

**Técnicas aplicables a la eliminación de la salinidad.**  
Por. Santi Taló – Director de ventas Hydranautics España

**Membranas, R&D, Claves de la evolución & Uso de las membranas.**

“La Tecnología hace que el mundo siga girando”. Esta frase no es solo válida en general, además es una verdadera representación del futuro de la tecnología de membranas en el campo del tratamiento del agua. Desde su introducción a finales de los años 50, la Osmosis Inversa (OI), Nanofiltración (NF), Ultrafiltración (UF) y Microfiltración (MF), las membranas han ido aumentando su campo de aplicación dentro del tratamiento de aguas. Desde el desarrollo de membranas de acetato de celulosa por parte de Sourirajan y Loeb y la invención de la tecnología capilar, hasta la introducción de las membranas de bajo ensuciamiento (LFC) – membranas espirales para OI, y la introducción de las membranas capilares de UF contralavables a finales de los 90, el R&D de la tecnología de las membranas ha demostrado que es una clave en la evolución y en la continuación del uso de las membranas en todos los aspectos de la vida. Desde hace 40 años, la evolución del desarrollo de las membranas ha mejorado su rendimiento y confianza en el producto además ha contribuido en la reducción de los costes operacionales, haciendo de la membrana una tecnología preferida en la industria del tratamiento del agua. La evolución de las membranas, puede ser caracterizada mediante dos categorías; la primera comprende las membranas de configuración en espiral de OI y NF mientras que la segunda comprende la tecnología capilar de UF y MF. Ambas categorías tecnológicas han evolucionado a través de los años y son de igual importancia a la hora de realizar una valoración de lo conseguido hasta el presente y lo que el futuro nos puede deparar. El tratamiento de cualquier fluido mediante la tecnología de membrana está a un paso de tomar una nueva dimensión, ya que la tecnología en el desarrollo de membranas avanza a pasos agigantados, así los campos de aplicación, de los que es conocido y aplicado en la actualidad.

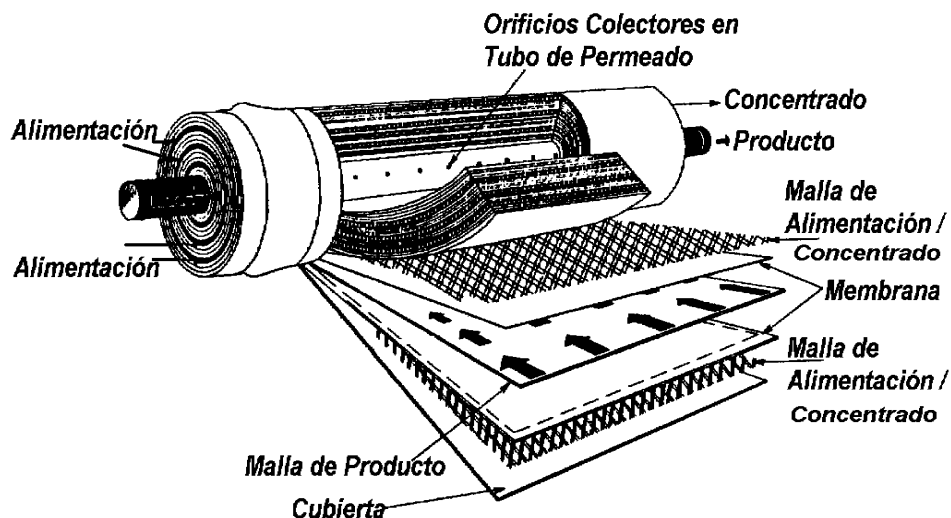
Resumiendo, los avances tecnológicos del siglo 20, en referencia al tratamiento de cualquier fluido con membranas, podemos ver un significativo cambio respecto a los aspectos tradicionales de aplicación, a una tecnología mucho más sofisticada, donde podemos sacar el mayor rendimiento de los recursos obteniendo al mismo tiempo una mejor calidad y rendimiento, todo con un costo mucho más reducido que el que tuvimos con anterioridad. Los esfuerzos de R&D durante el siglo 20, han marcado una nueva familia de productos y aplicaciones. Este artículo va a centrarse en tres desarrollos distintos en el campo de la tecnología de membranas y como su evolución ha contribuido a diversificar sus campos de aplicación, tomando las diferentes membranas en los campos del tratamiento de agua.

