

Mejora de la eficiencia energética de las plantas desaladoras: nuevos sistemas de recuperación de energía

Francisco Martín Morales y Juan María Sánchez Sánchez

DESCRIPTORES

DESALACIÓN
ÓSMOSIS INVERSA
CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA
SISTEMAS DE RECUPERACIÓN
CÁMARAS DE INTERCAMBIO DE PRESIÓN

Procesos comerciales y su consumo energético

Breve introducción histórica

Las plantas desaladoras comenzaron a instalarse en tierra firme en la década de los cincuenta; anteriormente se habían instalado en barcos, que es donde tuvieron su inicio estos procesos. En España la primera planta desaladora se instaló en la isla de Lanzarote en el año 1963, y fue tras la crisis del petróleo del año 1973 cuando el mercado de la desalación tuvo su desarrollo más importante, con la construcción de grandes plantas desaladoras en los países del Golfo. Se han desarrollado más de veinte procesos de desalación, pero no todos tienen aplicación comercial. En general a los procesos de desalación se los puede agrupar en tres grandes grupos: los procesos basados en la destilación del agua, los basados en la congelación del agua y los basados en la separación de las sales y el agua mediante membranas. Los primeros en desarrollarse fueron los de destilación, los de congelación no han pasado nunca a explotación comercial y, en la actualidad, los procesos de membranas son los que dominan cada vez más el mercado.

La participación, en términos de $m^3/día$ instalados de cada tipo de proceso, tanto en España como en el mundo, es la que se muestra en la figura 1; de ella se puede deducir qué procesos son los que realmente están en el mercado. Los denominados como MSF "Multistage Flash Evaporation", CMV "Compresión Mecánica de Vapor" y MED "Multiefect Distillation", son procesos de evaporación; fueron los primeros en ser utilizados en las plantas desaladoras, de ahí su gran implantación a nivel mundial. De hecho, el proceso de MSF llegó a representar el 85% de las plantas instaladas durante el período del 70 al 85. El proceso denominado OI, "Ósmosis Inversa", basado en la utilización de membranas, es el proceso que más se utiliza en España y en el mundo, actualmente.

Consumo de energía por proceso

Los procesos de destilación, tales como el MSF y MED, utilizan una fuente de calor para producir la destilación del agua y además energía eléctrica para el bombeo del agua por los circuitos del proceso. El proceso de CMV, aunque es de destilación, solo utiliza energía eléctrica, al igual que el proceso de OI. Todos ellos han mejorado sus consumos de energía desde sus inicios hasta la situación actual. Concretamente el proceso de MSF consumía tres veces más de calor al principio, que el que consumen las plantas actuales. La forma de mejorar el rendimiento en estos procesos ha sido aumentando las superficies de transferencia de calor, con lo que la recuperación de calor es mayor. La causa fundamental de estos cambios fue la crisis del petróleo del 73. Hasta ese momento la energía era muy barata, tanto, que era preferible consumir más energía a incrementar los costos de inversión para reducir su consumo. Actualmente, la conciencia medioambiental por una parte y el alto costo de la energía por otra, han propiciado la reducción del consumo energético. En la tabla 1 se muestra cuál ha sido esta evolución a lo largo del tiempo.

La energía calorífica necesaria en los procesos de MSF y MED procede, generalmente, del vapor de escape de una turbina de una central térmica. El objetivo es utilizar un vapor que ya ha realizado un trabajo produciendo kWh, de esta forma su costo es menor. Por este motivo, este tipo de plantas desaladoras está asociado a una central de generación de electricidad casi en el 99% de los casos.

