

# ASPECTOS ENERGÉTICOS DE LA DESALINIZACIÓN

Texto: **Manuel Fariñas**

Director de Tecnología de I+D de Acciona Agua

Los costes de producción de agua en una gran desalinizadora, con una capacidad de producción superior a los 100.000 m<sup>3</sup>/día, se reparten como se muestra en la figura 1.

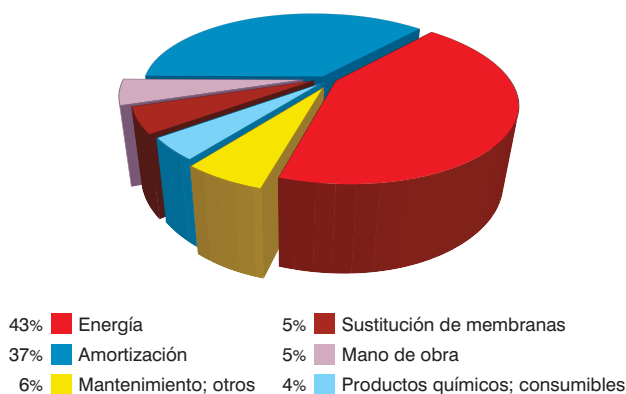


Figura 1. Porcentajes de participación en el coste del agua en una gran desalinizadora

Como se ve, el coste debido al consumo de energía por parte del proceso es enormemente importante y, aunque su porcentaje puede variar de unos países a otros en función del precio local de la energía [Wolf, 2005], su repercusión en el coste total del agua desalinizada es siempre superior al 40%.

En las circunstancias actuales, con los precios energéticos en alza, para conseguir abaratar el precio del m<sup>3</sup> de agua de mar desalinizada, es primordial disminuir tanto el consumo energético como la inversión inicial requerida. Las

reducciones en el resto de los sumandos serán bienvenidas pero su repercusión en el precio final será menor.

## PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

El consumo específico de energía en la desalinización del agua de mar depende de varios parámetros, entre los que cabe destacar:

- La temperatura del agua de mar.
- La mayor o menor complejidad del pretratamiento.
- La conversión de trabajo.
- La eficiencia de los sistemas de bombeo.
- La recuperación de la energía existente en la salmuera de rechazo.
- La permeabilidad y el paso de sales de las membranas.
- Las pérdidas y varios.
- La presión necesaria en la impulsión del agua desalinizada.

Como el bombeo al exterior del agua producida varía mucho de unas desalinizadoras a otras, para poder comparar entre sí los distintos resultados, a lo largo del presente artículo, sólo se considera el consumo específico de energía del agua producida, debidamente remineralizada, puesta en el depósito de la desalinizadora.

Antes de cuantificar cómo influye cada uno de los parámetros anteriores, vamos a establecer previamente el marco general en el que se ha desarrollado el estudio:

### • TEMPERATURA DEL AGUA DE MAR

En las grandes desalinizadoras la captación del agua de mar suele ser superficial, lo que implica tra-

bajar con fluctuaciones importantes de su temperatura a lo largo del año. Estas variaciones van desde los 10 hasta los 25 °C en el Mar Mediterráneo y desde los 20 hasta los 40 °C en el Golfo Pérsico o en la salida del agua de refrigeración de una central térmica.

Consecuentemente, a la hora de realizar un estudio sobre la influencia de la temperatura del agua de mar en el consumo específico de energía en la desalinización, hay que considerar que dicha temperatura puede tomar cualquier valor comprendido entre 10 y 40 °C.

• **COMPLEJIDAD DEL PRETRATAMIENTO**

Cuanto mas contaminada esté el agua de mar tanto más complejo será el pretratamiento al que debemos someterla, así que podemos establecer tres grados de complejidad para el pretratamiento, tal y como se recoge en la Tabla 1

**TABLA 1**  
Pretratamientos considerados

Grado de complejidad	Proceso	
	Convencional	Avanzado
Alto	Coagulación – Floculación Flotación Doble filtración	Coagulación – Floculación Flotación Micro/Ultrafiltración
Medio	Coagulación – Floculación Doble filtración	Coagulación – Floculación Micro/Ultrafiltración
Bajo	Coagulación – Floculación Simple filtración	Coagulación – Floculación Micro/Ultrafiltración

Cuanto mas complicado sea el pretratamiento, mayor será la presión requerida en el agua de mar para atravesar las distintas etapas que lo componen y por tanto su consumo específico de energía.

• **CONVERSIÓN DE TRABAJO**

Cuanto mayor sea la conversión de trabajo, mayor será la presión necesaria a la entrada de las membranas y menor el caudal de agua de mar a procesar en el pretratamiento.