# Espectro de filtración



um	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100	1000
A	10	100	1000	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>
Peso molecular	100	200	5,000	20,000	100,000	500,000	
Tamaños relativos De diferentes partículas	Sales acuosas Iones metálicos azúcares	Pirógenos	Carbon negro Virus Silice coloidal Proteínas	Pigmentos de pintura	Bacteria	Celulas de lev. Pólen Arina molida	Arena de playa
Tecnología de Filtración	Osmosis Inversa		Ultrafiltración		Microfiltración		Filtración de partículas

## Membrana en espiral

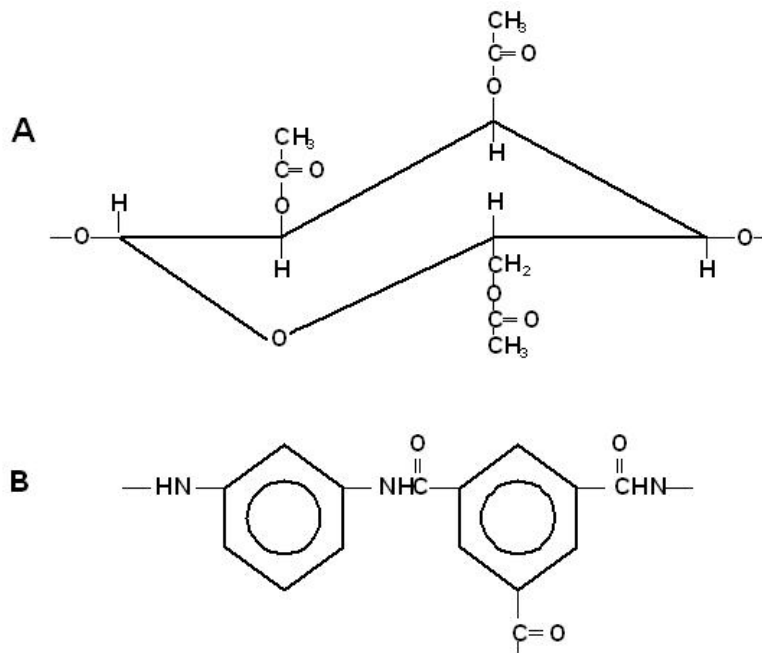


## Gama de membranas de agua salobre.

La gama de membranas de agua salobre se compone de las antiguas membranas de acetato de celulosa (CAB) y las membranas de Poliamida Aromática

•**Acetato de Celulosa:** Biodegradables. Moderada tolerancia a oxidantes, incluyendo cloro libre. Superficie lisa, menos propensa a ensuciamiento. Carga superficial neutra. Mediana presión, rechazo de sales máximo de 99.0%, Rápido incremento del paso de sales. Tendencia a compactación y pérdida de flujo de permeado. Sensibles a hidrólisis por pH. Límite de temperatura 35 °C.

•**Poliamida Aromática Compuesta (TFC):** Material plástico, no biodegradable. Muy sensibles a oxidantes. Superficie relativamente áspera, más propensa al ensuciamiento. Carga superficial negativa (menos la nueva tecnología de membranas de bajo ensuciamiento LFC). Baja a muy baja presión. Incremento del paso de sales progresivo y limitado con el tiempo. Muy baja o ausente compactación. Amplio espectro de pH. Límite de temperatura hasta 45 °C (40 °C en continuo).



### Estructura química del triacetato de celulosa (A) y de la poliamida aromática compuesta (B).

Gráfico 1 – Evolución de las membranas de O.I. para producir un flujo de permeado de 25 l/m<sup>2</sup>h, según las mismas condiciones operativas.

Evolución de las membranas de O.I.

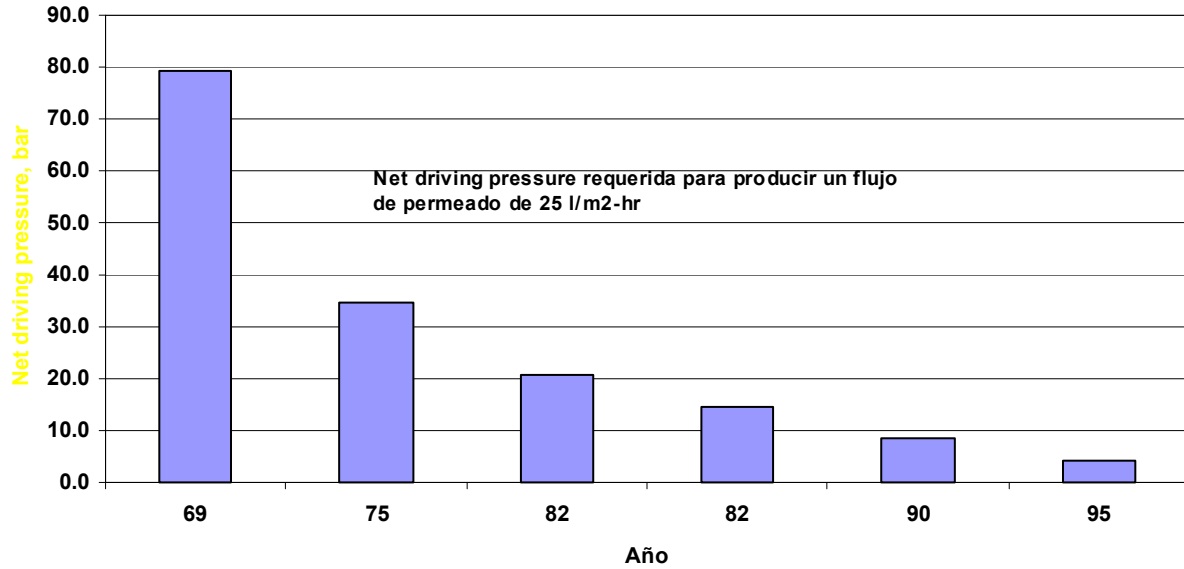


Gráfico 2– Energía requerida para operar una misma planta a una conversión del 80%

Evolución de las membranas de O.I.

