

Las membranas:



Juan Manuel Crovetto de la Torre
Doctor Ingeniero Industrial

una respuesta de presente y de futuro en el tratamiento de todo tipo de aguas

INTRODUCCIÓN

Cada vez es mayor la demanda de la Sociedad desarrollada para disponer de aguas potables de la mejor calidad, no solamente exentas de patógenos, de olores, de sabores o de sustancias que, incluso en mínimas cantidades, pueden ser desagradables o nocivas para la salud, sino también exentas de cantidades importantes de oxidantes que, por otra parte, garantizan (en parte) algunos de los objetivos anteriores. Son muchos los trabajos que avalan que la generación de compuestos de adición formados al entrar en contacto con ciertos contaminantes y los oxidantes que se utilizan para garantizar la potabilidad del agua son también nocivos para la salud.

No es menor la necesidad de reutilizar las aguas usadas para una amplia gama de aplicaciones. Éstas van desde los usos industriales a los riegos agrícolas o urbanos, las recargas de acuíferos o simplemente para realizar su vertido en las condiciones de calidad no agresivas para el medio que los recibe.

En un largo etcétera de necesidades relacionadas con el agua, cabe destacar también la obtención de aguas de calidad mediante la desalini-

zación o desalación de aguas salobres y de aguas marinas. Esta solución (a veces la única) es cada vez más aplicada para resolver el problema de la escasez de agua de calidad para abastecimientos públicos, riegos o usos industriales.

Las anteriores aplicaciones y otras muchas son inmejorablemente resueltas por instalaciones que incluyen las membranas como barrera al paso de la contaminación, sea ésta del tipo que sea (en suspensión, disuelta, orgánica o inorgánica, tóxica, biológica, etc.).

Las membranas pueden “fabricarse a medida” del problema adaptándose muy bien a casi todos los casos. Cada vez son más resistentes mecánica y químicamente y sus precios más asequibles. La relación calidad de agua tratada-precio abonado es muy difícil de mejorar por procedimientos de tratamiento clásicos. El coste adicional que pudiera suponer la utilización de membranas para resolver estas cuestiones es, por otra parte, cada vez más marginal en la factura al usuario final.

Pretendemos en esta presentación introducir un poco al lector en el potencial de este producto y en las ventajas que presenta, que hacen de las membranas un sistema imprescindible en muchos casos y convierte a éstas y a su implementación en la tecnología con mayor futuro en el campo del tratamiento de todo tipo de aguas.

¿QUÉ ES UNA MEMBRANA ORGÁNICA SEMIPERMEABLE ?

Es una estructura de uno o varios polímeros, de bajo espesor y gran superficie, provista de un gran número de poros homogéneos, perfectamente continua (ausencia casi total de defectos) que permite el paso del agua, impidiendo parcial o totalmente el paso de las partículas (en suspensión, coloidales o disueltas) que la acompañan.

Se puede fabricar en forma de “tela” o en forma de fibra hueca; en este caso, puede ser de un tamaño que va desde el capilar hasta algunos centímetros de diámetro (tubular).

Normalmente, las membranas presentan una sola “cara activa”, es decir, una superficie que reúne las exactas características de porosidad que se pretenden. Esta “cara activa” debe de ser lo más fina posible (desde algunas micras hasta unos cientos de Ångström), al objeto de producir la menor disipación de energía posible en el agua que transporta. Debe ser mecánicamente robusta, perfectamente continua, homogénea y químicamente muy resistente para soportar los lavados a los que necesariamente debe someterse con mayor o menor frecuencia.

Sus poros (que deben ser homogéneos como ya se ha dicho) determinan su aplicación. Hagamos un pequeño repaso simplificado.

- Membranas que disponen de poros cuyo diámetro oscila entre 0,1

y 1 micra: Se denominan “de micro-filtración”. Efectúan un “pulido” de las aguas, eliminan bacterias, microalgas, e incluso un elevado porcentaje de virus. (No necesariamente las partículas menores que el tamaño de poro atraviesan la membrana, antes al contrario).

- Membranas que disponen de poros cuyo diámetro oscila entre 0,005 y 0,1 micra. Se denominan “de ultrafiltración”. Retienen estructuras orgánicas e inorgánicas, coloidales o disueltas en función de su Peso Molecular (llamado DALTON a estos efectos) y de su estructura de grupos activos (ácidos orgánicos, alcoholes, etc.).

- Membranas que disponen de poros que se definen en la propia estructura molecular del polímero, es decir, que el transporte de agua se realiza por mor de la presión diferencial entre ambos lados de la membrana. Son muy permeables al agua pero poco o nada permeables a las sales que ésta lleva disuelta. El paso de sales se determina en función de los parámetros de transporte correspon-

Respecto al paso de sales a través de estas membranas, se pueden obtener “rechazos de sales” muy distintos, en función, como decíamos, del polímero utilizado como capa activa y las características de ésta respecto a parámetros de carga eléctrica en superficie, hidrofiliicidad del polímero, etc. En concreto, pueden realizarse, entre otros, los siguientes tipos de membranas:

- Membranas de alto-alto rechazo (mayor del 99,5%) de iones de sales monovalentes (Cl Na), que traba-

purificación únicamente de aguas muy poco salobres, con una presión de trabajo en el entorno de los 7 kg/cm².

- Membranas con elevados rechazos para iones divalentes, (calcio, magnesio, SO₄⁻, etc.), pero con un índice de rechazo sensiblemente inferior para las sales compuestas por iones monovalentes (Cl, Na⁺) donde el rechazo puede oscilar entre el 40 y 80%. Estas membranas se utilizan típicamente para ablandamiento de aguas y, junto con las anteriores, para

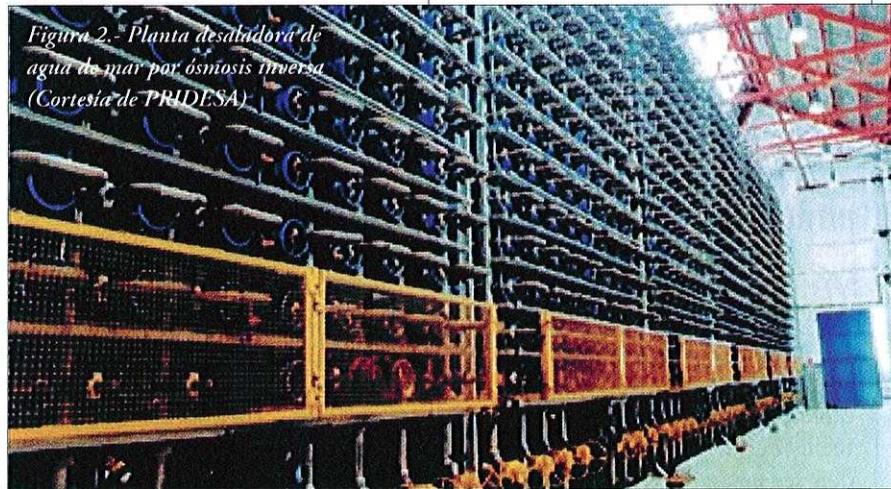


Figura 2. Planta desaladora de agua de mar por ósmosis inversa (Cortesía de PRIDESA)

