a ellos, pero con la ventaja que, al ser más pequeños y trasegar mucho menos caudal, se pueden desmontar sin necesidad de parar el proceso. Estos módulos de sacrificio también servirán para predecir cómo se ensuciarán los módulos de la primera etapa, ya que el ensuciamiento será similar, pero se producirá más tarde. Por su parte, los módulos de sacrificio del tubo de presión ubicado a la cola de la segunda etapa serán los primeros en ensuciarse, ya que trabajarán la salmuera más concentrada como alimento. Éstos servirán para predecir cómo se ensuciarán los módulos de la segunda etapa. Así, monitorizando las corrientes de entrada y salida, estos módulos de sacrificio juegan el papel de simuladores, prediciendo el comportamiento futuro de los módulos de membrana del proceso productivo.

La instalación de 6 módulos de sacrificio tras cada etapa, y no sólo uno, responde al hecho de que los módulos situados a la cabecera del tubo de presión son los que más ensuciamiento orgánico y coloidal suelen acumular, mientras que aquéllos situados a la cola del tubo de presión son los más susceptibles de sufrir el fenómeno de *scaling* o de incrustación de sales, por ser los que trabajan a la máxima concentración de sales.

4.3. Elaboración del protocolo de limpieza más adecuado

En la instalación diseñada, se seguirían los siguientes pasos desde la primera puesta en marcha de la instalación hasta establecer el protocolo de limpieza más adecuado para el sistema específico membrana-ensuciamiento que se produzca:

- 1) Etapa preliminar. Mediante la analítica completa del agua de mar que entra en planta y su SDI, se determina la dosificación de aditivos en el pretratamiento (regulador de pH, coagulante, antiincrustante, etc.).
- 2) Se arranca el proceso productivo y se lleva a cabo un seguimiento continuo del flujo de permeado y su concentración de sales, así como de la pérdida de carga de los módulos de sacrificio instalados.
- 3) Cuando la desviación de las variables monitorizadas de alguno de los módulos de sacrificio supere el 10%, se retira el módulo sin parar el proceso productivo. A este primer módulo se le practica la autopsia, y con la membrana sobrante se ensayan

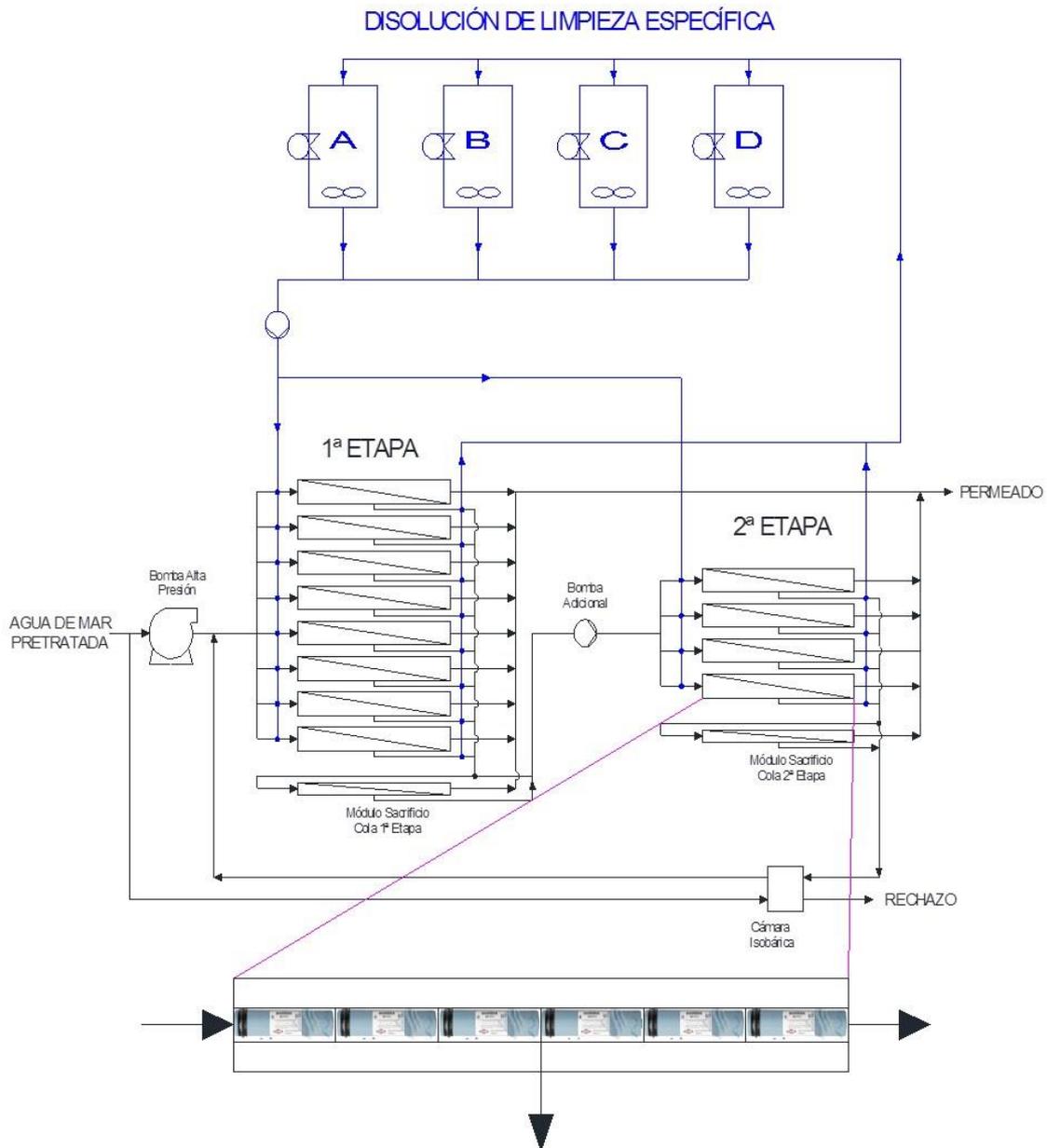
protocolos de limpieza en placa y bastidor siguiendo la metodología definida por García-Fayos et al. (2014). Los resultados de la autopsia y el estado del arte del proceso de limpieza de membranas de OI sugerirán qué disoluciones de limpieza serán “a priori” más eficaces. Se optimiza el proceso de limpieza en planta piloto ensayando diferentes agentes de limpieza, a diferentes concentraciones, velocidades de flujo y temperaturas, así como protocolos de limpieza en 2 etapas o en una etapa pero con disoluciones formados por mezclas de compuestos. Las variables que se tomarán como referencia para evaluar la eficacia de los protocolos de limpieza ensayados son el flujo de permeado y la concentración de sales. Paralelamente, el proceso productivo sigue en marcha.