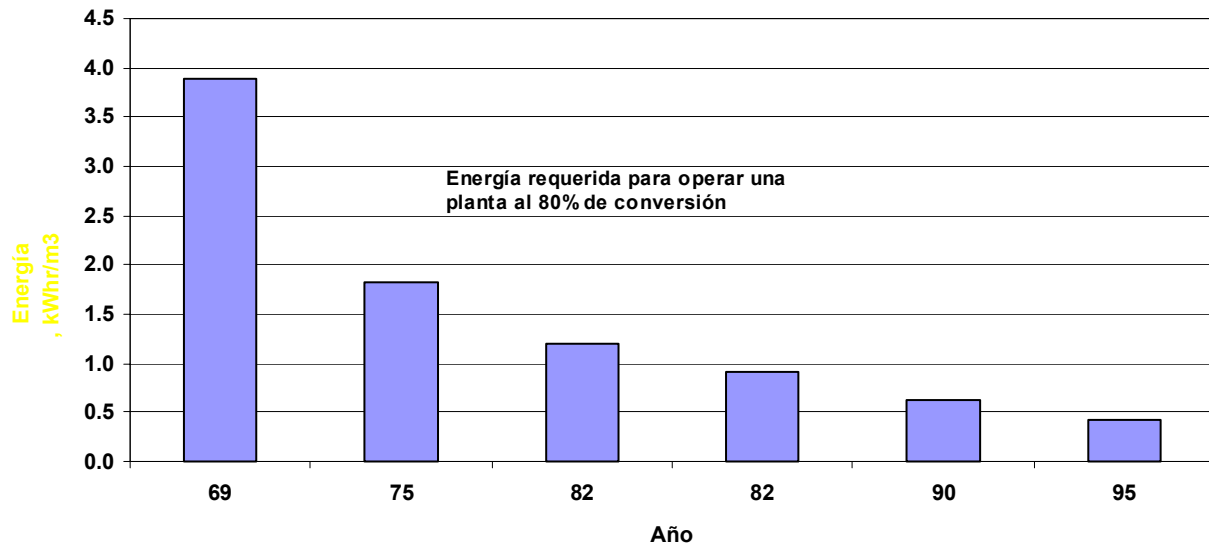
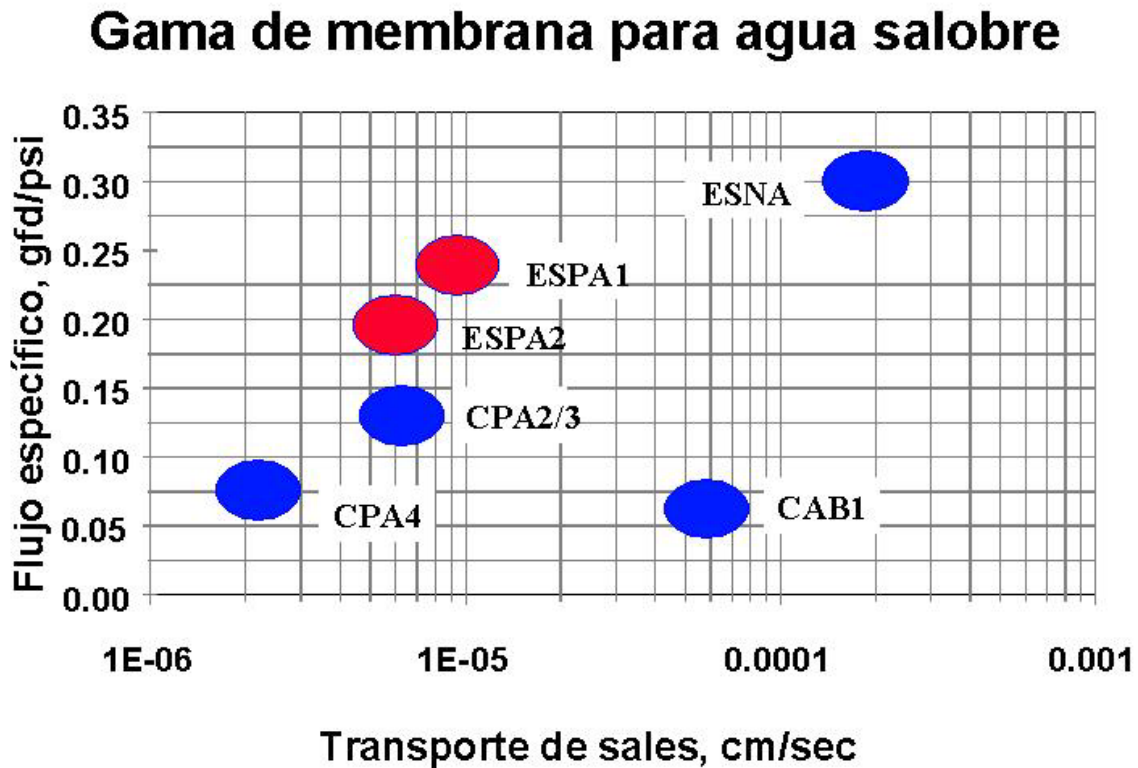


