

VALORIZATION OF REVERSE OSMOSIS MEMBRANE MODULES RETIRED FROM A DESALINATION PLANT. INSTALLATION DESIGN

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

Universitat Politècnica de València

Every day, reverse osmosis (RO) membranes are retired from seawater desalination plants when the effluent produced does not meet the water quality demands required and then become membrane waste. Attending to the forecast, membrane desalination capacity installed around the world will be about 117.5 Mm³/day in 2020. Considering that RO membrane lifetime is about 5 to 7 years and its averaged drinking water production is 11-20 L/m²·h, so RO membranes produce between 481.8 to 674.5 m³ of water/m² of membrane over their lifetime. Therefore, membrane daily waste generation is estimated to be from 174203.1 to 243877.1 m² in 2020, which means 4500-9000 membrane modules wasted per day, approximately. This work shows the design of a membrane waste valorization plant, which allows carrying out two different processes to value exhausted membranes. The first process is focus on the recovery of membrane properties and allows reusing retired membranes and prolonging their lifetime. The second process consists of a membrane waste valorization, based on the oxidation of the membrane active layer, so it can be used as an ultrafiltration membrane module in other membrane processes.

Keywords: Membrane valorization; valorization plant; reverse osmosis; ultrafiltration; membrane waste

VALORIZACIÓN DE MÓDULOS DE MEMBRANA DE ÓSMOSIS INVERSA RETIRADOS DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

En las instalaciones de desalación de agua de mar que utilizan membranas de ósmosis inversa, las membranas son retiradas cuando el agua que producen no cumple las especificaciones de calidad solicitadas, transformándose en residuo. Según las previsiones, en 2020 la capacidad de desalación mediante membranas instalada en todo el mundo será aproximadamente de 117,5 Mm³/día. Siendo la vida útil de una membrana de OI de 5 a 7 años, y su producción media de 11-20 L/m²·h, ésta produce durante su tiempo en operación entre 481,8 y 674,5 m³ de agua/m² de membrana. La generación diaria de residuo estimada para 2020 será, por tanto, de 174203,1-243877,1 m² de membranas, aproximadamente 4500-9000 módulos de membrana cada día. El presente trabajo muestra el diseño de una planta de valorización de membranas usadas, en la cual pueden realizarse dos procesos diferenciados: un proceso enfocado a la recuperación de las propiedades de la membrana, reutilizándola y alargando su vida útil; y un segundo proceso de valorización de los módulos, basado en la oxidación de la capa activa membrana, con el objetivo de que pueda ser reutilizado como módulo de membrana de ultrafiltración en otros procesos de membranas.

Palabras clave: Valorización de membranas; planta de valorización; ósmosis inversa; ultrafiltración; residuo de membrana

1. Introducción

La desalación de agua de mar mediante Ósmosis Inversa (OI) ha experimentado un gran crecimiento desde sus inicios en los años 70 hasta la actualidad. Cada vez son más las poblaciones y los procesos industriales que consumen agua procedente de instalaciones de desalación de agua de mar o salobre y, debido a esta demanda creciente, el número de instalaciones de desalación aumenta progresivamente cada año. En 2011, había aproximadamente unas 16.000 plantas de desalación en todo el mundo con una capacidad total de tratamiento de agua de 66,5 millones de m³/día (Henthorne, 2011). Los elevados costes de operación del proceso de OI, que resultaban casi prohibitivos inicialmente, se han ido reduciendo gracias a la investigación y el desarrollo de mejoras del proceso que poco a poco se ha ido optimizando. En términos de reaprovechamiento energético, primero fueron las turbinas Francis y Pelton y luego las cámaras isobáricas las que terminaron por estandarizar el reaprovechamiento energético de la salmuera. Los módulos de membrana de OI se han ido compactando, mejorando las propiedades permeoselectivas de las membranas, especializándose para diferentes aplicaciones y modificando su naturaleza para conseguir una menor sensibilidad al ensuciamiento. El pretratamiento del agua de mar, por su parte, también ha evolucionado, sustituyéndose en muchos casos la coagulación-floculación-filtración convencional por un pretratamiento basado en microfiltración, ultrafiltración o nanofiltración.

En cuanto a la limpieza de las membranas de OI, se ha publicado multitud de trabajos de investigación con el fin de conseguir una única solución efectiva (o una solución con distintas alternativas) en función del agente ensuciador. Sin embargo, dado que las membranas tratan agua de mar o salobre con mezcla de sales, presencia de microorganismos, metales, materia orgánica de distinto origen, no parece que se pueda estandarizar una solución que sirva de forma genérica y que resulte eficaz. Por tanto, el mejor método para eliminar el ensuciamiento de las membranas sin deteriorarlas y recuperar completa o parcialmente sus propiedades iniciales continúa siendo, en primer lugar, el seguimiento de las recomendaciones dadas por el fabricante de la membrana tanto de uso de disoluciones de limpieza, como condiciones de operación y calidad de agua a tratar por la membrana. En caso de no ser suficiente, se debe investigar cada caso, estudiando qué protocolo de limpieza es el que mejor se adecúa al sistema membrana-ensuciamiento de la instalación.