Como puede apreciarse en la tabla 1, la reducción en consumo de energía desde que un proceso inicia su andadura hasta la actualidad, es casi la tercera parte del consumo inicial. La comparación entre los procesos es compleja, debido a que el tipo de energía consumida no es el mismo. Si la energía en forma de vapor que utilizan los procesos de MSF

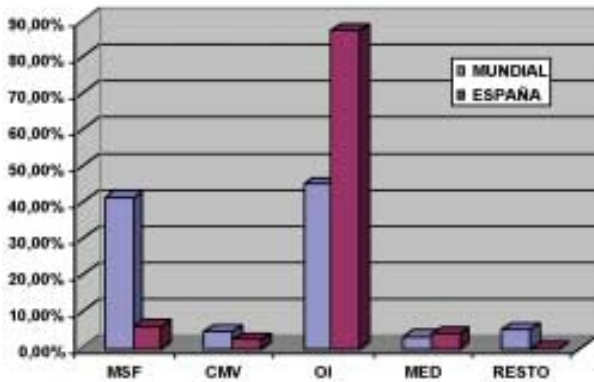


Fig. 1. Reparto por procesos. Fuente: IDA WDPI Report N° 16.

TABLA 1				
Evolución de la energía consumida por cada proceso				
Tipo de proceso	Al inicio del proceso		En la actualidad	
	Calorífica (kcal/m ³)	Eléctrica (kWh/m ³)	Calorífica (kcal/m ³)	Eléctrica (kWh/m ³)
MSF	185.140	7,0	50.495	4,5
MED	111.085	3,0	50.495	1,6
CMV	-	26,0	-	8,5
OI	-	11,7	-	3,5

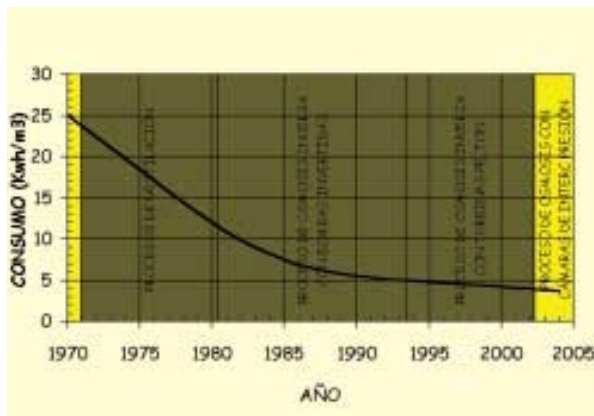


Fig. 2. Evolución del consumo específico. Fuente: el autor

y MED se traduce a kWh, podemos hacer una comparación entre los procesos y ver en una gráfica cuál ha sido a lo largo del tiempo la reducción que se ha producido. En la figura 2 podemos ver cuál ha sido la evolución del consumo específico en la desalación en general, tanto por el cambio en el tipo de proceso, como por las mejoras dentro de cada uno de ellos. La gráfica es la envolvente de los consumos mínimos en el tiempo, indicando en cada período el proceso que consigue estos mínimos de consumo.

Recuperadores de energía

Tipos de recuperadores utilizados

En la figura 2 se puede ver un primer esbozo de cuáles han sido los sistemas utilizados para recuperar la energía en el proceso de ósmosis inversa. Como es sabido, para producir la separación de las sales y el agua en las membranas, es necesario darle a éstas una presión superior a la presión osmótica de la disolución salina. Esto tiene como consecuencia práctica que, para desalar el agua de mar, sea preciso llevar el agua de mar hasta una presión de 70 bares, aproximadamente, en la entrada de las membranas. Esta presión no se pierde en el interior de las membranas, sino que la salmuera a la salida tiene esa misma presión menos las pérdidas de carga al pasar por las membranas, unos tres bares aproximadamente, es decir, a la salida de las membranas de ósmosis inversa la salmuera tiene unos 67 bares de presión. Como esta salmuera debe ser devuelta al mar, hay que quitarle previamente esa presión. Las primeras plantas de ósmosis inversa, de tamaño muy pequeño y en las que la preocupación era el comportamiento de las membranas, solían tener una válvula reductora de presión, para romper carga de la salmuera antes de su envío al mar. Esta situación duró muy poco, pues pronto se vio la mejora que suponía recuperar la energía de la salmuera en vez de tirarla. Por otra parte, las plantas aumentaban de tamaño y en términos absolutos la energía que se tiraba era muy importante. La primera idea para recuperar la energía fue instalar una bomba invertida movida por la presión y el caudal de salmuera. Este sistema de recuperación de la energía era poco flexible con las variaciones en la operación de la planta; a lo largo del año las membranas se ensucian, con lo que la presión de salida de la salmuera varía. Así mismo con las variaciones de temperatura la presión de alimentación había que cambiarla y, en consecuencia, variaba la presión de salida de la salmuera. Al ser el sistema recuperador una bomba invertida, su funcionamiento venía definido por la curva caudal/altura, pero al variar la presión de entrada debería variar el caudal siguiendo la curva; como esto no era posible, pues tendríamos producciones variables, había que tener un pequeño *by-pass* con una válvula reductora de presión por donde desviar el caudal que, en determinadas situaciones, la bomba no podía evacuar. En resumen, se traducía en ineficiencias del sistema.