Gráfico 3 – Gama de membranas para agua salobre, relación flujo específico medido como g.f.d / psi y el transporte de sales.



En referencia a las membranas de agua salobre, además de las membranas de poliamida convencional (CPA) antiguamente denominadas de baja presión al ser comparadas con las membranas de acetato (CAB), más adelante la tecnología de membrana evolucionó a las verdaderas membranas de baja presión (ESPA), denominadas inicialmente membranas de ultra-baja presión. La nueva tecnología de membranas (LFC) que está disponible para la eliminación de salinidad con aguas superficiales, residuales, en definitiva con contenido de materia orgánica es el tema que vamos a desarrollar en este papel juntamente con algunos avances en tecnología de membrana que serán ampliados durante la presentación.

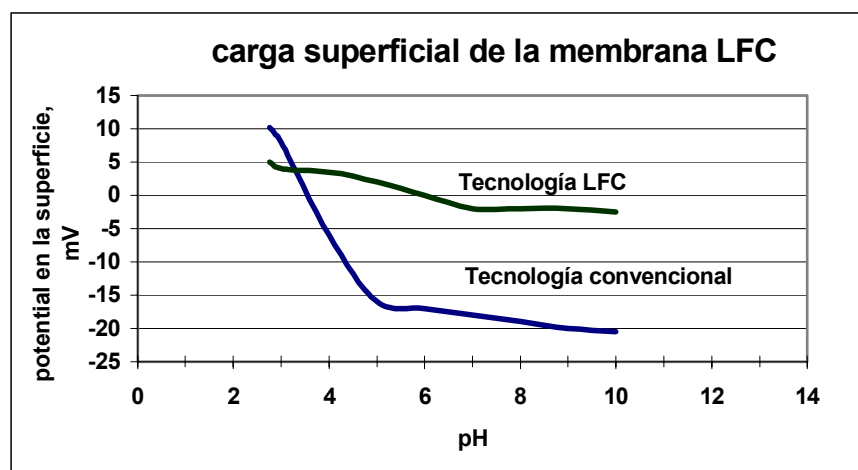
## Tecnología de bajo ensuciamiento (LFC) en membranas de OI

Este primer avance tecnológico, apareció a finales de 1998, con la introducción de las membranas de bajo ensuciamiento (LFC). Esta membrana no sólo posee las mismas características, el mismo o mejor flujo de muchas de las membranas de poliamida compuesta, también un rechazo de sales mayor o igual a las existentes. Esta membrana ha sido desarrollada para el tratamiento de aguas de aporte problemáticas, aguas residuales municipales y otros aportes, los cuales hasta la aparición de estas membranas, requerían un pretratamiento muy significativo antes de llegar a cualquier membrana de OI. Cuando tratamos aguas residuales municipales o aguas superficiales a través de membranas de OI, aunque utilizemos pretratamientos convencionales, las membranas se ensucian rápidamente. Este fenómeno está caracterizado por la formación de una capa muy densa en la superficie de la membrana, compuesta por sustancias orgánicas disueltas y materia orgánica en suspensión cerca de la superficie de la membrana. El ratio en el que el ensuciamiento converge en la superficie de la membrana es directamente proporcional al flujo de permeado. Este ratio de formación de la capa de ensuciamiento y su adhesión a la superficie de la membrana depende, además del flujo de permeado, de la afinidad de la superficie de la membrana a los compuestos orgánicos disueltos. Las membranas de OI utilizando polímero aromático de poliamida convencional, son muy hidrofóbicas. Estas membranas son propensas a un alto índice de ensuciamiento y una significativa reducción del flujo de permeado, durante la aplicación de las mismas con agua con alto contenido orgánico.

Para reducir de manera significativa esta tendencia a ensuciarse, las membranas de bajo ensuciamiento (LFC) fueron desarrolladas. Las membranas LFC están caracterizadas por tener una carga muy baja en la superficie de la membrana y por tener su superficie, características hidrofílicas.

*Figura 1* presentamos la diferencia entre el potencial de una membrana de poliamida convencional para OI y la nueva membrana LFC, ambas en función de pH.