Se debe tener en cuenta que el uso de la membrana para producción de agua y las secuencias de limpieza periódicas con disoluciones químicas provocan un envejecimiento progresivo de la membrana y una disminución de las propiedades permeoselectivas de ésta, que impide la producción de agua con las condiciones de calidad requeridas. Esto genera que al cabo de 5-8 años aproximadamente (M. Hernández, 2011), la membrana de OI llegue al fin de su vida útil, convirtiéndose en un residuo. De hecho, a nivel práctico, en las plantas de aguas salobres la tasa de reposición de las membranas es del orden del 5-8% anual, y en las de agua de mar superficial, este porcentaje aumenta al 10-18%.

Según las previsiones (GBI Research, 2010), en 2020 la capacidad de desalación mediante membranas instalada en todo el mundo será aproximadamente de 117,5 Mm³/día. Considerando la vida útil de una membrana de OI y que su producción media es de 11-20 L/m²·h, ésta produce durante su tiempo en operación entre 481,8 y 674,5 m³ de agua/m² de membrana. La generación diaria de residuo estimada para 2020 será, por tanto, de 174203,1-243877,1 m² de membranas, lo que supone entre 4500 y 9000 módulos de membrana cada día, aproximadamente. La valorización de este residuo constituiría un gran avance en la sostenibilidad del proceso de desalación mediante OI, y una reducción muy significativa de su impacto ambiental. Actualmente, los módulos de membrana retirados se acumulan en los

vertederos. Se estima que, a día de hoy, se generan 12.000 toneladas/año de módulos comerciales deteriorados.

El presente trabajo muestra el diseño de una planta de valorización de membranas usadas, en la cual se plantearán dos procesos diferenciados: un proceso de reutilización enfocado a la recuperación de las propiedades de la membrana mediante una limpieza intensiva, r ; y un segundo proceso, de valorización de los módulos, que transforme la membrana y permita obtener un módulo que pueda ser reutilizado en aplicaciones distintas a aquélla para la que fue fabricado originalmente.

2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo plantear un diseño preliminar del proceso de reutilización y valorización de módulos de OI retirados de instalaciones de desalación mediante OI.

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Definir un diagrama de bloques de la planta de reutilización y valorización.
- Elaborar un protocolo de recepción de residuos de membrana.
- Plantear alternativas de reutilización y valorización para los módulos de membrana de OI de arrollamiento en espiral
- Indicar qué aplicaciones son viables para los módulos tratados en la planta.

3. Caso de estudio

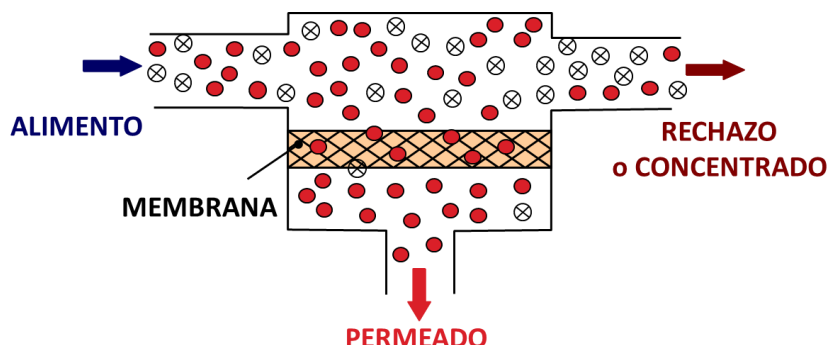
Existen cuatro tipos de configuraciones para los módulos de membrana: placa y bastidor, tubular, fibra hueca y arrollamiento en espiral. Sin embargo, a nivel industrial en Ósmosis Inversa sólo se trabaja con módulos de arrollamiento en espiral o de fibra hueca porque son los más compactos. En el proceso de desalación de agua de mar, el tipo de módulo más común es el de arrollamiento en espiral debido a su mayor capacidad de producción, mayor compacidad, menor coste, su fácil reposición, su efectividad y su mejor control de calidad del proceso de fabricación, en comparación con la fibra hueca. Por tanto, este trabajo se centrará en la reutilización y valorización de los módulos ya retirados o que se prevé se puedan retirar de instalaciones desaladoras, de tipo arrollamiento en espiral. Por ello, en este apartado se explicará el contexto de la tecnología de membranas, su fundamento y aplicaciones, la composición de un módulo de arrollamiento en espiral y su funcionamiento y las posibilidades de valorización de los módulos retirados.

3.1 Tecnología de membranas: fundamento y aplicaciones

Una membrana es una barrera semipermeable que permite la transferencia de ciertos componentes a través de ella, mientras que impide o restringe el paso de otros componentes, generando dos corrientes, el permeado y el rechazo, conteniendo esta última las sustancias que no han podido atravesar la membrana.