Son cada vez más las voces y los trabajos que indican que estos productos derivados no son siempre inocuos para la salud.

dientes a las propias sales disueltas y del polímero que compone la membrana. Este tipo de membranas se conocen como de ósmosis inversa y se pueden fabricar con un amplio margen de características. Rechazan totalmente bacterias, virus, pirógenos y estructuras orgánicas, incluso de pesos moleculares muy bajos, produciendo en este sentido un efluente de gran pureza. La presión diferencial a ambos lados de la membrana, ha de ser, naturalmente, superior a la diferencia de las propias presiones osmóticas del agua bruta y el agua permeada.

jan entre 50 y 80 kg/cm² de presión de bombeo. Son capaces de desalar el agua de mar.

- Membranas análogas a las anteriores y que con rechazos similares, pero trabajando en el entorno de 15 a 30 kg/cm² de presión de agua bruta. Permiten desalar aguas de pozo o de río, de salinidades elevadas (por ejemplo, 3 g de sales/litro de agua).

- Membranas denominadas “de baja presión” que, constituidas de forma similar, presentan rechazos de sales monovalentes por encima del 99%, pero ofrecen al tiempo muy alto flujo y pueden ser utilizadas para

purificación de aguas, dado que constituyen barrera casi absoluta a la práctica totalidad de componentes orgánicos, con un costo energético en el bombeo significativamente bajo.

¿PARA QUÉ SIRVEN Y POR QUÉ SON INTERESANTES?

En primer lugar, indiquemos que el tratamiento de agua a través de membranas semipermeables es posiblemente el sistema más ecológico que puede utilizarse. Ello se debe a que la membrana solamente hace un efecto de separación de un flujo contaminado en otros dos. El primero de

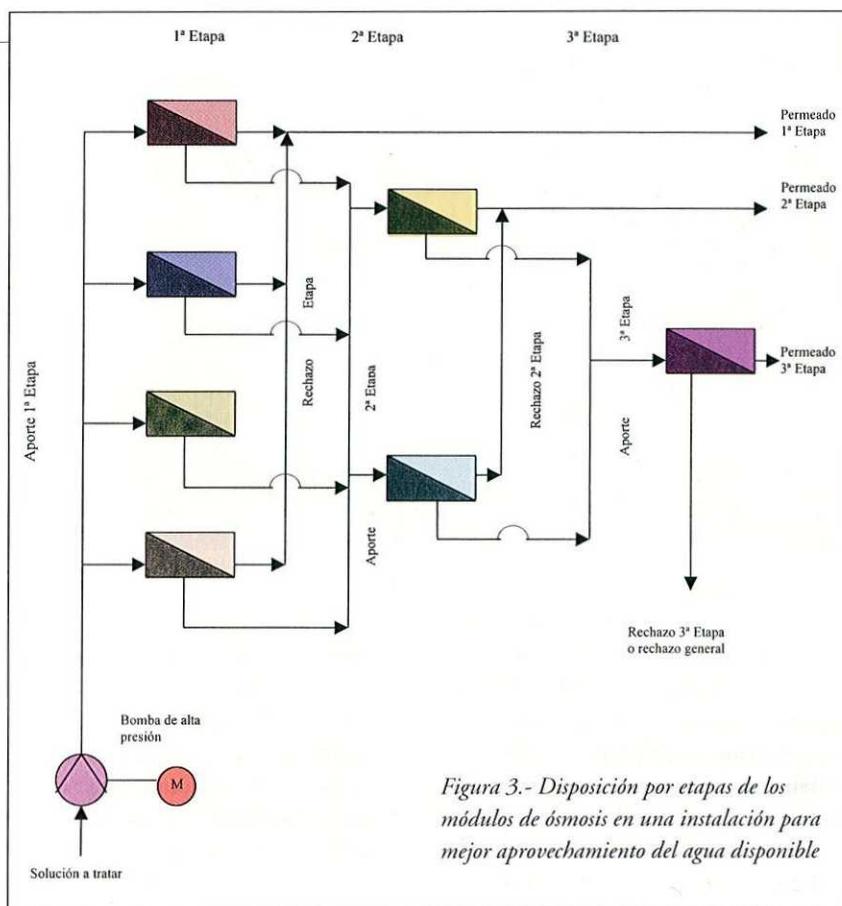


Figura 3.- Disposición por etapas de los módulos de ósmosis en una instalación para mejor aprovechamiento del agua disponible

ellos, el que atraviesa la membrana (permeado), es el que más frecuentemente tiene una aplicación. El segundo flujo, que oscila entre el 10 y el 50% del flujo original contiene la totalidad de la contaminación original o de los elementos que acompañan al agua bruta. Este trabajo lo realiza la membrana de una forma mecánica sin que normalmente sea necesario añadir cantidades significativas de reactivos o efectuar regeneraciones químicas frecuentes (por ejemplo, caso de los cambiadores de iones) y también sin cambio de estado en el agua.

Hay ocasiones, especialmente en aplicaciones industriales, donde lo que se pretende es lo contrario, y el producto útil es justamente el concentrado. Es muy amplia esta gama de aplicaciones de las que algo indicaremos más adelante.

Por otra parte, las características del agua producida a través de membranas son sensiblemente mejores que la que se obtiene por los procedimientos clásicos de depuración, tal como las decantaciones, filtraciones,

centrifugaciones, reactores biológicos clásicos, etc.

Otro aspecto interesante de la utilización de membranas en el tratamiento del agua es la gran capacidad de las obras que se realizan. Efectivamente, la elevada superficie de cara activa que puede disponerse por unidad de volumen, disminuye la superficie necesaria para la implantación de las instalaciones. Ésta puede llegar a valores incluso menores del 25% de la requerida en un sistema clásico.

Finalmente, el precio de las instalaciones de membranas es cada vez más comparable y, en muchos casos, sensiblemente mejor que el que se obtiene por procedimientos clásicos de depuración.