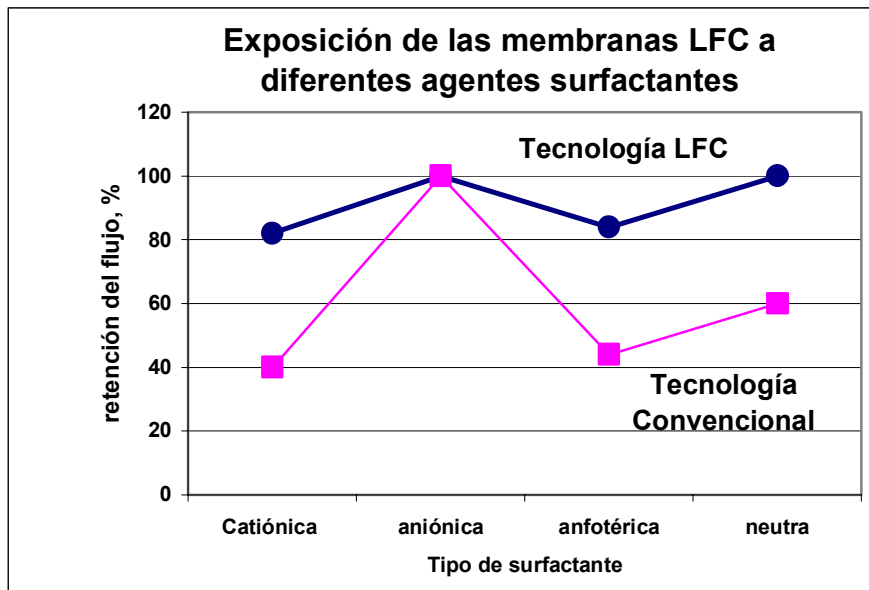
Figura 1



La carga superficial de la membrana LFC es más neutra si la comparamos con la carga superficial de la poliamida convencional. Esta característica puede ser trasladada a la afinidad de la membrana sobre los compuestos orgánicos disueltos. La *Figura 2* va a

demostrar esta premisa. Cuando sometemos a diferentes agentes surfactantes, la membrana LFC mantiene su flujo mucho mejor que las membranas de poliamida convencional.

Figura 2



Para confirmar esta observación, las membranas LFC fueron operadas en paralelo con membranas de poliamida convencional de baja presión. Ambas membranas operaron con efluentes municipales, utilizando como pretratamiento membranas de UF de tecnología capilar. El ensayo tuvo lugar en Water Factory 21, CA, Estados Unidos.

Figura 3 representa la operación de las dos membranas respecto a la presión de entrada (presión aplicada) y el tiempo. El flujo específico de las membranas LFC es más bajo que el de las membranas de OI de baja presión, además la presión de entrada es de 90 psi (6.2 bar), la cual es un poco más elevada que la presión inicial de las membranas de OI de baja presión en las mismas condiciones operacionales. Sin embargo, casi inmediatamente, el flujo de las membranas de baja presión decrece rápidamente, casi el doble, durante las primeras 2,000 horas de trabajo. La presión de trabajo debe ser aumentada desde los 70 psi (5 bar) a más de 160 psi (11 bar), para poder mantener los flujos constantes en 10 gfd (17 l/m<sup>2</sup>-hr). Por otro lado, las membranas LFC, operan incluso con unos flujos más elevados 12 gfd (21 l/m<sup>2</sup>-hr) y se mantienen muy estables a un nivel de 90-100 psi (6-7 bar) durante el periodo de prueba.

Los resultados nos muestran que las membranas LFC casi no sufren ensuciamiento cuando las tratamos con agua procedentes de efluentes municipales, que hasta la fecha se han considerado problemáticas para cualquier membrana convencional de OI. La membrana LFC no fue lavada durante los 8 meses que duró la prueba, debido a su estabilidad y comportamiento excepcional. Después de completar todos los testeos de campo, la resistencia al ensuciamiento de las membranas LFC ha sido confirmada por sus resultados en las condiciones estándar de testeo en la propia fábrica. Los resultados,

mostrados en la *Tabla 1*, indican que después de los 8 meses de operación de la membrana LFC sin ninguna limpieza efectuada, el flujo sólo había decrecido entre un 10% al 20% comparado con los datos de testeo y verificación de las membranas antes de salir de fábrica para su prueba en Water Factory 21. Después de realizar un enjuague de la membrana LFC con una solución a pH básico, el flujo de permeado fue restaurado completamente, obteniendo datos de testeo iguales a los obtenidos antes de salir de fábrica para su prueba en Water Factory 21. La efectividad en la recuperación de las membranas LFC indica una relación entre los compuestos orgánicos disueltos y la superficie de las membranas, una característica de las superficies hidrofílicas.