La filtración a través de las membranas se puede realizar de forma convencional o mediante flujo tangencial. El flujo tangencial tiene como principal ventaja que disminuye el ensuciamiento de la membrana, reduciendo el espesor de la capa de ensuciamiento y permitiendo un mayor flujo de agua a través de la superficie de la membrana durante más tiempo. La figura 1 muestra un esquema de la membrana con flujo tangencial.

Figura 1. Esquema de una membrana en flujo tangencial



Para que el permeado atraviese la membrana se requiere cierta presión, que dependerá del tipo de membrana y de su estructura. Los procesos de membrana gobernados por la presión son microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa y aparecen representados en la figura 2. Se diferencian entre sí en la presión de operación y en el tamaño de las sustancias que son capaces de separar. Así, la microfiltración es el proceso con menor presión de trabajo (0-2 bar), seguido de la ultrafiltración (1-4 bar), de la nanofiltración (4-20 bar) y en último lugar por la ósmosis inversa (20-70 bar).

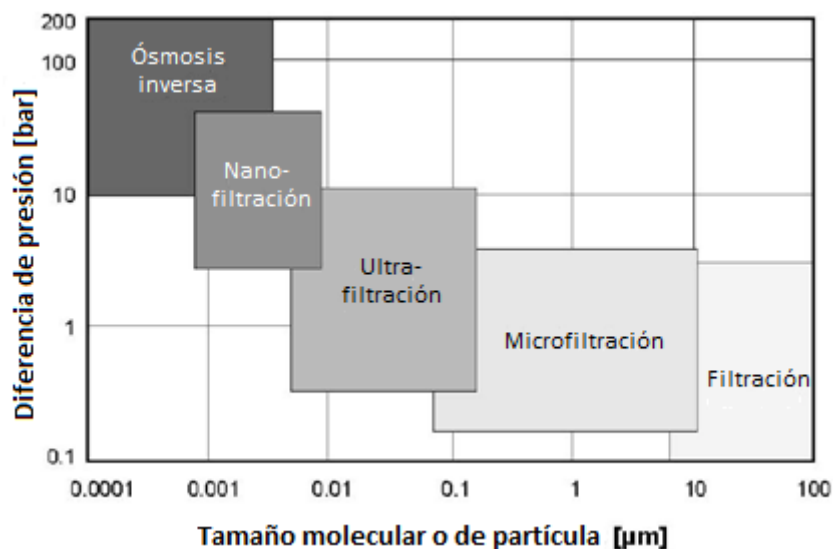
En el caso de la MF y UF las membranas son porosas, y las macromoléculas o partículas que rechazan son de mayor tamaño que el poro de la membrana. Las de NF, en cambio, pueden ser porosas o densas, mientras que las de OI son siempre membranas densas, esto es, no tienen poros. El transporte a través de las membranas densas se produce por interacción química entre soluto y membrana (fenómeno conocido como disolución-difusión). Esta interacción se debe a la formación de puentes de hidrógeno entre el agua y la membrana de OI. Las sales y demás compuestos incapaces de formar puentes de hidrógeno son rechazados por la membrana.

En función del tipo de membrana que sea, ésta será capaz de separar sustancias a partir de un determinado tamaño y, por tanto, será adecuada para una determinada aplicación. En las membranas de MF, UF y en las de NF porosas se habla de corte molecular o “cut-off”, que es el peso molecular de las macromoléculas que son retenidas en un 90%. Las membranas de MF se emplean para separar macromoléculas y partículas de gran tamaño, mientras que las de UF también separan bacterias y macromoléculas de menor tamaño. Las membranas de NF densas son capaces de separar hasta iones divalentes, mientras que las de OI separan también los iones monovalentes. En la figura 2 se puede visualizar los rangos de separación de estos procesos de membranas, así como los tamaños de los solutos más frecuentes que se desean retener en la industria.

Respecto a las aplicaciones de estas técnicas, se tienen las siguientes:

- membranas de MF: clarificado de zumos, vinos y cerveza, o la eliminación de bacterias presentes en el agua.
- membranas de UF: en potabilización de aguas como etapa principal del proceso, o como pretratamiento en la desalación de agua de mar, o como tratamiento terciario en la depuración de aguas residuales. La UF también se emplea en la concentración de proteínas, en el tratamiento del lactosuero o de la leche, así como en la industria de zumos.

Figura 2. Capacidad de separación y requerimientos de presión de los distintos procesos de membrana gobernados por la presión (Rautenbach & Melin, 2003)



Respecto a las aplicaciones de estas técnicas, se tienen las siguientes:

- membranas de MF: clarificado de zumos, vinos y cerveza, o la eliminación de bacterias presentes en el agua.
- membranas de UF: en potabilización de aguas como etapa principal del proceso, o como pretratamiento en la desalación de agua de mar, o como tratamiento terciario en la depuración de aguas residuales. La UF también se emplea en la concentración de proteínas, en el tratamiento del lactosuero o de la leche, así como en la industria de zumos.
- membranas de NF: tratamiento de aguas, como es el ablandamiento, la eliminación de contaminantes como metales pesados o pesticidas o la eliminación de nitratos. También es de aplicación en la industria láctea y en la del azúcar, entre otras muchas.
- membranas de OI: desalación de agua de mar, en la descontaminación de efluentes, en la industria de la pintura por electrodeposición y en multitud de sectores de la industria alimentaria.