A modo de resumen, indicamos a continuación las aplicaciones más clásicas de las membranas al tratamiento de agua:

Aguas potables

Las aguas potables, en su etapa final de tratamiento, y previamente a

su distribución para su uso como abastecimiento a la población, clásicamente requieren la adición de cantidades significativas de oxidantes más o menos enérgicos, tales como el cloro gas, hipocloritos, permanganato potásico, ozono u otros, los cuales actúan impidiendo el desarrollo de bacterias, virus, hongos, etc. Al mismo tiempo destruyen los microorganismos que se hallan presentes en el agua en ese momento, que han “escapado” al tratamiento previo. Esto, por una parte, no impide que los restos de estos microorganismos destruidos e inactivos como tales, continúen presentes en el agua y en muchos casos combinados con el agente oxidante.

Son cada vez más las voces y los trabajos que indican que estos productos derivados no son siempre inocuos para la salud.

El procedimiento de desinfección de aguas a través de membranas de microfiltración y ultrafiltración producen una eliminación “quasi total” de estos microorganismos o de sus restos que simplemente no existen en el agua ultrafiltrada. Obviamente, y aunque los requerimientos sanitarios obliguen a añadir un agente oxidante estable como garantía de potabilidad, la cantidad de éste que se requiere es sensiblemente menor que la que se requeriría de no haberse producido la micro o ultrafiltración previa. Adicionalmente, las características organolépticas del agua así procesada son muy sensiblemente mejores a los que presenta el agua potable obtenida por procedimientos clásicos de tratamiento. La razón se debe a que gran parte de los “sabores” u “olores” se deben a la presencia de compuestos de adición de los oxidantes con ciertos compuestos no decantables ni filtrables en filtros clásicos. En otras ocasiones ciertas algas o partículas no retenidas en filtros clásicos generan estos sabores y, asimismo, son eliminados fácilmente por las membranas.

	BRUTA	TRATADA	% ELIMINACIÓN
TSS (ppm)	1.255	6,44	99,49
Turbidez (NTU)	940	1,22	99,87
DQO (ppm)	1.330	83,81	93,70
DBO ₅ (ppm)	772	10,24	98,67
Nitratos (ppm)	0,58	0,16	72,41
Nitritos (ppm)	0,316	0,059	81,33
Amonio (ppm)	23,2	22,3	---
Detergentes aniónicos (ppm)	18	1,9	89,44
Aceites y grasas (pppm)	67	4,3	93,58

Figura 12.- Rendimiento de eliminación de varios compuestos con aguas altamente cargadas, mezcla de agua residual urbana y de agua industrial. Los datos representan valores medios de un agua bruta altamente variable en su composición

Aguas residuales urbanas

Es sabido que en procesos de depuración de aguas residuales urbanas y de ciertas aguas residuales-industriales que tienen elevada contaminación orgánica se realiza en instalaciones que se conocen con el nombre de "Tratamientos biológicos por fangos activados" debido a que las aguas, una vez desbastadas se introducen en un gran depósito aireado donde un cultivo de diferentes tipos de bacterias actúan fijando la materia orgánica disuelta o en suspensión en "flóculos" que pueden separarse del agua por simple decantación. Estas instalaciones son muy complejas, requieren fuertes inversiones que demandan, además, una gran superficie, no siempre fácil de adquirir para las Administraciones.

El proceso "biológico" se basa, como decimos, en una serie de pre-tratamientos mediante el uso de rejillas, desarenadores, desengrasadores y decantadores primarios que dejan el agua en condiciones de ser procesada en el "reactor biológico". Estos reactores (en razón de las limitaciones en la concentración de fangos obtenibles) requieren volúmenes importantes y también elevadas cantidades de oxígeno para su buena marcha.

Adicionalmente, se requiere, como hemos dicho, una decantación secundaria para separar los fangos biológicos formados en el reactor anterior del agua sobrenadante que es el efluente de la instalación. Este agua efluente tiene frecuentemente unas características aceptables para su vertido pero difícilmente aceptables para su reutilización.

Nuevamente, los sistemas de depuración en base a membranas presentan ventajas frente al procedimiento clásico comentado.

Los procesos de depuración de aguas residuales urbanas y asimiladas, mediante el uso de membranas requieren, asimismo, de un pretratamiento de desbaste, desarenado y desengrasado, análogo al de las instalaciones clásicas. Ahí acaban, sin embargo, las similitudes.

El agua desbastada penetra en este tipo de instalaciones inmediatamente en un reactor biológico, de concepción similar al clásico, pero de tamaño sensiblemente menor. En este reactor se hallan inmersas una serie de membranas de microfiltración o ultrafiltración que pueden ser planas o de fibra hueca, las cuales permiten realizar la extracción del agua del reactor en lugar de efectuarlo en el "decantador secundario". En este reactor, se genera una biomasa, también aná-

loga a la obtenida en los procedimientos clásicos, pero, dado que el agua se extrae sin acompañarse en absoluto de fangos biológicos, la concentración de éstos puede controlarse con facilidad alcanzándose sin problemas niveles de concentración entre cinco y ocho veces superiores a los que se consiguen en un reactor clásico.

Por esta razón, el reactor biológico de membranas es sensiblemente menor en volumen al correspondiente a un reactor biológico clásico. No se requieren en este proceso ni decantador primario ni decantador secundario. Las calidades de agua obtenidas tampoco son comparables.

A modo de comparación, establecemos un pequeño cuadro en el que se observan los rendimientos obtenidos en una unidad piloto industrial instalada en una problemática instalación que mezcla agua residual urbana con agua residual industrial (Fig. 12), así como otra tabla con valores obtenidos de la literatura (Fig. 13). Recordemos que en una instalación clásica, la obtención de

Anjou Recherche (Research Centre in Maisons-Laffite)

	BRUTA	TRATADA	% ELIMINACIÓN
TSS (ppm)	120	ND	> 99
Turbidez (NTU)	148	0,24	99,84
DQO (ppm)	482	10	97,93
DBO ₅ (ppm)	220	4,8	97,82
Nitratos (ppm)	---	---	---
Nitritos (ppm)	---	---	---
Amonio (ppm)	---	---	---
Fósforo (ppm)	9,2	8,1	11,96

Figura 13. Rendimiento de un reactor biológico de membranas para aguas menos cargadas y calidad de agua constante. Obsérvense los similares rendimientos respecto a aguas más variables en calidad. Las membranas laminan con mucha eficacia las puntas de contaminación arrojando una calidad de efluente constante