Al aumentar la conversión se incrementa el consumo específico de energía en las membranas y disminuye, por contra, en el pretratamiento.

Habida cuenta de que para conversiones superiores al 55% hay que utilizar una doble etapa de

membranas con una bomba booster intermedia, dejando de ser las distintas soluciones comparables entre sí, y que por debajo del 25% el consumo específico de energía aumenta de forma desmesurada en el pretratamiento, en el presente estudio sólo se han considerado conversiones comprendidas entre el 25 y el 55%.

• **EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO**

Cuanto mayor sea la eficiencia de los sistemas de bombeo menor será el consumo específico de energía y viceversa.

La energía que se pierde por la ineficiencia de cada bombeo se estima restando de la energía consumida (considerando los rendimientos normales de los equipos que lo componen como bombas, motores, variadores, etc), la energía estimada suponiendo que dichos rendimientos son del 100%.

• **RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA EXISTENTE EN LA SALMUERA DE RECHAZO**

En las desalinizadoras construidas hace unos años, la energía existente en la salmuera de rechazo se recuperaba mediante turbinas Pelton. En las que se están construyendo actualmente, dichas turbinas se han sustituido por intercambiadores de presión, colocados como se muestra en la figura 2, lo que permite ahorrar del orden de 0,4 kWh por cada m<sup>3</sup> de agua desalinizada.

En lo sucesivo, dado el gran avance que supone la recuperación de la energía del rechazo con los intercambiadores de presión, sólo nos referiremos a desalinizadoras equipadas con estos dispositivos.

• **PERMEABILIDAD Y PASO DE SALES DE LAS MEMBRANAS**

En las membranas de ósmosis inversa (O.I.) el flujo de permeado responde a la expresión:

$$J_a = A (DP - D_p)$$

Siendo:

**J<sub>a</sub>** = Caudal de agua desalinizada por unidad de superficie de membrana.

**A** = Constante de permeabilidad de la membrana.

**DP** = Gradiente de presión hidráulica a través de la membrana (presión transmembrana).

**D<sub>p</sub>** = Gradiente de presión osmótica a través de la membrana.

**DP - D<sub>p</sub>** = Presión efectiva a través de la membrana.

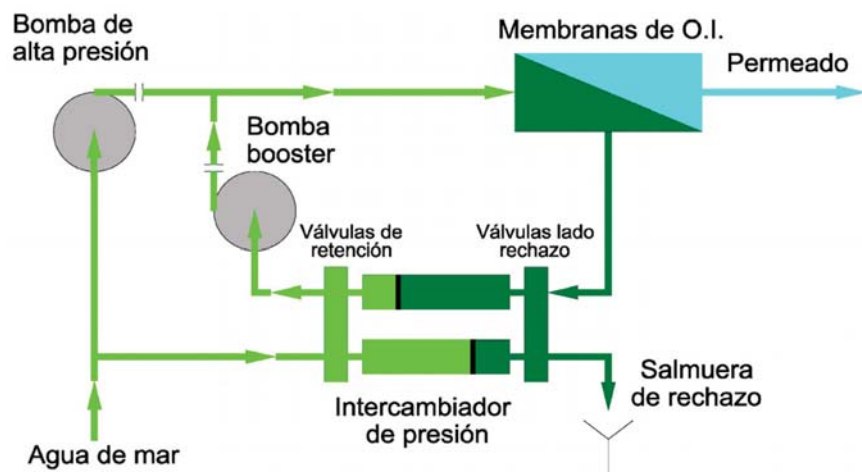


Figura 2  
Esquema de un sistema de recuperación de energía con intercambiadores de presión

Como se observa, para que las membranas de O.I. puedan producir un determinado flujo de agua desalinizada, la presión efectiva del agua de mar debe ser tanto mayor cuanto menor sea la constante de permeabilidad de la membrana y viceversa. Consecuentemente, cuanto mayor sea la presión efectiva requerida por las membranas (o bien cuanto menor sea su constante de permeabilidad), tanto más ineficientes serán éstas, lo que implicará un consumo de energía mayor.

Adicionalmente, para que el rechazo pueda circular, tiene que vencer las pérdidas de carga debidas a las membranas, tuberías y válvulas. Estas pérdidas de carga también consumen energía.

Finalmente las bombas y motores que impulsan el agua de mar hacia las membranas presentan rendimientos inferiores al 100% lo que significa que

una parte de la energía del bombeo se disipa en forma de calor.