Dado que este trabajo pretende valorizar las membranas de OI, tal y como se verá más adelante, una de las opciones de valorización será transformar la membrana de OI en otra de NF, UF o MF, dado que los requisitos de selectividad (capacidad de retención de elementos no deseados) son menos estrictos, permitiendo obtener una membrana apta para otras aplicaciones como las descritas anteriormente.

3.2. Componentes de los módulos de membrana de OI empleados en desalación

Un módulo de arrollamiento en espiral está compuesto por los siguientes elementos:

a) Membrana

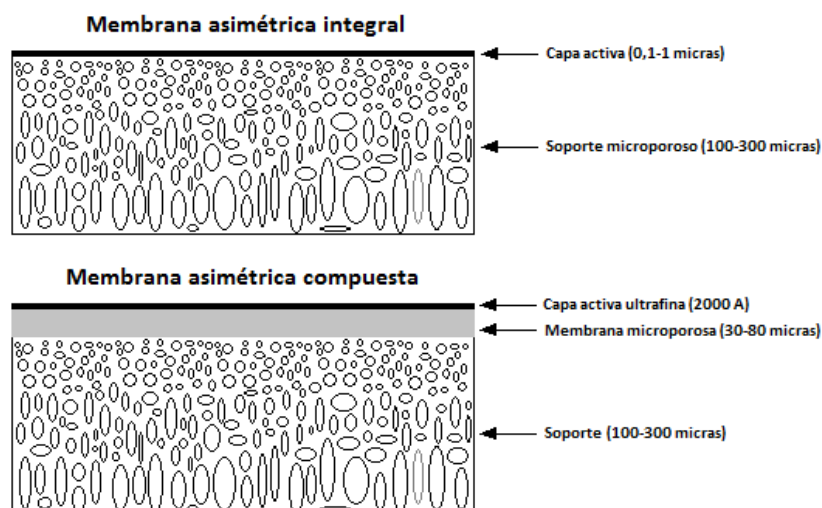
En el proceso de ósmosis inversa, las membranas que han resultado más rentables para su aplicación a escala industrial han sido las de naturaleza orgánica. Según su estructura, las membranas se clasifican en simétricas y asimétricas. Las membranas simétricas tienen idénticas características físico-químicas en cualquier parte de la membrana y están compuestas por una única capa. Las membranas asimétricas están formadas por dos capas: una capa polimérica muy delgada o capa activa, situada sobre una segunda capa de mayor espesor y porosidad, que actúa exclusivamente como soporte, sin afectar a las características

separadoras del sistema. Esto hace que estas membranas sean capaces de combinar excelentes características selectivas con altas permeabilidades.

Las membranas asimétricas son integrales cuando la capa activa y el soporte poroso son del mismo material. Se fabrican por el método de inversión de fase, dando lugar a una capa activa de 0,1 a 1 μm de espesor. Son membranas baratas de fabricar, pero no son muy uniformes.

A mediados de los 70, se consiguió un gran avance en el desarrollo de las membranas de OI con la introducción de las membranas TFC (thin film composite) o membranas asimétricas compuestas (Khedr, 2002). La capa soporte consiste en una resina polisulfonada con una porosidad gradual de arriba hacia abajo, la cual tiene una alta resistencia a la compactación y consigue altos flujos pero con poca selectividad. Esta polisulfona constituye habitualmente una membrana de Ultrafiltración (UF). Esta capa soporte de polisulfona se une por su lado inferior a una capa esponjosa de poliéster no entretejido. En el lado superior de la capa soporte, polimeriza la capa activa de la membrana. Esta capa activa es generalmente una poliamida, con un excelente rechazo de sales, buena permeabilidad y buena resistencia química. Se fabrican por polimerización interfacial "in situ", obteniéndose una capa activa extremadamente fina (entorno a 2000 Å). En la figura 3, se puede observar la estructura de las capas que forman las membranas asimétricas.

Figura 3. Tipos estructurales de las membranas asimétricas



En aplicaciones en las que el agua de alimentación tiene un alto potencial de ensuciamiento, como sucede en el tratamiento de aguas residuales y superficiales, se emplean membranas de acetato de celulosa asimétricas integrales, por ser poco sensibles al ensuciamiento (Ibrahim, 1998).