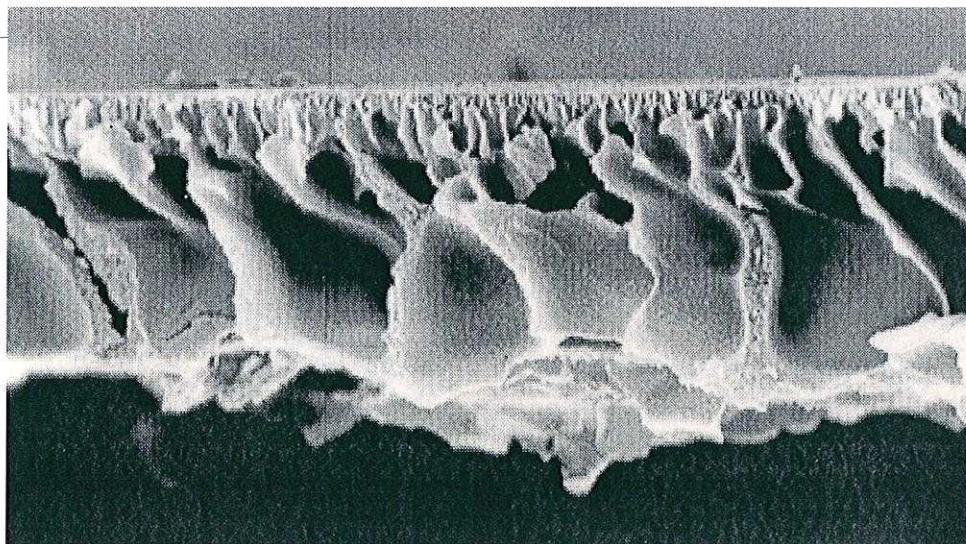


Figura 10.- Microfotografía de una membrana simple para ultrafiltración. Se aprecia la cara activa en la parte superior donde los poros decrecen constituyendo una membrana de ultrafiltración. Las presiones de trabajo de esta membrana serán medias-bajas, por lo que se busca un mínimo espesor en la superficie activa

Otros procesos

Son muchos otros los procesos de tratamiento aplicados a aguas industriales o municipales de los que se podría hablar, pero entendemos que se salen del ámbito que en este artículo se pretende. Podemos citar, sin embargo, como referencia del espectro de utilización la amplia aplicación de las membranas a procesos en los campos agroalimentario e industrial, tal y como procesado de linazas, tintes de fibras textiles, fabricación de catalizadores, concentraciones de zumos de frutas, recuperación y concentración de aromas, concentración de mostos diluidos, estabilización de vinos, fabricación de cervezas y de vino de bajo contenido en alcohol, preconcentración de suero lácteo, preconcentración de clara de huevo, jugos azucarados, jarabe de Arce, fermentación alcohólica o procesos industriales de tratamientos de superficie, pintados por electrodeposición, circuitos de refrigeración y un largo etc. de aplicaciones especiales.

Tipos de membranas según su estructura

Limitándonos a las de uso más frecuente y de mayor aplicación, citaremos solamente tres tipos:

- La membrana plana simple
- La membrana plana compuesta
- La membrana de fibra hueca
- La membrana plana simple, consiste en la deposición de un polímero adecuado sobre una tela soporte, labor que se realiza en una máqui-

20 mg/l de DBO₅ en el efluente y 30 mg/l de M.S. se considera correcto.

Como se puede ver por la calidad del efluente que puede obtenerse en un proceso biológico de membranas, ésta es perfectamente reutilizable en un elevado número de aplicaciones. El cuadro refleja valores alcanzables en cualquier instalación de esas características, no constituye en absoluto un resultado singular.

Reutilización de aguas

Cada vez es más patente la escasez de agua y en muchos casos es prácticamente una necesidad y una obligación social reutilizar las aguas usadas minimizando el recurso a las aguas naturales. En unos casos puede ser simplemente para evitar su despilfarro y en otros es por auténtica necesidad.

Las aplicaciones clásicas de las aguas residuales depuradas y reutilizadas son muy amplias. Van desde el reuso industrial de las propias aguas de proceso, hasta la utilización de aguas residuales urbanas tratadas para el riego de jardines, limpieza de calles, recarga de acuíferos, riego de productos agrícolas y un largo etcétera.

Frecuentemente a los procesos que conducen al agua desde la calidad típica de un agua depurada clásica hasta la calidad necesaria para las aplicaciones anteriores de reuso se le conoce con el nombre de "tratamientos terciarios".

La utilización de membranas en estos tratamientos terciarios ha dado un cambio radical a la calidad que puede obtenerse, al costo del agua procesada y, en consecuencia, a los ámbitos de aplicación de estas aguas.

En efecto, las aguas residuales urbanas y las aguas residuales industriales recuperadas a través de un tratamiento terciario basado en membranas, pueden llegar a tener una calidad que cumpla la totalidad de los parámetros exigidos para las aguas potables. No quiere esto decir que estas aguas, en la actualidad, se estén utilizando como agua potable ya que la legislación impide totalmente esta posibilidad. Podemos indicar, sin embargo, que frecuentemente las aguas obtenidas en este tipo de instalaciones que usan la "barrera" de las membranas tienen mejores características en todos sus parámetros que el agua que, como potable, se está suministrando a esa misma población.

Estos tratamientos terciarios, que varían en su concepción según la aplicación que se pretenda para el agua tratada, van desde la simple microfiltración o ultrafiltración del agua (efluente de un tratamiento biológico por ejemplo) hasta su procesado por membranas de ósmosis inversa cuando se desea un especial nivel de pureza o una baja sensible en su salinidad (caso de recarga de acuíferos, riegos de primores, etc.).

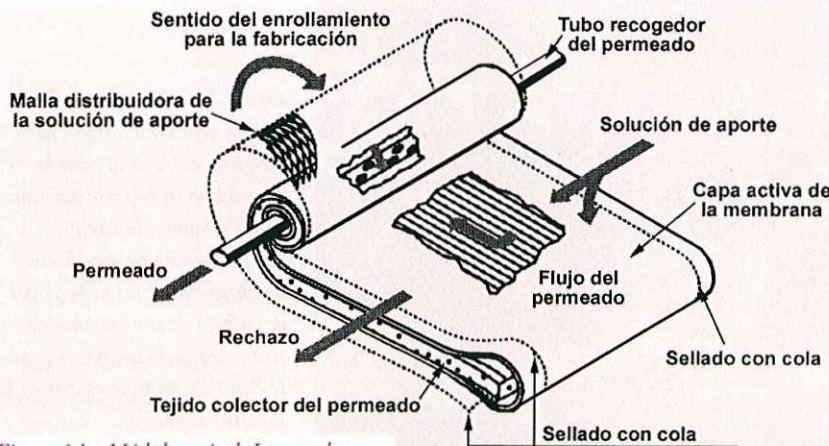


Figura 1A.- Módulo espiral. La membrana puede presentarse para su utilización industrial en forma de módulos espirales que permiten la optimización de su uso. Industrialmente estos módulos presentan entre 25 y 40 m² de membrana, dispuestos en un cilindro de 200 mm de diámetro y 1.000 mm de longitud. El dibujo representa la disposición transversal del mismo

lución se coagula en unas condiciones muy precisas en un segundo fluido (por ejemplo en agua) dando como resultado una fina capa del polímero coagulado que, una vez lavada y tratada adecuadamente constituye una superficie de micro-

los disolventes utilizados, y de las condiciones en que se efectúa la mencionada coagulación. Se conoce este proceso como "inversión de fase química", ya que se pasa de una situación de "solución" a segregar el polímero de su disolvente, invirtiendo el