- 4) Los siguientes módulos de sacrificio en superar el 10% de alguna de las variables monitorizadas se irán retirando para completar la optimización del protocolo de limpieza, ensayándolos en el mismo módulo arrollado en espiral. El protocolo queda definido cuando se fijan los valores óptimos para la frecuencia de la limpieza, el tiempo de duración, la secuencia, temperatura y las disoluciones a emplear.
- 5) Finalizada la optimización del protocolo de limpieza, se prepararán las disoluciones de limpieza que se haya determinado experimentalmente (hasta 4 diferentes: A, B, C y D).
- 6) Cuando los módulos del proceso productivo presenten desviaciones en las variables de control superiores al 10%, se parará dicho bastidor y se procederá a la aplicación del protocolo de limpieza específica optimizado.
- 7) Tras la limpieza, se reanuda el proceso productivo y se evalúa la eficacia del protocolo aplicado en función del caudal de permeado, su concentración salina y la pérdida de carga.
- 8) Una vez todos los tubos de presión del proceso hayan sido lavados, se reinicia el ciclo. Resulta interesante anotar los tiempos transcurridos desde que el módulo de sacrificio mostró síntomas de ensuciamiento hasta que los tubos de presión del proceso que trabajaban en condiciones iguales a dicho módulo de sacrificio presentaron síntomas también. Y también el tiempo hasta que los tubos de presión de la etapa anterior mostraron síntomas de ensuciamiento. De este modo, se conocerá el tiempo de anticipación de la predicción que arroja el módulo de sacrificio, y resultará más útil para posibles imprevistos en el funcionamiento de la planta.

4.4. Diagrama de flujo del diseño de instalación propuesto

En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo propuesto para el proceso de desalación y el de limpieza específica de membranas. Como se puede observar, se ha dispuesto de 4 depósitos de limpieza. De este modo, se pueden aplicar protocolos de limpieza de manera muy versátil y específica, sean en varias etapas, con mezclas de compuestos, o bien un protocolo A para los módulos ubicados en la cabecera de los tubos de presión, un protocolo B para los módulos de la cola y un protocolo C para los intermedios.

Figura 7. Diagrama de flujo del diseño de instalación propuesto. Proceso de desalación y proceso de limpieza.