En la desalación de agua de mar se emplea fundamentalmente membranas de OI tipo TFC de poliamida, ya que producen flujos de permeado muy superiores con índices de rechazo de sales muy elevados. Las membranas de poliamida presentan mayor resistencia a la temperatura y mayor tolerancia a ácidos y bases. El principal problema que presentan estas membranas es que son muy susceptibles de sufrir degradación por oxidación cuando entran en contacto con cloro libre, que a concentraciones superiores a 0,1 ppm destruye la membrana. Esta circunstancia debe ser considerada en el pretratamiento del agua antes de pasar por la membrana, introduciendo posteriormente a la etapa de cloración una etapa de neutralización del cloro con metabisulfito sódico para que la membrana no resulte dañada.

b) Otros materiales que componen el módulo arrollado en espiral

A parte de la membrana, que es el elemento fundamental del módulo, éste contiene otros componentes, como son:

- Distribuidor de flujo o promotor de turbulencias. Se ubica sobre la capa activa de la membrana y su función es la de generar turbulencia en el alimento y que no haya caminos preferenciales.
- Colector de permeado. Se ubica debajo del soporte de la membrana, suele estar fabricado en poliéster y su función es facilitar el drenaje del permeado hasta el tubo colector que se encuentra en el centro del módulo.
- Adhesivo. Se emplea para sellar las espiras de membrana-distribuidor-colector a la cara interior de la carcasa.
- Tubo axial colector de permeado. Se sitúa en el centro del módulo, en dirección axial, y su función es recoger el permeado y enviarlo fuera del módulo.
- Carcasa exterior. Fabricada en fibra de vidrio y poliéster, su función es proteger la membrana y el resto de componentes del interior del módulo, darles rigidez y resistencia mecánica, ya que ha de trabajar a presiones muy elevadas.
- Juntas tóricas. Cada módulo cuenta con una junta tórica en cada extremo, mediante las cuales se evita que se mezclen las corrientes de rechazo de los diferentes módulos ubicados en un mismo tubo de presión.

En la figura 4, se puede ver un esquema del módulo de arrollamiento en espiral con todas sus capas:

Figura 4. Capas que componen un módulo de arrollamiento en espiral

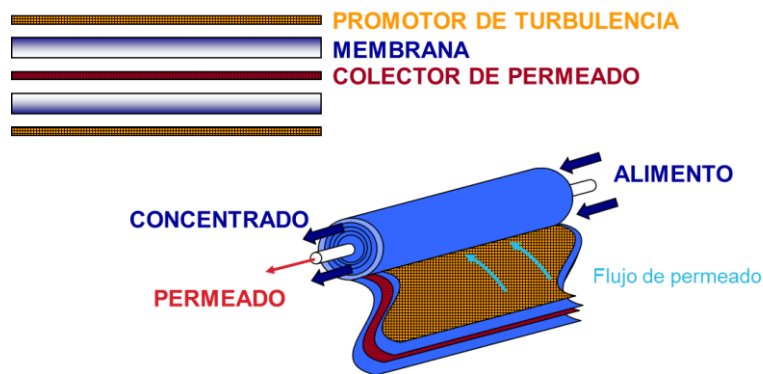


Figura 1.

Dado que se pretende valorizar y/o reutilizar los módulos retirados, se deberá considerar también la compatibilidad de los tratamientos planteados con los materiales de los módulos, con el fin de no degradarlos, y poder llevar a cabo su reutilización. En la tabla 1 se puede observar a modo de ejemplo el tipo de materiales de un módulo y la composición en peso de éstos en un módulo de OI de 8 pulgadas de la marca Hydranautics.

Tabla 1. Peso de los distintos componentes de un módulo de OI

Material	Peso (kg)
Poliamida	0.05
Polisulfona	0.88
Poliéster	5.59
Polipropileno	1.58
Poliuretano	2.17
Epoxy	0.75
Fibra de vidrio E	1.28
ABS	1.15
Noril (éter de polifenileno)	0.04
EPR (caucho etilenpropileno)	0.032

3.3 Tratamiento de Valorización planteado: degradación controlada de la capa activa de la membrana

La valorización planteada pretende transformar el módulo de membrana agotado, dándole un nuevo uso.

Como se ha descrito anteriormente, las membranas de OI tipo TFC de poliamida presentan como inconveniente la alta sensibilidad a agentes oxidantes. Esta sensibilidad puede aprovecharse para transformar la membrana. Como la capa inmediatamente inferior a la poliamida es una polisulfona, típico material empleado en membranas de Ultrafiltración (UF), se podría emplear hipoclorito sódico u otro tipo de agente oxidante para degradar de forma controlada la capa de poliamida. Si esta degradación se produjera de forma parcial, se podrían obtener membranas con propiedades típicas de las membranas de nanofiltración (NF). Si la degradación de la poliamida fuera total, daría lugar a membranas de polisulfona con propiedades típicas de las membranas de UF. Las membranas transformadas obtenidas mediante este método se pueden reutilizar en otros procesos. Por un lado, las membranas transformadas a nanofiltración podrían ser implementadas en los procesos de ablandamiento de agua salobre, mientras que las membranas transformadas a ultrafiltración podrían emplearse en el pretratamiento de las instalaciones de desalación o en el tratamiento terciario de aguas residuales.