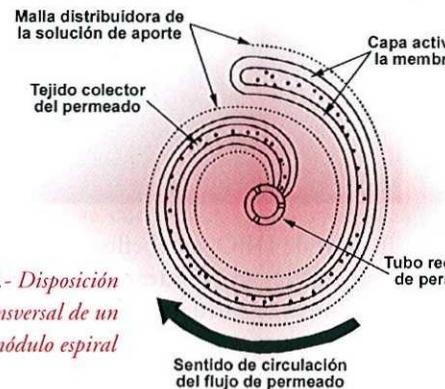


Figura 1B.- Disposición transversal de un módulo espiral

0,2 μm	Capa activa
40 μm	Soporte microporoso
120 μm	Tejido no tejido

Figura 4.- Esquema de la sección de una membrana compuesta, de capa delgada

na de proceso continuo. Esta máquina permite, pues, la aplicación continua y perfectamente homogénea de una solución de un polímero determinado sobre la tela soporte. Esta so-

filtración, de ultrafiltración e incluso ósmosis inversa (Fig. 10). Esta diferencia en el resultado de la "coagulación", es función del polímero utilizado, de su concentración, del o de

proceso de disolución de forma muy rápida, lo que genera una precipitación "porosa" del polímero.

La "tela" así fabricada se dispone posteriormente en forma de módulos planos, módulos arrollados (Figs. 1^a y 1B) o de cualquier otro modo en función de la aplicación que se pretenda.

La membrana plana compuesta parte de una membrana plana en la cual se provoca mediante reacción *in situ* la formación de una capa adicional sumamente delgada de un segundo polímero. Esto se realiza forzando la reacción de los monómeros que

Tipo de membrana	Caudal (1 m ² d ⁻¹)	Rechazo de sales (%)	Presión de prueba (bar)	Condiciones de ensayo
TFC 8822HR	1052	99,5	16	200 mg/l NaCl
TFC 8821 ULP	1363	99,0	10	500 mg/l NaCl
8040-LSY-CAP2	1118	99,5	16	1500 mg/l NaCl
8040-UHY-ESPA	1224	99,0	10	1500 mg/l NaCl

Figura 5.- Tabla de características de caudal y rechazo de algunas membranas comerciales para baja presión

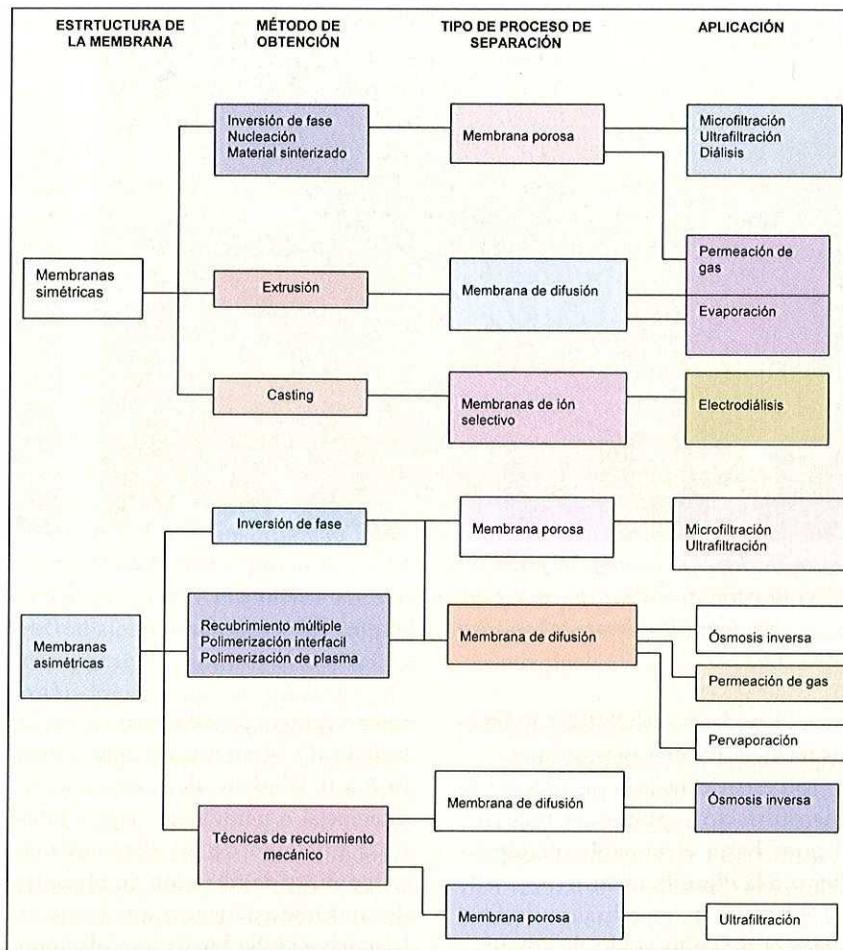
Figura 6.- Principales procedimientos de fabricación de membrana y el tipo de productos que puede obtenerse. Todos los procedimientos pueden generar membranas de tipo plano o de fibra hueca, sin embargo, económicamente existen fuertes limitaciones

van a componer esta capa delgada, directamente sobre la superficie de la membrana de ultrafiltración, previamente fabricada.

A este proceso se le conoce con el nombre de "policondensación interfacial" y es relativamente complejo. Existen otros procesos posibles, pero, por su menor aplicación, no los comentaremos en aras de no complicar en exceso esta explicación (Ver fig. 6).

La membrana así fabricada tiene normalmente características de membrana de ósmosis inversa. Las características del producto obtenido pueden modularse, obteniéndose diferentes tipos tal y como se recoge en el apartado primero de esta exposición.

- Las membranas de fibra hueca, de tamaño normalmente capilar, se pueden obtener por un procedimiento que puede ser similar al explicado para las membranas planas simples,



pero, en este caso, extruyendo la solución de polímero en forma de "tubo" hueco directamente sobre el líquido coagulante. Esto permite

obtener membranas asimétricas, es decir, en las cuales el tamaño del poro en superficie no es el mismo que el tamaño de poro en el interior.

Mayor aplicación tienen una nueva generación de membranas, de fibra hueca, denominadas *membranas simétricas*, en las cuales el proceso de extrusión se realiza a elevadas temperaturas produciéndose la coagulación del polímero al disminuir la temperatura de éste, una vez formada la fibra hueca.