A efectos prácticos, la energía consumida en las membranas de O.I. podemos dividirla, por tanto, en tres grandes apartados:

a) **La consumida “en la desalinización propiamente dicha”**

Esta energía es la debida a la presión efectiva que necesitan las membranas para desalinizar el agua de mar, excluyendo todo tipo de pérdidas adicionales.

b) **La debida a las pérdidas de carga**

Esta energía sería la consecuencia de las pérdidas de carga que se producen en las membranas, tuberías y válvulas que las alimentan o que recoge la salmuera de rechazo. Estas pérdidas de carga son imprescindibles para el funcionamiento del sistema pero pueden variar en función del diseño adoptado.

c) **La debida a la ineficiencia de los bombeos**

Esta energía es la disipada en forma de calor por los motores y bombas encargados de enviar el agua de mar hacia las membranas, debido a que sus rendimientos son inferiores al 100%.

#### • PÉRDIDAS Y VARIOS

Para que la desalinizadora funcione necesita energía eléctrica. Esta suele llegar a la planta a una tensión elevada que, generalmente, es necesario rebajar utilizando transformadores. Para distribuir esta energía eléctrica entre los distintos equipos se precisan cuadros eléctricos, cables... etc.

Tanto los transformadores como los cuadros eléctricos, los cables... etc, disipan una cierta cantidad de energía que suele englobarse dentro del apartado de “pérdidas”.

Adicionalmente las desalinizadoras hay que iluminarlas por la noche, la sala de control suele requerir aire acondicionado.... etc. Todos estos consumos adicionales suelen incluirse en un apartado llamado “varios”.

**TABLA 2**

Consumo específico de energía (kWh/m<sup>3</sup>) en el pretratamiento de una gran desalinizadora (un solo paso; conversión=45%; salinidad: 39 ‰; intercambiadores de presión)

Grado de complejidad	Proceso	Requerido por el proceso	Por la ineficiencia de los bombeos	Consumo específico total
Alto	Convencional	0,48	0,15	0,63
	Avanzado	0,42	0,13	0,55
Medio	Convencional	0,41	0,12	0,53
	Avanzado	0,35	0,10	0,45
Bajo	Convencional	0,29	0,07	0,36
	Avanzado	0,29	0,08	0,37

## INFLUENCIA DEL PRETRATAMIENTO

La temperatura del agua de mar prácticamente no influye en el consumo específico de energía en el pretratamiento. Una gran desalinizadora, trabajando con un solo paso, con una conversión del 45%, una salinidad de 39 ‰ y provista de intercambiadores de presión, presentaría el consumo específico de energía en el pretratamiento indicado en la Tabla 2.

En la figura 3 se recoge la variación de dicho consumo específico de energía en función de la conversión de trabajo.

A la vista de la Tabla 2 y del gráfico anterior, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- ☞ A medida que el grado de complejidad del pretratamiento disminuye, no sólo se reduce la energía requerida por el proceso sino también el consumo debido a la ineficiencia de los bombeos.
- ☞ El consumo específico de energía en el pretratamiento disminuye al aumentar la conversión de trabajo.

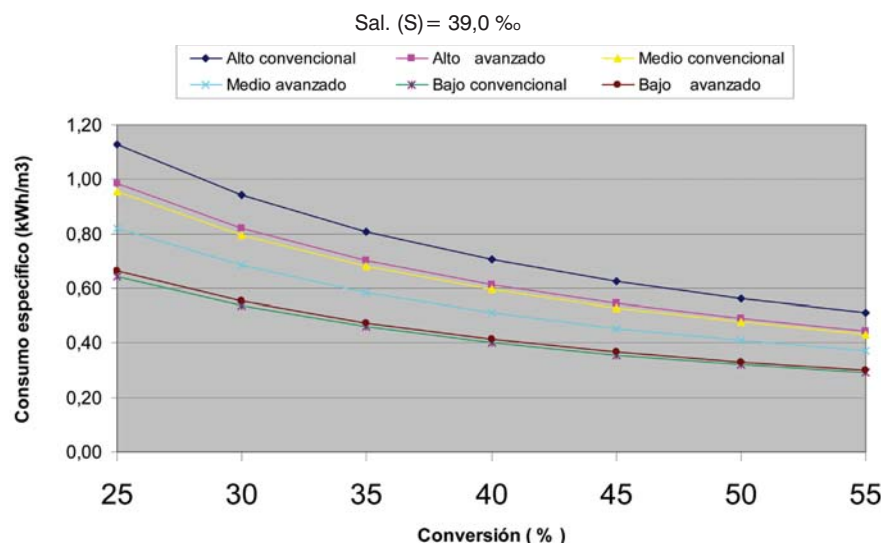


Figura 3. Evolución del consumo específico de energía en el pretratamiento, en función de la conversión de trabajo y del grado de complejidad.