3.4 Tratamiento de reutilización de la membrana

Para el caso de las membranas asimétricas integrales de poliamida, éstas no pueden valorizarse siguiendo el método descrito en el apartado 3.3, ya que, si se degradara totalmente la capa activa de la membrana, la capa inferior no tendría capacidad de retención ni resistencia mecánica para funcionar como una membrana. La única opción posible para aprovechar los residuos de este tipo de módulos de membrana sería aplicarles una limpieza intensiva y severa para intentar recuperar al máximo sus propiedades permeoselectivas, alargando así su vida útil y, en función de su estado tras la limpieza, destinar los módulos a una aplicación u otra o, de no ser posible ninguna recuperación, enviarlo finalmente a vertedero controlado.

4. Diseño de planta propuesto

Una vez conocido el tipo de residuo que se pretende valorizar, los futuros estadios en los que podría transformarse y los procesos en los que podría tener aplicación, el siguiente paso es definir las vías posibles para su valorización. Como se ha comentado en el apartado anterior, cuando la membrana es TFC de poliamida, la vía más interesante para reaprovechar este residuo es oxidando su capa activa con un agente oxidante (este trabajo propone el NaClO) y convertirla de forma controlada en una membrana de UF preferiblemente. Sin embargo, si la membrana del módulo a valorizar es de poliamida pero fabricada mediante inversión de fase, la oxidación de la capa activa inutilizaría la membrana, por lo que no se podría utilizar y seguiría siendo un residuo. En estos casos, se propone una limpieza intensiva como vía para recuperar sus propiedades permeoselectivas y alargar, si es posible, su vida como membrana de OI.

4.1. Diagrama de bloques de la planta de reutilización y valorización de módulos de OI

En la figura 5 se muestra el diagrama de bloques de la planta de reutilización y valorización de módulos de membrana de OI retirados de plantas desaladoras. A continuación, se describe el procedimiento de manera simplificada.

-Recepción del residuo

Cuando un módulo retirado llega a la planta de valorización, interesa recabar la máxima información para poder gestionarlo adecuadamente. Resulta importante conocer:

- Lugar geográfico de procedencia.
- Tipo de agua que trataba durante su tiempo en operación (salobre o de mar).
- Posición que ocupaba en la instalación de la que proviene.
- Ensuciamiento predominante en la instalación.

-Identificación de la membrana

Si su naturaleza es TFC de poliamida, se envía al proceso de valorización por oxidación. En caso contrario, se envía al proceso de reutilización tras limpieza intensiva.