Un agente plastificante que acompaña al polímero fundido ocupa el lugar de los poros, los cuales se generan al efectuar la extracción del plastificante mediante un disolvente de éste. A este tipo de membranas se les denomina "simétricas, homogéneas o isotropas" porque los poros generados tienen el mismo tamaño en toda la sección recta de la membrana. Presentan extraordinarias características de resistencias mecánica y quí-

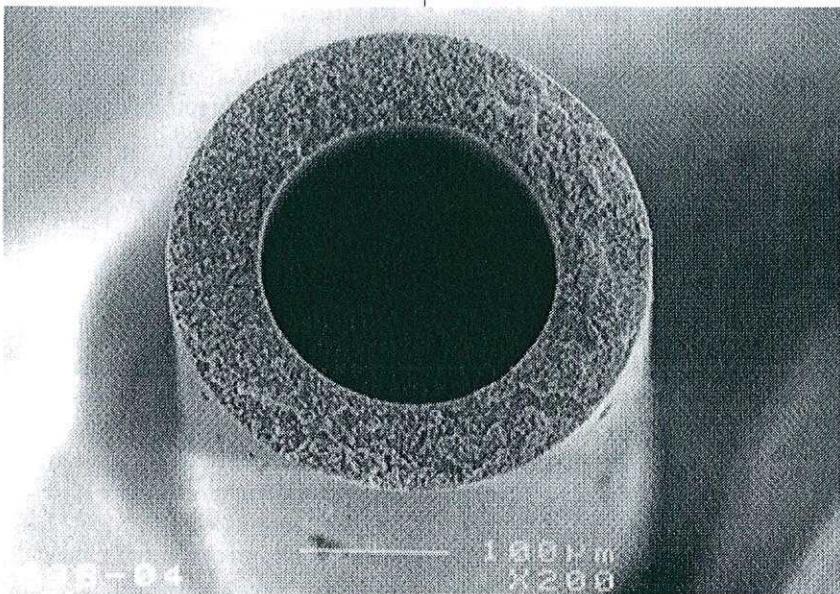


Figura 7.- Sección de una fibra de microfiltración correspondiente a una poliolefina fluorada (producto de Porous Fibers, S.L.). Microfotografía

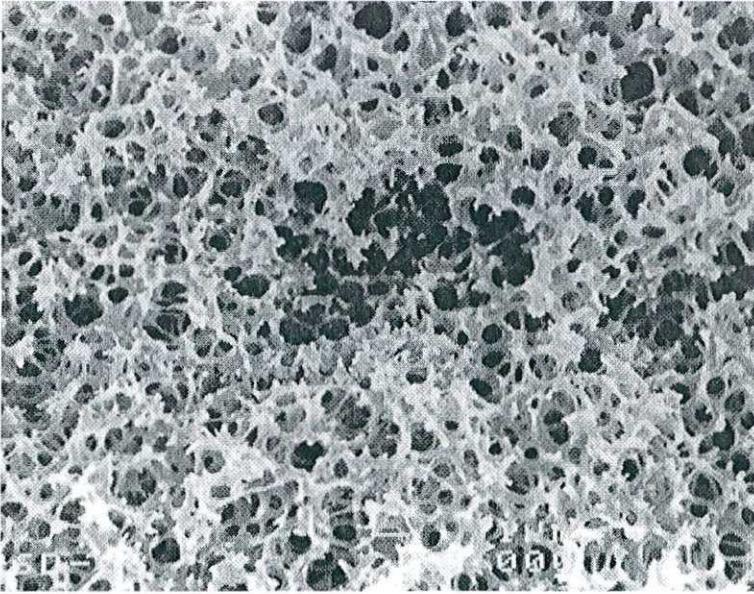


Figura 8.- Detalle de la estructura porosa de la microfibras de la imagen anterior. La técnica de extrusión a alta temperatura genera una estructura idéntica en toda la sección de la fibra (fibra isotropa con una ligera anisotropía). Producto de Porous Fibers, S.L..

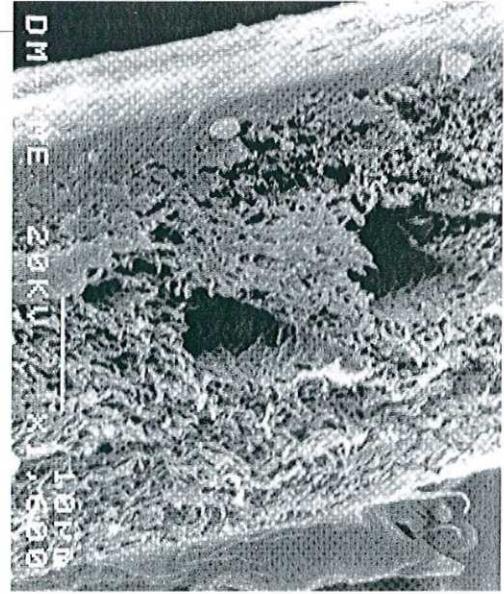


Figura 9.- Microfotografía (x1.600) de una membrana compuesta de capa delgada Permetec. Puede verse la estructura "tipo esponja" correspondiente a una membrana que debe soportar elevadas presiones. La capa activa se halla en la parte superior, donde los poros de la "esponja" disminuyen hasta unos 500 Å de diámetro

mica al poderse realizar con polímeros técnicos de altas prestaciones.

Su estructura es normalmente de microfiltración, pudiendo reducirse el poro hasta el tamaño correspondiente a la ultrafiltración.

Ofrecen las membranas de fibra hueca el más alto grado de compacidad de todas las posibles disposiciones realizadas con membranas, es decir, son las que ofrecen mayor superficie filtrante disponible por unidad de volumen de instalación.

Su aplicación está especialmente adaptada (en el campo del agua) a los siguientes casos:

- Desinfección de aguas potables por microfiltración de ésta.
- Pretratamiento de agua para su posterior procesado por ósmosis inversa.
- En reactores biológicos de membrana para la extracción del agua depurada.
- Para tratamientos terciarios en instalaciones clásicas de depuración de aguas residuales de todo tipo.

Posiblemente en este tipo de membranas se halla la base de la optimización de gran parte de los procesos citados.

Es de destacar que este tipo de membranas homogéneas apenas con-

sumen energía para efectuar su trabajo de filtración de agua (0,1 a 0,3 kg/cm² de presión diferencial o pérdida de carga), constituyendo uno de los sistemas más económicos de filtración en términos de consumo energético que existe en la actualidad. Su buena modulación y la facilidad de lavado constituyen otra característica que en la práctica es altamente interesante.