- ✎ La diferencia energética entre un pretratamiento convencional y otro avanzado, dentro de un mismo grado de complejidad, se acorta a medida que aumenta la conversión de trabajo.
- ✎ Cuando el pretratamiento requerido es sencillo, no tiene ningún sentido instalar un proceso avanzado (utilizando una Micro-Ultrafiltración). El pretratamiento avanzado, además de ser más caro de inversión inicial, podría tener un consumo específico de energía ligeramente superior.
- ✎ En los pretratamientos complejos o de complejidad media, la instalación de un sistema avanzado permite reducir ligeramente el consumo específico de energía, lo que alivia la diferencia de inversiones iniciales existentes entre ambos.
- ✎ La instalación de una flotación supone incrementar el consumo específico de energía en 0,1 kWh/m<sup>3</sup>. Ante tal situación conviene plantearse la conveniencia o no de instalar dicha flotación adicional dada la seguridad de funcionamiento que aporta al pretratamiento y el escaso consumo de energía que supone.
- ✎ El consumo específico de energía es menor cuanto mas simple sea el pretratamiento. El ahorro de energía puede suponer del orden de 0,27 kWh/m<sup>3</sup> con una conversión del 45% y de 0,30 kWh/m<sup>3</sup> con conversiones del 40%. Conviene, por tanto, abrir líneas de investigación que permitan poner a punto nuevas captaciones de agua de mar que permitan simplificar el pretratamiento

## INFLUENCIA DE LAS MEMBRANAS

El consumo específico de las membranas es independiente de la mayor o menor complejidad del pretratamiento, por lo que todo lo que se diga a continuación es aplicable a cualquiera de los pretratamientos anteriores.

Las figuras 4 y 5 muestran cómo evolucionan a 15 y a 35 °C cada uno de los tres apartados en los que hemos dividido el consumo específico de energía de las membranas.

Se observa en primer lugar que el consumo específico de energía

debido a la desalinización propiamente dicha crece cuando aumenta la conversión o cuando disminuye la temperatura del agua de mar. El descenso de 5 °C en la temperatura del agua de mar supone como media incrementar en 0,1 kWh/m<sup>3</sup> el consumo específico de energía.

El consumo debido a las pérdidas de carga es prácticamente indepen-

diente de la temperatura y disminuye al aumentar la conversión.

El consumo específico debido a la ineficiencia del bombeo a alta presión así como al sistema de recuperación de la energía de la salmuera de rechazo disminuye muy ligeramente al aumentar la temperatura y aumenta también muy ligeramente al incrementar la conversión.

Desglose del consumo específico de energía en las membranas  
Sal. (S) = 39,0 ‰ Temp = 15 °C

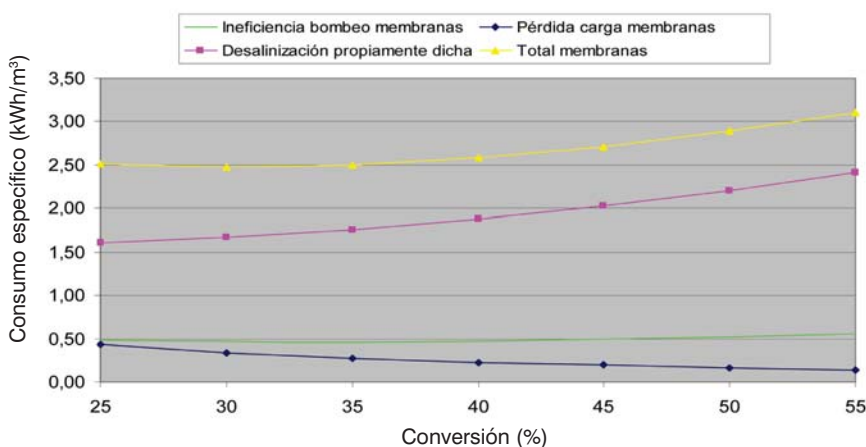


Figura 4. Evolución de los distintos sumandos que intervienen, a 15 °C, en el consumo específico de energía por parte de las membranas.

Desglose del consumo específico de energía en las membranas  
Sal. (S) = 39,0 ‰ Temp = 35 °C