a) PROCESO DE VALORIZACIÓN POR OXIDACIÓN

Caracterización en planta de OI

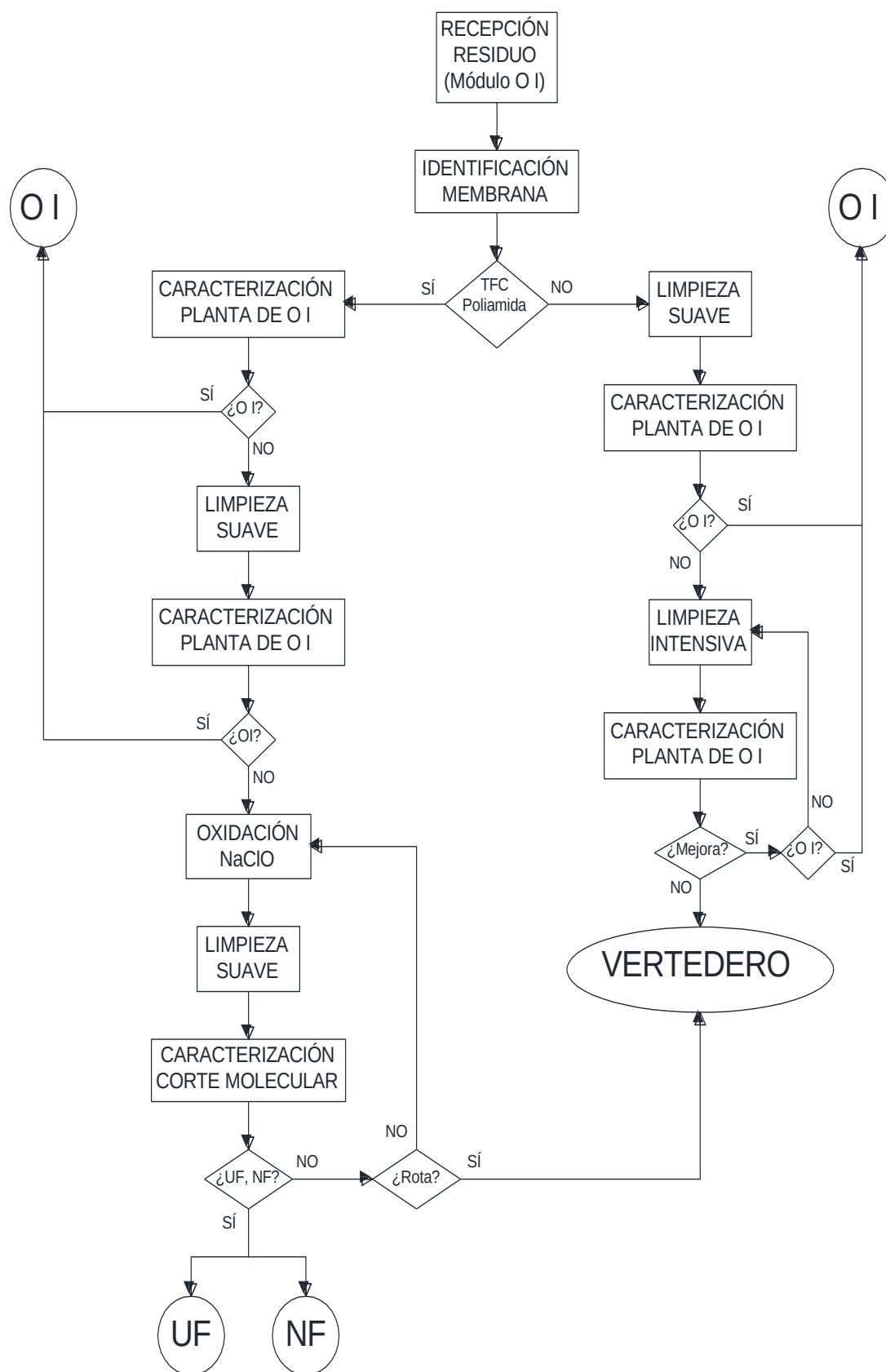
Siguiendo las indicaciones del fabricante del módulo, que varían de uno a otro, se realiza un test de caracterización de las propiedades permeoselectivas de la membrana, según la metodología indicada por García Fayos et al. en 2014, con las siguientes variaciones: el ensayo se realiza en una planta a escala industrial sobre el módulo de 8 pulgadas en cuestión, y la duración del test será de 4 horas, para asegurarse de que se alcanza el estado estacionario. La planta cuenta con un depósito de 5 m³, una bomba de alta presión y equipamiento de control de caudal, presión y pH. Durante el test de caracterización se monitoriza el flujo y la concentración de sales del permeado. Si el resultado del test indicara que el módulo cumple el comportamiento típico de un módulo de OI, se enviaría de vuelta a la instalación de la que procede, por estar aún en condiciones de operación (se trataría de un error de gestión por parte de la desaladora). Por el contrario si no cumple las especificaciones, se procedería a la siguiente etapa: limpieza suave.

Limpieza suave

La limpieza suave se lleva a cabo en la planta de limpieza, a 4 bar de presión, y consta de varias etapas en serie:

- Limpieza básica con NaOH a un pH de 11 durante 1 hora con recirculación.

Figura 3. Diagrama de bloques de la planta de valorización de módulos de OI.



- Enjuague con agua destilada
- Limpieza ácida con ácido cítrico 2% (p) y pH 2-4 durante 1 hora con recirculación.
- Enjuague con agua destilada hasta que no hayan restos de ácido.

Después de la limpieza suave se repite el test de caracterización para comprobar el grado de recuperación de las propiedades permeoselectivas típicas de una membrana de OI. Si es satisfactorio (rechazo de sales mayor igual o mayor al 95% y flujo de permeado mayor de 0.5 L/m²·h·bar y densidad del flujo de permeado, la membrana se remite de nuevo a la planta desaladora. En caso contrario, se envía a la planta de tratamiento oxidativo.

Tratamiento oxidativo con NaClO

En la planta de tratamiento oxidativo se bombea una disolución concentrada de NaClO 10% p/v al interior de los módulos a tratar y se deja la membrana sumergida durante 2 días. Transcurrido el tiempo, se recircula la disolución durante 2 horas a 4 bar de presión, se desplaza la disolución fuera de los módulos y se enjuagan con agua destilada durante 1 hora. Después del enjuague se repite el procedimiento de la limpieza suave.

Caracterización del corte molecular

Una vez oxidada y lavada la capa activa de los módulos, se procede a la caracterización del corte molecular de la membrana obtenida. Esta etapa se realiza en una planta específica, a presión baja-media, en la que se llevan a cabo tests de retención de solutos. Se ensaya la retención del módulo tratado a dextranos y polietilenglicoles de un amplio rango de pesos moleculares, normalizando las condiciones del ensayo. Tras esta etapa, en función del corte molecular calculado, el módulo se destinará a una aplicación de UF (la primera opción sería como pretratamiento en la planta desaladora de la que procede) o de NF. Puede ocurrir que el módulo de membrana se haya visto dañado excesivamente por el tratamiento oxidativo. En ese caso, no se podría reutilizar y se enviaría al vertedero. También puede ocurrir que el tratamiento oxidativo no le haya afectado de forma significativa; en esta situación, se enviaría el módulo a una segunda oxidación y seguiría con el proceso descrito anteriormente.