Algunos parámetros económicos

Para dar más sentido a lo expuesto y aunque resulta muy difícil indicar cuáles pueden ser los costos de los procesos que utilizan membranas debido a que éstos pueden variar sensiblemente en función de las condiciones particulares de cada instalación y únicamente con la pretensión de situar al lector en los órdenes de magnitud económicos en los que se mueven estos procesos, indicaremos algunos precios para procesar cada m³ de agua, que incluirían la amortización de inversión inicial, la mano de obra de explotación, los posibles reactivos y los recambios de membranas necesarios:

- Desalación de agua de mar: Entre 90 y 120 pta/m³

- Desalación de agua salobre: Entre 30 y 50 pta/m³
- Desalación de aguas de baja salinidad: ≈ 20 pta/m³
- Microfiltración y ultrafiltración de aguas potables: ≈ 15 pta/m³
- Tratamientos terciarios (incluso su desalación) de aguas residuales urbanas: ≈ 40 pta/m³
- Reactores biológicos de membrana: ≈ 25 pta/m³

Traspaso de la Ingeniería Civil a la Ingeniería Industrial

Puede resultar de interés, en el ámbito de publicación de esta exposición, resaltar otra tendencia interesante que la utilización de membranas implica. Nos referimos al cambio de especialidad profesional que conlleva la utilización de membranas. Efectivamente, las instalaciones clásicas de aguas potables o residuales, son esencialmente obras "de hormigón" acompañadas de una serie de equipos mecánicos y eléctricos. Son, pues, esencialmente, instalaciones de obra civil, algo especiales, donde convive la Ingeniería Civil con la Ingeniería Industrial.

Las tecnologías de tratamiento de agua que aplican membranas transforman estas instalaciones en "fábricas" donde predominan los sistemas industriales clásicos. Hay un desplazamiento pues de la inversión que pasa de ser mayoritariamente en obras civiles (p.e. 60%, en la actualidad en una instalación clásica) hacia los equipamientos. Son concretamente los equipos mecánicos (bombas, turbinas, válvulas) los eléctricos y los automatismos los que incrementan su presencia que asciende desde el 40% del total de la inversión en las instalaciones clásicas hasta más de un 80% en las modernas que utilizan membranas como elemento base de su proceso.

Estos procesos son técnicamente más complicados y se precisa trabajar con los procedimientos de control de calidad, control de documentación y sistemas de Ingeniería que aplican normalmente a la ejecución de instalaciones industriales.

Situación de la investigación sobre membranas

Los orígenes de esta tecnología en su versión actual se ubican, como tantos otros en EE.UU. Países como la antigua URSS alcanzaron también buenos niveles. Concretamente, las membranas compuestas planas de ósmosis se basan en su casi totalidad en los trabajos realizados por John Ca-

dotte en los años 70 en el North Star Laboratory en EE.UU. De aquí derivan, mejorados y corregidos, la mayor parte de los actuales productos comerciales.

Europa, probablemente menos acuciada (en el Norte, claro) por la escasez de agua ha gastado menos energía y recursos en este desarrollo. Han habido y hay Centros importantes de Investigación, más importantes, no obstante, en la tecnología de membranas para procesar gases (separación de gases, deshumectación, creación de atmósferas inertes, etc.) que en aguas.

España se ha incorporado en estos últimos 15 años a la investigación en membranas en varios frentes de trabajo, que van desde los ámbitos de aplicación, industrial o para los municipios, (empresas públicas como Gaiker, Labein, Universidades como Valladolid, Valencia han desarrollado algunos programas) o a los ámbitos de análisis y estudio de estructuras (CSIC, Universidad de Valladolid, Almería, Universidad del País Vasco) hasta la fabricación industrial de membrana plana (PRIDESA tiene en Barcelona una instalación de más de 3.000 m² dedicada exclusivamente a producción e investigación con un presupuesto anual de más de 200 millones de pesetas) o finalmente fabricación industrial de fibra hueca de estructura homogénea o

isótropa (Porous Fibers, S.L., Bilbao).

Dado el enorme ámbito de aplicación, tanto de las membranas planas como de las de fibra hueca, y, en especial el bajo coste de explotación (energía, etc.) de éstos últimos, es muy deseable y previsible que se registre un aumento de los programas de I + D, en especial de "aplicación" por usuarios finales y empresas especializadas. Esto no sólo se aplica a las Obras Públicas (potables y residuales) sino, y especialmente, a los usuarios industriales, donde el coste del "producto" que se va a procesar es en ocasiones varios órdenes de magnitud superior al del agua y, en consecuencia, tanto el precio de la instalación como el de explotación pueden resultar marginales.

CONCLUSIÓN

Nos encontramos ante un producto, la membrana, que engloba una muy amplia gama de calidades y configuraciones. Éstas y aquéllas pueden realizarse "a medida" del problema que pretendemos resolver. Las aplicaciones, originalmente limitadas a desalación de aguas salobres o marinas, se multiplican y son otros los campos en los que su uso permite realizar instalaciones más ecológicas, menos costosas y más industriales. Adicionalmente la calidad de "agua tratada" es sensiblemente mejor en