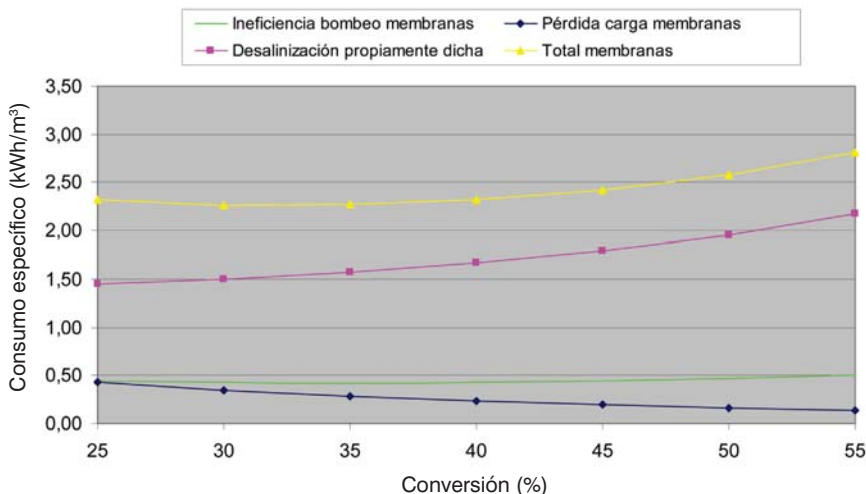


Figura 5. Evolución de los distintos sumandos que intervienen, a 35 °C, en el consumo específico de energía por parte de las membranas.

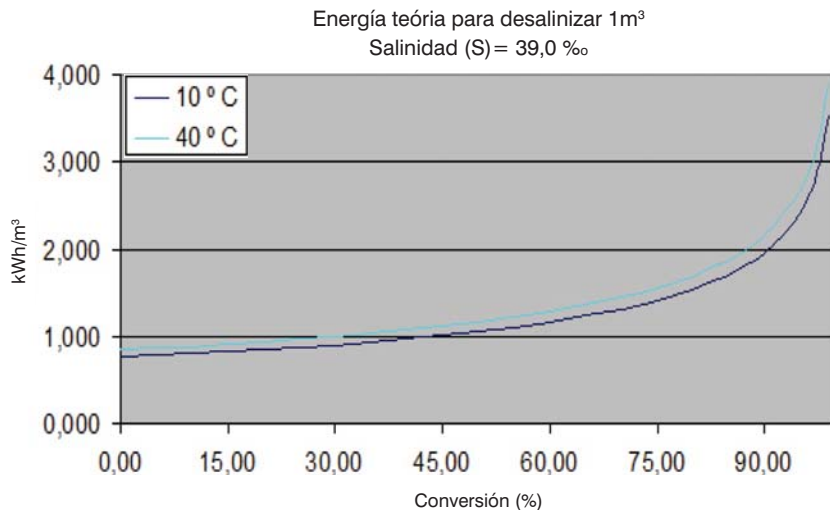


Figura 6. Energía teórica para desalinizar 1 m<sup>3</sup> de agua de mar

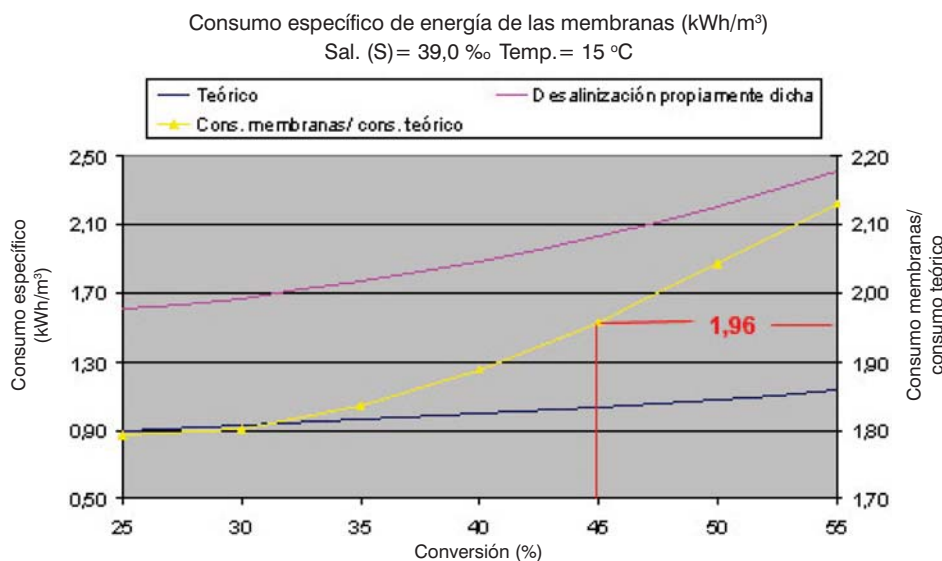


Figura 7. Relación entre el consumo real y el teórico en las membranas actuales de ósmosis inversa, a 15 °C de temperatura