**Tabla 1: Resultados de operación de una membrana LFC de 4" (4 pulgadas) con un efluente municipal utilizando UF como pretratamiento.**

	<b>Flujos , gfd</b>	<b>Flujo, m<sup>3</sup>/d</b>	<b>Rechazo,%</b>
En factoría	2082	7.88	99.6
Antes enjuague	1578	5.97	99.6
Después de enjuague	1708	6.46	99.2

Combinando los atributos, carga superficial neutra y características hidrofílicas, la membrana LFC es muy superior a las demás membranas de poliamida convencional cuando tratamos aguas denominadas en la actualidad dificultosas. La mejora más significativa, es la reducción de los costes de lavado, incrementando la estabilidad del sistema y de la membrana. Lo que puede conllevar a un incremento en la longevidad de la membrana, mejorando la eficiencia y reduciendo los tiempos de paro, lo que se traduce en ahorro de dinero. Esta tecnología acaba de empezar a aplicarse, en el futuro será aplicada a otras superficies de membrana, cambiando completamente los diseños y la operación de las plantas.

### **Otros avances tecnológicos en membranas de OI**

Además del primer avance tecnológico, el grupo Nitto Denko / Hydranautics, ha realizado una enorme inversión en tecnología en los últimos años, de los cuales aparecieron los siguientes avances:

- Membranas ESPA2 – membranas inicialmente desarrolladas para obtener una reducción de Nitratos del agua de aporte.
- Membranas ESNA – membranas de Nanofiltración.
- Membranas SWC3B – membranas para agua de mar con un alto rechazo del Boro.
- Membranas ESPAB – membranas de baja presión con un alto rechazo del Boro;

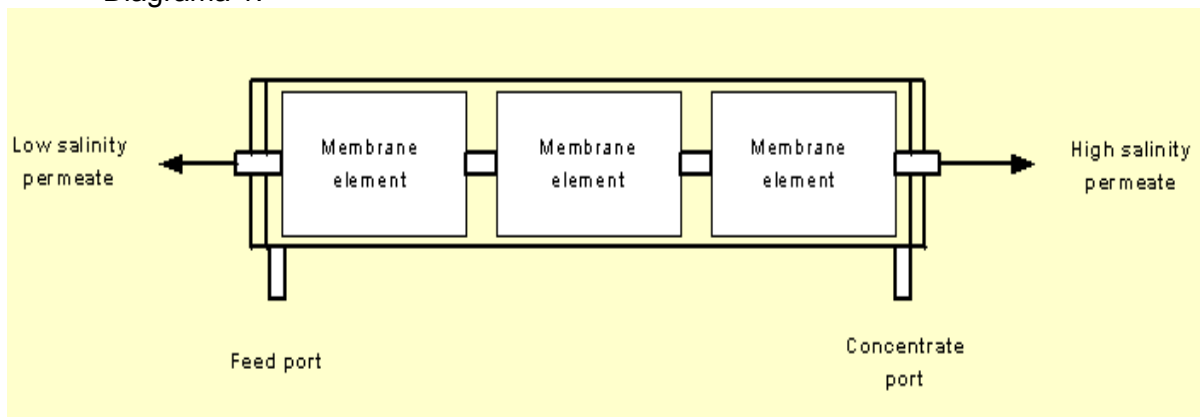
- Membranas de Ultrafiltración capilares Hydracap<sup>tm</sup>. Membranas de Ultrafiltración de nueva generación para ser utilizadas como pretratamiento en agua de mar o tomas superficiales o pozo.
- Membranas espirales reversibles (RS) como pretratamiento a O.I.
- Sistema integrado de membranas;

*De los nuevos avances tecnológicos comentamos brevemente los siguientes:*

### **Agua de mar, problemática del Boro**

Uno de los puntos que ahora está en boca del mercado de O.I. es la eliminación del Boro de las plantas de agua de mar, Nitto Denko / Hydranautics desarrollaron la nueva tecnología de membranas, SWC3B que está en funcionamiento en la planta de Larnaca 2,460 m<sup>3</sup>/h. El sistema aplicado en las mismas se expresa en el diagrama 1, se obtiene permeado por los lados, controlando la calidad que se desea obtener.

Diagrama 1.



### **Sistema Integrado de membranas (IMS)**

Ha llegado el momento de que los usuarios de sistemas de Osmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) re-evalúen los costes y beneficios operacionales de la Microfiltración (MF) o la Ultrafiltración como pretratamiento de la OI. Esto es particularmente cierto cuando se trata de procesos de alto ensuciamiento (aguas superficiales, aguas residuales o tomas abiertas de agua de mar). Un sistema diseñado con MF/UF como pretratamiento de OI es conocido como un sistema integrado de membranas. (IMS).