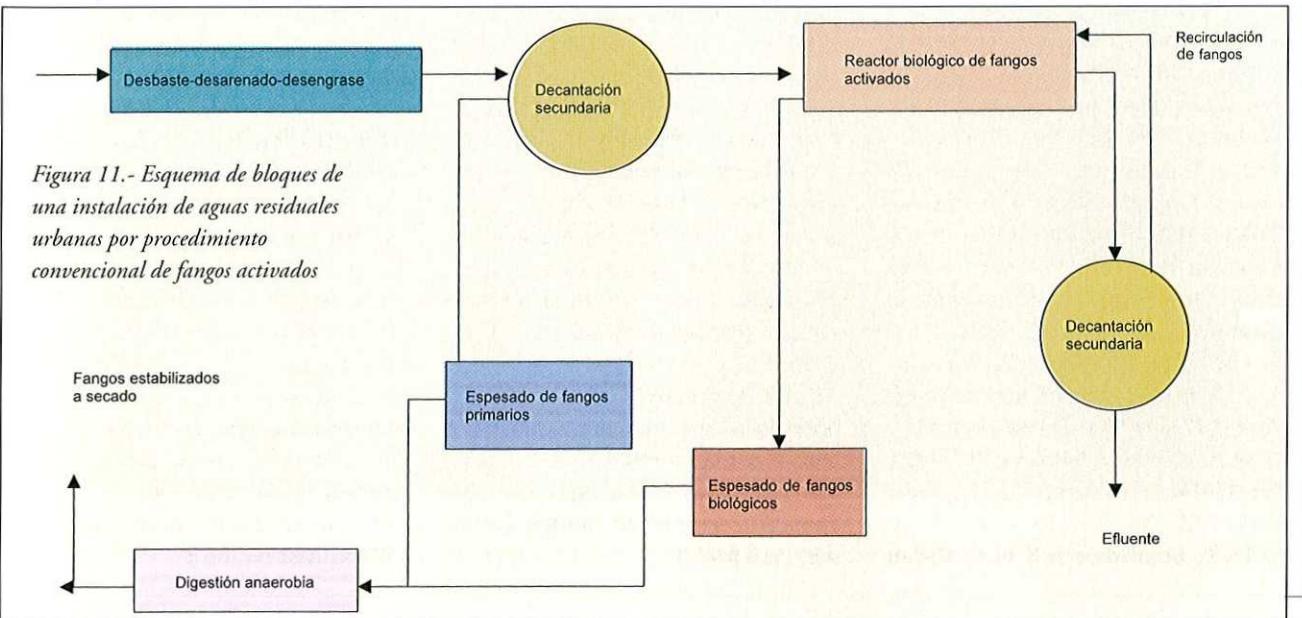


Figura 11.- Esquema de bloques de una instalación de aguas residuales urbanas por procedimiento convencional de fangos activados

casi todos los parámetros, a la obtenible por procedimientos clásicos. Esto último introduce un cambio cualitativo (en especial) a los procesos de reutilización de aguas usadas, dando entrada a nuevas aplicaciones del agua usada no alcanzables hasta ahora.

Si consideramos que lo anterior se consigue con instalaciones mínimamente agresivas con el medio ambiente, debemos valorar los sistemas de tratamiento de agua que usan membranas como una opción del mayor interés al proyectar las nuevas instalaciones de tratamiento.

BIBLIOGRAFÍA

Citamos una breve lista de referencias que pueden resultar útiles al lector que desee introducirse en el conocimiento de esta tecnología. Proceden del libro "Ósmosis Inversa : fundamentos, tecnología y aplicaciones" de Manuel Fariñas, socio fundador de PRIDESA, publicado por Mc Graw Hill (Electrotecnologías, nº 18). Pueden obtenerse ejemplares en PRIDESA, EVE, Iberdrola o librerías especializadas.

Libros

- 1- Ulrich Merten (Ed.), *Desalination by Reverse Osmosis*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1966.
- 2- Turbak, A.F., *Membranes from Cellulose and Cellulose derivatives*, Wiley-Interscience, New York, 1970.
- 3- Flinn, J.E., *Membrane Science and Technology*, Plenum Press, New York, 1970.
- 4- Mc Dermott, J., *Desalination by Reverse Osmosis*, Noyes Data Corp., Park Ridge, New Jersey, 1970.
- 5- Milau Bier (Ed.), *Membrane Processes in Industry and Biomedicine*, Plenum Press, New York, 1971.
- 6- C.E. Rogers (Ed.), *Permselective Membranes*, Marcel Dekker, New York, 1971.
- 7- R.E. Kesting, *Synthetic Polymeric Membranes*, McGraw Hill, New York, 1971.
- 8- H.K. Lonsdale and H.E. Podall

(Eds.), *Reverse Osmosis Membrane Research*, Plenum Press, New York, 1972.

9- R.E. Lacey and S. Loeb (Eds.), *Industrial Processing with Membranes*, Wiley - Interscience, New York, 1972.

10- McDermott, J., *Industrial Membranes - Design and Applications*, Noyes Data Corp., Park Ridge, New Jersey, 1972.

11- Sun - Tak Hwang and Karl Kammermeyer, *Membranes in Separation*, John Wiley & Sons, New York, 1975

12- P.R. Keller, *Membrane Technology and Industrial Separation Techniques*, Noyes Data Corp., Park Ridge, New Jersey, 1976.

13- P. Meares (Ed.), *Membrane Separation Processes*, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 1976.

14- R. Passino (Ed.) *Biological and Artificial Membranes and Desalination of Water*, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 1976.

15- S. Sourirajan (Ed.), *Reverse Osmosis and Synthetic Membranes*, National Research Council, Ottawa, Canadá, 1977.

16- R.F. Madsen, *Hyperfiltration and Ultrafiltration in Plate-and-Frame Systems*, Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam, 1977.

17- K.S. Spiegler and A.D.K. Laird (Eds.), *Principes of Desalination*, 2nd edition, Academic Press, New York, 1980.

18- Anthony R. Cooper (Ed.), *Ultrafiltration Membranes and Applications*, Plenum Press, New York, 1980.

19- Albin F. Turbak (Ed.), *Synthetic Membranes: Volume I & II*, ACS Symp. Ser 153, American Chemical Society, Washington, D.C., 1981.

20- Belfort, G., *Synthetic Membrane Processes*, Academic Press, New York, 1893.

21- Rantenbach, R., Albrecht, R., *Membrane Processes*, John Wiley & Sons, New York, 1989.

22- Y. Osada, T. Nakagawa, *Membrane Science and Technology*, Lavoisier, París 1992.

23- W. Byrne, *Reverse Osmosis. A practical guide for industrial users*, Tall Oaks Publishing, Inc. Littleton (Colorado), 1995.

24- K. Scott, *Handbook of Industrial Membranes*, Elsevier Advanced Technology, Oxford, 1995.

25- Y. Osada y T. Nakagawa, *Membrane Science and Technology*, Lavoisier, París, 1992.

26- Belfort, G., *Synthetic Membrane Processes*, Academic Press, New York, 1993.

27- W. Bryne, *Reverse Osmosis. A practical guide for industrial users*, Tall Oaks Publishing, Inc. Littleton (Colorado), 1995.

28- K. Scott, *Handbook of Industrial Membranes*, Elsevier Advanced Technology, Oxford, 1995.

29- AWWA, Lyonnais des Eaux, WRCSA, *Tratamiento del agua por procesos de membrana*, McGraw-Hill, Madrid, 1998.

Revistas

- 1- *Desalination*, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- 2- *Journal of Membrane Science*, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- 3- *Separation Science and Technology*, Marcel Dekker, New York.
- 4- *Desalination & Water Reuse*, Lineal Publishing Co., Boca Ratón, Florida.
- 5- *Filtration & Separation Magazine*, Elsevier Advanced Technology, England.
- 6- *Membrane Technology*, Elsevier Advanced Technology, England.
- 7- *Ultrapure Water*, Tall Oaks Publishing, Inc. Littleton, Colorado.
- 8- *Journal Of Applied Polymer Science*.
- 9- *Journal of Colloid Science*.
- 10- *Environmental Science and Technology*.
- 11- *Industrial Engineering Chemical Processes Design Development*.
- 12- *Journal of the American Chemical Society*.
- 13- *Journal of American Water Works Association* ■