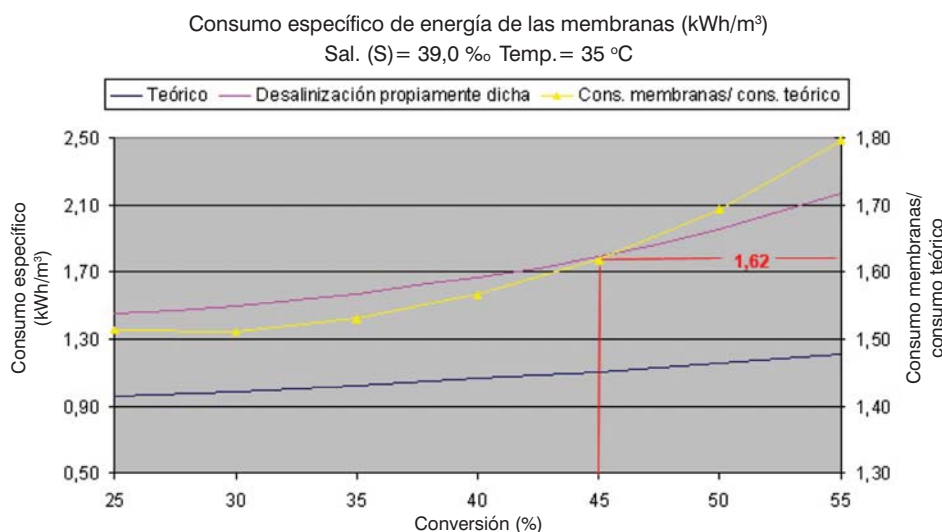


Figura 8. Relación entre el consumo real y el teórico en las membranas actuales de ósmosis inversa, a 35 °C de temperatura

La figura 6 muestra como varía, en función de la temperatura y de la conversión, la energía teórica necesaria para desalinizar un m<sup>3</sup> de agua de mar mediante un proceso reversible. Como se ve, el consumo teórico aumenta tanto con la conversión como con la temperatura.

Para determinar en qué grado de desarrollo se encuentran las membranas respecto a los valores mínimos teóricos basta observar las figuras 7 y 8 donde se comparan los consumos reales con los mínimos teóricos a distintas temperaturas.

A la vista de dichas figuras se concluye que cuanto mayor sea la conversión de trabajo, los consumos específicos reales de las membranas se alejan más de los valores teóricos.

La temperatura juega sin embargo en sentido contrario: cuanto más alta sea la temperatura del agua de mar, más se aproximan los consumos reales a los valores teóricos.

Así por ejemplo a 15 °C y 45% de conversión, el consumo específico de las membranas es de 2,03 kWh/m<sup>3</sup> cuando el mínimo teórico es de 1,04 kWh/m<sup>3</sup> (relación consumo real/consumo teórico = 1,96).

Por el contrario a 35 °C y 45% de conversión, el consumo específico de las membranas es de 1,79 kWh/m<sup>3</sup> siendo el mínimo teórico de 1,11 kWh/m<sup>3</sup> (relación consumo real/consumo teórico = 1,62) lo que significa que, en la desalinización propiamente dicha y a alta temperatura, el consumo de energía por parte de las membranas es un 62% superior al valor teórico.

## CONSUMO ESPECÍFICO TOTAL

Las figuras 9, 10 y 11 muestran como evolucionan los consumos específicos to-

tales de energía en función de la temperatura y de la conversión de trabajo para distintos pretratamientos y grados de complejidad.

A la vista de las tres figuras anteriores, se concluye:

- ✦ Al instalar intercambiadores de presión para recuperar la energía existente en la salmuera de rechazo, los mínimos consumos específicos de energía, para los pretratamientos con un grado de complejidad alto y medio, se producen con conversiones del orden del 40%. Cuando el pretratamiento es sencillo, el mínimo consumo específico de energía se produce con conversiones en el entorno del 35 – 40%.
- ✦ La diferencia de consumos energéticos entre un pretratamiento convencional con un grado de complejidad alto y otro con un grado de complejidad bajo es de 0,32 kWh/m<sup>3</sup> con cualquier temperatura en el agua de mar.
- ✦ Con un pretratamiento sencillo y una conversión del 35 – 40%, el consumo específico de energía es del orden de 3,04 kWh/m<sup>3</sup> a 15 °C y de 2,80 kWh/m<sup>3</sup> a 35 °C.

## LA NUEVA GENERACIÓN DE MEMBRANAS Y EL CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

Las membranas han evolucionado enormemente en los últimos años pero todavía tendrán que evolucionar mucho más en el futuro.

Las mejoras que está exigiendo el mercado para las membranas de ósmosis inversa son:

- ✦ Membranas resistentes al cloro libre.
- ✦ Membranas más resistentes al ensuciamiento.