Las ventajas de un IMS con respecto a sistema OI con pretratamiento convencional son significativas:

- Mejor calidad del filtrado. El ensuciamiento con materia coloidal del sistema de OI es bajo, con valores inferiores de SDI y turbidez;
- La calidad del filtrado es mucho más constante. Esto es eficaz cuando se trata de aguas residuales o de superficie con salinidades variables;
- La frecuencia de limpiezas debido a la materia coloidal disminuye;

- Los sistemas de MF/UF requieren menos tiempo y más facilidad de operación que los convencionales, sobre todo si son propensos a inestabilidades.
- Los flujos residuales concentrados son más fácil de emplear que los flujos químicamente cargados, procedentes de los sistemas que utilizan el pretratamiento convencional.
- Las ampliaciones son fácil de diseñar;
- Los costes operativos son competitivos, y, en algún caso inferiores;
- Los costes de montaje son competitivos, y, en algún caso inferiores;
- El espacio requerido es inferior, alguna vez con un factor de 5 con respecto a los grandes sistemas

**Detalles técnicos a tener en cuenta a la hora de realizar un diseño de una planta de O.I.**

**1.- Salinidad del agua a tratar**

Existe un punto muy importante a comentar cuando hablamos de tecnología aplicable a la eliminación de la salinidad y es la recuperación a la que va a trabajar la planta, ya que como se expresa en la figura 3, la salinidad a tener en cuenta cuando trabajamos con una planta de O.I. es la media entre el agua de aporte y el agua que tenemos en el concentrado, cuanto más alta es la conversión, más alta será la salinidad a tratar, o lo que es lo mismo, la presión osmótica a vencer para que se produzca el proceso de O.I.

Figura 3

**Recuperación en una planta de Osmosis Inversa**

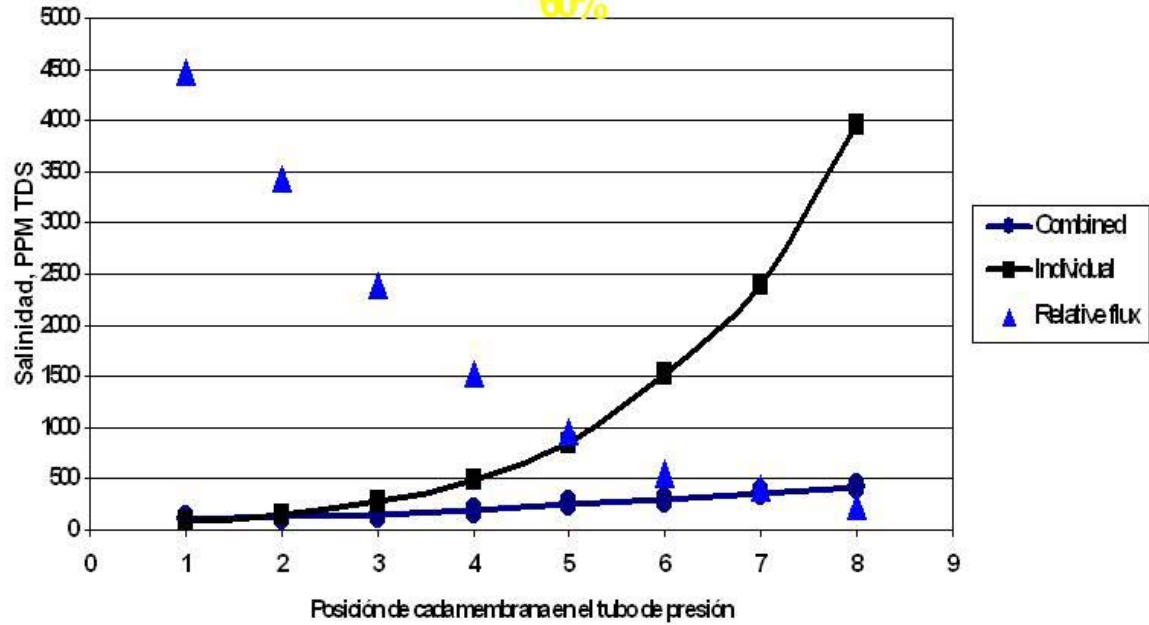
**% Recuperación = (Flujo de permeado / Alimentación) x 100%**

- Afecta la presión de alimentación necesaria al variar la presión osmótica. Afecta el rechazo de sales al variar la concentración de sales en el concentrado.
- A 50 % de recuperación, los SDT en el concentrado son 2 veces los de alimentación.
- A 67 % son 3x
- A 75 % son 4x
- A 80 % son 5x
- A 90 % de recuperación, los SDT en el concentrado son 10 veces los de la alimentación.

Igualmente en la Tabla 2, podrán ver el efecto de la Contribución de la salinidad en plantas de agua de mar, en las cajas de presión por posición de cada elemento trabajando a una conversión del 60%. En referencia a la salinidad, es sumamente importante tener en cuenta que el número de membranas en una caja de presión también afecta a la salinidad de la misma.