5. Conclusiones

Las principales conclusiones del trabajo realizado son las siguientes:

- La información que proporciona una analítica del agua alimento, junto con su SDI y las recomendaciones no basta para definir un protocolo de limpieza de las membranas de OI que resulte eficaz.
- La incorporación de módulos de sacrificio en el proceso permite elaborar protocolos de limpieza específica, ya que puede predecir el ensuciamiento futuro de las membranas del proceso productivo y permite la experimentación en protocolos de

limpieza específicos, así como la realización de la autopsia mucho antes que con el procedimiento convencional.

- El diseño de una instalación de desalación de agua de mar mediante OI que incluya un protocolo de limpieza específica para las membranas como el que se propone en este trabajo favorece una mayor vida útil de las membranas.

Referencias

- Brehant, A., Bonnelye, V., Perez, M. (2003). Assessment of ultrafiltration as a pretreatment of reverse osmosis membranes for surface seawater desalination. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3. 437–445.
- Butt, F.H., Rahman, F., Baduruthamal, U. (1997). Characterization of foulants by autopsy of RO desalination membranes, *Desalination*, 114. 51–64.
- Fritzmann, C. Löwenberg, J. Wintgens, T. Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216. 1-76
- García-Fayos, B., Arnal, J.M., Gimenez, A., Alvarez-Blanco, S., Sancho, M. (2014). Static cleaning tests as the first step to optimize RO membranes cleaning procedure. *Desalination and Water Treatment*, DOI: 10.1080/19443994.2014.957924
- García-Fayos, B., Arnal, J.M., Gimenez, A., Alvarez-Blanco, S., Sancho, M. (2014). Optimization of chemical cleaning of a reverse osmosis membrane from a desalination plant by means of two-step static tests. *Desalination and Water Treatment*. DOI: 10.1080/19443994.2014.959738
- Gwon, E.M., Yu, M.J., Oh, H.K., Ylee, Y.H. (2003). Fouling characteristics of NF and RO operated for removal of dissolved matter from groundwater, *Water Res.*, 37. 2989-2997.
- Hernández, M. (2011). *Tablas para la evaluación del funcionamiento de las plantas desaladoras de agua de mar de Ósmosis Inversa*. Programa de divulgación de Acuamed, Fundación Centro Canario del Agua. Publicado en: http://fccca.es/documentos/05_documentos_por_temas/Desalacion%20Tablas%20de%20gestion%20y%20costes/Informe_Tablas_25_2.pdf
- Jian, W., Kitanaka, A., Nishijima, W., Baes, A.U., Okada, M. (1998). Removal of oil pollutants in seawater as pretreatment of reverse osmosis desalination process. *Water Research*, 33. 1857-1863.
- Le Gouellec, Y.A., Elimelech, M. (2002). Calcium sulfate (gypsum) scaling in nanofiltration of agricultural drainage water. *Journal of Membrane Science*, 205. 279–291.
- Lora, J., Fernández, M.S., & Soriano, E. (2002). *Desalación de aguas (licenciado en Ciencias Ambientales)*. Valencia: Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Luo, M., Wang, Z. (2001) Complex fouling and cleaning in place of a reverse osmosis desalination system, *Desalination*, 141. 15–22.
- Madaeni, S.S., Samieirad, S. (2010). Chemical cleaning of reverse osmosis membrane fouled by wastewater, *Desalination*, 257. 60–86.
- Minnery, J.G., Van Hoof, S.C.J.M., Mack, B. (2002). Performing a membrane autopsy. *Desalination and Water Reuse* 11. 40-46
- Pearce, G.K. (2007). The case for UF/MF pretreatment to RO in seawater applications. *Desalination*, 203. 285–295.
- Ridgway, H.F. (2003). *Biological fouling of separation membranes used in water treatment applications*. AWWA Research Foundation.
- Schneider, R.P., Ferreira, L.M., Binder, P., Ramos, J.R. (2005). Analysis of foulant layer in all elements of an RO train, *J. Membr. Sci.*, 261. 152–162.

- Tran, T. Bolto, B. Gray, S. Hoang, M. Ostarcevic, E. An autopsy study of a fouled reverse osmosis membrane element used in a brackish water treatment plant. *Water Research* 41 (2007) 3915-3923.
- Vrouwenvelder, J.S. van der Kooij, D. Diagnosis of fouling problems of NF and RO membrane installations by a quick scan. *Desalination* 153 (2003) 121-124
- Wolf, P.H. Siverns, S. (2004). *The new generation for reliable RO pretreatment*. International Conference on Desalination Costing. Limassol.