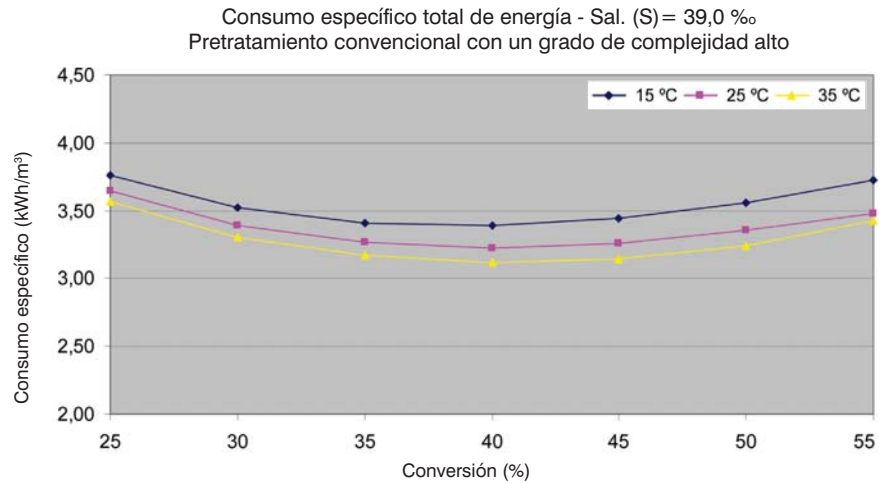


Figura 9. Evolución del consumo total de energía para un pretratamiento convencional con un grado de complejidad alto

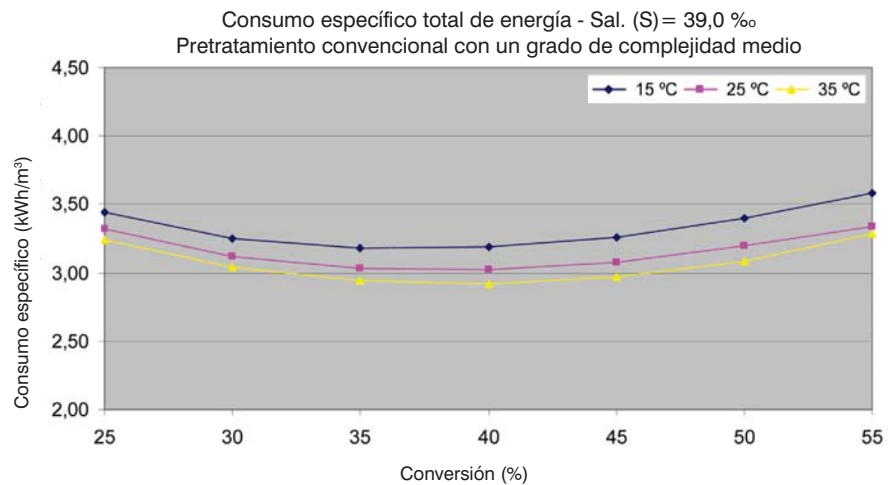


Figura 10. Evolución del consumo total de energía para un pretratamiento avanzado con un grado de complejidad medio

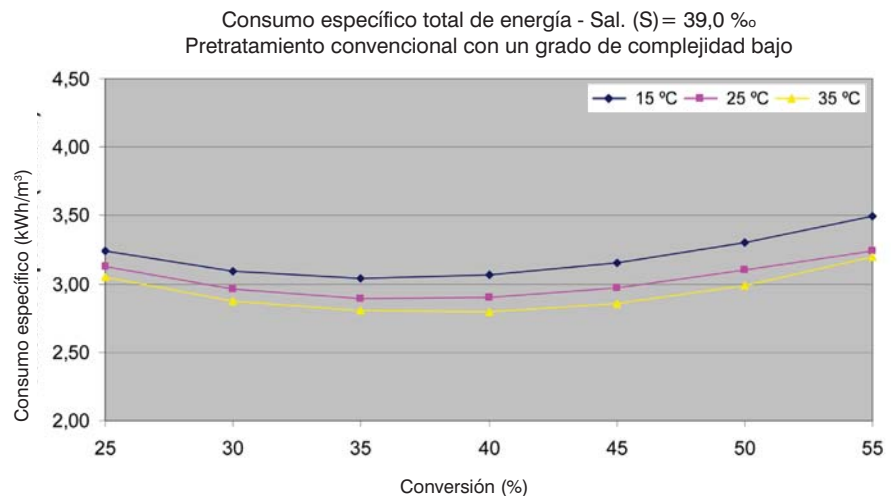


Figura 11. Evolución del consumo total de energía para un pretratamiento convencional con un grado de complejidad bajo

- ✎ Un módulo distinto, que se pueda lavar fácilmente.
- ✎ Membranas más eficientes, que trabajen a presiones más bajas y que consuman menos energía.
- ✎ Membranas con mayor rechazo de ciertos iones, como cloruros, bromuros y boro.
- ✎ Membranas con mayor rechazo de compuestos orgánicos de bajo peso molecular.