Tabla 2. Contribución de la salinidad en plantas de agua de mar, en las cajas de presión por posición de cada elemento trabajando a una conversión del 60%

Contribución a la salinidad de cada membrana en plantas de agua de mar, por posición con una conversión de trabajo del 60%



## 2.- Flujos de operación

Se entiende flujos, como los litros de agua producida a través de cada m<sup>2</sup> de área de membrana durante un periodo de tiempo (día / hora). En la Tabla 3, se expresan los datos en g.f.d. la conversión de g.f.d a l/m<sup>2</sup>h es de 1.7, por lo que 8.2 GFD equivaldrían a 13.9 l/m<sup>2</sup>h. También adjuntamos en la misma tabla el cálculo de la cantidad de membranas recomendables para una instalación, que en el ejemplo se ha tomado de 250 m<sup>2</sup>/d.

Tabla 3 . Resumen de flujos a utilizar dependiendo del tipo de captación para desalar aguas salobres o agua de mar.

**Agua salobre**

Tipo de captación	g.f.d.
Pozo - SDI < 2	15
Agua superficial - red - SDI > 2 and < 4	11.5
Agua superficial con altos contenidos orgánicos - SDI < 4	10
Agua residual - SDI < 4	10
Permeado de O.I. - SDI < 1	20

**Agua de mar**

Tipo de captación	g.f.d.
Pozo - SDI < 2	8.2
Captación en toma abierta - SDI < 4	7.2

$$G.F.D = \frac{264 \times \text{Caudal de permeado [ m}^3\text{/d]}}{\text{Area total de membrana en [ft}^2\text{]}}$$

**Ejemplo: 250 m<sup>3</sup>/d of TDS 4,000 ppm, Agua de pozo**  
 Utilizamos las membranas CPA3  
 Buscamos unos flujos de trabajo entorno a 15 GFD

$$15 = \frac{264 \times 250}{400 \text{ ft}^2 \times \text{número de membranas CPA3}}$$

Obtenemos un nº de membranas CPA3 de 11, como vamos a trabajar a un 75% de conversión necesitaremos dos etapas, por lo que utilizaremos PV de 4 elementos en un sistema (2:1)<sup>4</sup>

nº TOTAL CPA3 ----- 12 elementos.

### **3.- Recomendación de membrana a utilizar**

En la tabla 4, representamos de manera esquemática un pequeño resumen de las membranas que se recomienda sean utilizadas en referencia a las salinidades del agua de aporte. Deben tener en cuenta que se supone conversiones elevadas >75%. Las membranas de baja presión, no deberían ser utilizadas en salinidades medias superiores a 7,500 ppm, ya que son unas membranas que con muy baja presión obtenemos mucha producción de agua, por lo que habría un gran desfase hidráulico en las plantas que perjudicaría de manera notable la producción normal de la planta. La determinación del tipo de membrana a utilizar dependerá igualmente de la finalidad de la planta así si se desea obtener una gran calidad del agua producto con baja salinidad, se recomendará trabajar con membranas convencionales (CPA3) en vez de membranas de baja presión (ESPA). La calidad del agua obtenida trabajando con membranas con el mismo rechazo de sales (según las condiciones de testeo), cuando trabajamos a más presión, obtenemos una mejor calidad.

Tabla 4.

<b>Membranas agua salobre</b>		
	<b>area ft<sup>2</sup></b>	<b>aplicación</b>
CPA3	400	salinidad > 2,000 ppm
ESPA1 or 3	400	salinidad < 3,000 ppm
ESPA2	400	salinidad < 3,000 ppm
LFC1/3	400	Terciarios - alto contenido orgánico
<b>Membranas agua de mar</b>		
	<b>area ft<sup>2</sup></b>	<b>aplicación</b>
SWC3	370	Agua de mar - potable
SWC2	315	Agua de mar - irrigación

Ejemplos prácticos de eliminación de la salinidad en diferentes plantas de O.I.

### **Planta de O.I. de agua de mar Larnaca, Chipre**

Fecha	Marzo 2001
Conversión	50%
Presión entrada 1a etapa- bar	67
Presión salida 1a etapa – bar	65.7
Caudal – m3/h /total	2,460
Calidad agua entrada – ppm	39,500
Boro entrada – ppm	5.7
U producto – uS/cm	< 800
Boro permeado - ppm.	0.75

### **Planta de agua residual en Bedok, Singapore**

Capacidad	10,000 m <sup>3</sup> /día (para irrigación)
Configuración	Efluente saliendo de secundario, Cloración, filtración, Microfiltración, Antincrustante, O.I y UV.
Tipo de membrana	Hydranautics, LFC1
Configuración	28:14:8
Flujos	18.7 l/m3-hr (11 gfd)
Presión de trabajo	10 bar (145 psi)
Testeos en membrana	Testeo en húmedo, Testeos de virus en continuo

### **Planta de O.I. de agua salobre de Arica, Chile**

Fecha	Agosto 1998
Presión entrada – bar	13,0
Presión salida 1a etapa- bar	11,3
Presión salida 2a etapa – bar	9,86
Caudal – m3/h	187,3
U entrada – uS/cm	4550
Cl entrada – ppm	964
U producto – uS/cm	139
Cl permeado - ppm.	39,0