b) PROCESO DE REUTILIZACIÓN TRAS LIMPIEZA INTENSIVA

Cuando la membrana del módulo a tratar no es TFC de poliamida, el procedimiento es diferente. La primera etapa sería una limpieza suave siguiendo la metodología explicada anteriormente. Tras la limpieza suave, se realiza una caracterización en la planta de OI para determinar su estado permeoselectivo. Si la limpieza suave hubiera sido suficiente para recuperar las propiedades originales de la membrana, se le remitiría el módulo a la instalación de procedencia para que continuara su vida en planta. En caso de que no haya recuperado las propiedades, se procedería a la etapa de limpieza intensiva.

Limpieza intensiva

La etapa de limpieza intensiva se lleva a cabo a 4 bar en la misma planta que la limpieza suave. Consta también de varias etapas, pero las condiciones son más extremas que en el caso anterior al requerirse una limpieza más profunda (Hydranautics, 2014):

- Limpieza básica con disolución de NaOH 0.1% (p) + dodecil sulfato sódico (SDS) 0.03% (p) a 30°C y de 11.5 durante 1 hora en reposo y 2 horas con recirculación.
- Enjuague con agua destilada.
- Limpieza ácida con HCl 0.5% (p) y pH 2.5 a 35°C durante 2 hora con recirculación.
- Enjuague con agua destilada hasta que no hayan restos de ácido.

Para comprobar si la limpieza intensiva ha sido eficaz y ha logrado que el flujo de permeado del módulo aumente al igual que la retención de sales, se lleva el módulo a caracterizar a la

planta de OI. En caso de haber mejorado las propiedades pero no cumplir aún con las especificaciones para trabajar como membrana de OI, se envía el módulo a una segunda limpieza intensiva. Si tras la segunda limpieza intensiva sigue sin cumplir, o si tras la primera limpieza intensiva no mejoró, se envía al vertedero. Si recupera las propiedades de una membrana de OI tras alguna de las dos limpiezas, se envía a la instalación desaladora alargando así su vida útil.

5. Conclusiones

Las principales conclusiones extraídas del trabajo realizado son las siguientes:

- Los módulos de OI presentan un elevado impacto ambiental por su composición y dado el auge de la desalación en los últimos años, se estima una elevada producción de este residuo en los próximos años.
- La valorización y reutilización de los módulos de OI retirados de las instalaciones de desalación de agua de mar puede resultar viable y contribuye positivamente a reducir el impacto ambiental de dichas instalaciones.
- La reutilización mediante limpieza intensiva puede alargar la vida útil de las membranas para el mismo tipo de aplicación para la que fueron diseñadas mientras que la valorización puede generar membranas que pueden ser utilizadas para distinto tipo de aplicación para las que fueron utilizadas inicialmente.
- Además, la valorización de estos residuos, si se realiza de forma adecuada, permite a la planta desaladora que los genera autoabastecerse de membranas de UF para el pretratamiento de su propio proceso.

Bibliografía

- Garcia-Fayos, B., Arnal, J.M., Gimenez, A., Alvarez, S., Sancho, M. (2014). *Study of the fouling and cleaning of RO membranes from a seawater desalination plant by means of static assays*. Aceptada su publicación en las actas de: Conference and exhibition on Desalination for the environment: clean water and energy. Cyprus.
- GBI Research. Desalination Market to 2020 - Technology Driven Cost Reduction in Membrane Based Processes set to Drive Sustainability Investments into the Market (2010). Disponible vía web en: http://www.researchandmarkets.com/reports/1529564/desalination_market_to_2020_technology_driven Fecha de consulta: Mayo 2012.
- Henthorne, L. (2011). *The Current State of Desalination*. International Desalination Association. Publicado en: <http://idadesal.org/desalination-101/desalination-overview/>
- 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://fcc.a.es/documentos/05_documentos_por_temas/Desalacion%20Tablas%20de%20Ogestion%20y%20costes/Informe_Tablas_25_2.pdf
- Hydranautics (2013). *Disposal of used RO elements*. Publicado en: <http://www.membranes.com/docs/tsb/TSB123.pdf> Fecha de consulta: abril 2016.
- Hydranautics (2014). Foulants and cleaning procedures for composite polyamide RO membrane elements (ESPA, ESNA, CPA, LFC, NANO and SWC. Publicado en: <http://www.membranes.com/docs/tsb/TSB107.pdf>
- Ibrahim, J.C. (1998). *Desalación de aguas*. Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos. Madrid.
- Khedr, M.G. (2002). Development of reverse osmosis desalination membranes composition and configuration: future prospects. *Desalination*, 153, 295-304.

Rautenbach, R. & Melin, T. (2003). *Membranverfahren. Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*. Editorial Springer DE.