Para conseguir alguna de estas mejoras, en estos momentos se está desarrollando un nuevo concepto de membrana llamado “capa fina nanocompuesta” (TFN= Thin Film Nanocomposite) en contraposición con las actuales de “capa fina compuesta” (TFC=Thin Film Composite).

La innovación consiste (Hoeck et al., 2007), como muestra la figura 12, en introducir, en la finísima capa densa que se coloca sobre la polisulfona porosa, una serie de “nanopartículas” de carbono o de zeolita con una cristalización especial, de manera que forme tubos muy hidrófilos y con una elevada carga eléctrica.

Los tubos hidrófilos dejarían pasar fácilmente el agua y su alta carga

rechazaría los iones y todas aquellas moléculas con carga eléctrica.

En los primeros ensayos de laboratorio realizados con esta nueva tecnología, se han obtenido permeabilidades 1,5 veces superiores a las de las membranas existentes. Si esta permeabilidad se mantuviese a escala real, significaría que la presión de entrada a las membranas necesaria para mantener los flujos de permeado actuales podría reducirse en unos 4 bares lo que permitiría disminuir el consumo específico de energía en 0,15 kWh/m<sup>3</sup>.


Los nanotubos monocapa de carbono presentan además propiedades bactericidas (Elimelech et al., 2007). En las nanopartículas de zeolita, las investigaciones en este campo van dirigidas a introducir en la matriz de la zeolita una serie de productos antimicrobianos que impidan los desarrollos biológicos sobre las membranas. Si este objetivo se consiguiese, no serían necesarias las membranas resistentes al cloro.

La obtención de membranas más resistentes al ensuciamiento junto con un diseño alternativo de los módulos actuales que mejore sustancialmente la limpieza de las membranas, permi-

tiría simplificar enormemente el pretratamiento lo que reduciría tanto la inversión inicial como el consumo específico de energía.

## CONCLUSIONES

A la vista de todo lo expuesto, pueden sacarse las siguientes conclusiones:

- ✎ La sustitución de las turbinas Pelton por intercambiadores de presión ha desplazado el punto de mínimo consumo específico de energía hacia conversiones del orden del 40%.
- ✎ El consumo específico de energía es menor cuanto más simple sea el pretratamiento. Conviene por tanto recurrir a captaciones de agua de mar que simplifiquen el pretratamiento.
- ✎ El consumo específico de energía se reduce a medida que aumenta la temperatura del agua de mar. Interesa, consecuentemente, recuperar todos los calores residuales disponibles, máxime si la naturaleza de las membranas impide la aparición de desarrollos biológicos sobre su superficie.
- ✎ A cinco años vista, se podría alcanzar un consumo específico de energía, para el agua tratada puesta al pie de la desalinizadora del orden de los 2,65 kWh/m<sup>3</sup>. 

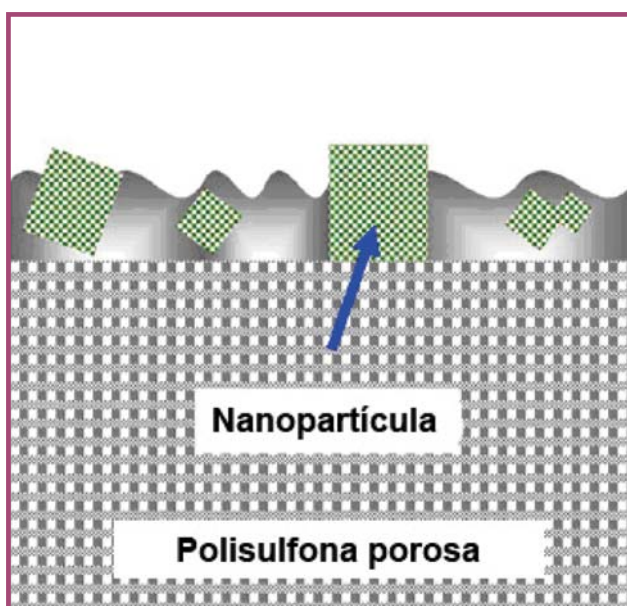


Figura 12. Esquema de una membrana “de capa fina nanocompuesta” (cortesía de Eric M. V. Hoeck)

## BIBLIOGRAFÍA

- Elimelech, M. et al., 2007. Single-walled carbon nanotubes exhibit strong antimicrobial activity. *Langimur*, 23, 8670-8673.
- Fariñas, M., 2006. Novedades tecnológicas para reducción de los consumos energéticos: Intercambiadores de presión. CICCIP demarcación de Andalucía. Jornada de desalación.
- Hoeck E. et al., 2007. Interfacial polymerization of thin film nanocomposites: A new concept for reverse osmosis. *Journal of Membrane Science* 294, 1-7.
- Wolf, M. y Bartels, C., 2005. Optimization of seawater systems design. *Desalination*