La introducción de la turbina Pelton como sistema de recuperación de la energía de la salmuera solucionó gran parte de estas ineficiencias, ya que tenían un mayor rendimiento en la recuperación, 88% frente al 77% de la bomba invertida y, además, la curva de operación de una turbina Pelton es un área, que admite variaciones en la presión de entrada a la turbina sin que por ello se afecte al rendimiento. Por otra parte, en la turbina Pelton la salmuera se descarga a la atmósfera, es decir, se aprovecha toda la energía de presión que trae. En cambio, las bombas invertidas necesitaban una contrapresión en la descarga, el equivalente al NPSH de las bombas, pues si no, cavitaban; esto suponía perder parte de la energía que traía la salmuera.





Fig. 3. Grupo bomba y turbina de la Planta Lanzarote IV.



Fig. 4. Grupo bomba y turbina de la Planta Antofagasta.

En la actualidad han aparecido unos nuevos sistemas de recuperación de energía, las "Cámaras de Intercambio de Presión". Para que se entienda de manera sencilla cómo funcionan estos equipos, se puede decir que al igual que los cambiadores de calor intercambian el calor entre dos corrientes, en las cámaras de intercambio de presión lo que se intercambia es la presión entre dos corrientes de agua; por una parte entra la salmuera a alta presión, por otra entra el agua de mar a baja presión, se intercambian las presiones y sale la salmuera a baja presión y el agua de mar a alta pre-

sión. La forma de intercambiar la presión es poniendo en contacto ambas corrientes, de esta forma la salmuera presuriza el agua de mar entrante. Investigando sobre sistemas de este tipo se lleva muchos años, pero es ahora cuando han aparecido equipos comercialmente válidos para aplicaciones reales en plantas de desalación. Los tipos de Cámaras de Intercambio de Presión (CIP) que existen en el mercado se pueden agrupar en dos grupos: de desplazamiento y de rotación. Vamos a dar una breve explicación de cómo funciona cada uno de estos tipos de CIP.

Las cámaras de tipo de desplazamiento funcionan como un motor de dos tiempos. Si nos fijamos en la figura 5, en el paso 1, es el instante en que la salmuera de alta presión está entrando en la cámara y presurizando el agua de mar que previamente la había llenado; a la vez que la presuriza la desplaza hacia el proceso. En el paso 2, la salmuera que ha llenado la cámara desplazando y presurizando el agua de mar en el paso 1, es desplazada de la cámara y enviada al exterior por el agua de mar que entra a baja presión llenando la cámara. Después se inicia de nuevo el proceso en el paso 1. Por este motivo, en general los sistemas de CIP basados en el desplazamiento tienen dos cámaras en paralelo, cada una realizando uno de los pasos antes explicados. Es lo que conforma una unidad de Cámaras de Intercambio de Presión. En las plantas grandes encontraremos varias de estas unidades trabajando en paralelo.

Algunos fabricantes realizan el contacto entre agua de mar y salmuera directamente, ya que, gracias a la diferencia de salinidad entre ellas, tienen diferencia de densidades y de viscosidad, lo que permite realizar esta operación de esta forma. Otros fabricantes prefieren situar un pistón separador entre ambos fluidos que realiza un cierre hermético. Finalmente, otros sitúan un pistón flotante entre ambos fluidos que, sin realizar un cierre hermético, los mantiene cuasi-separados. Otro aspecto que diferencia a unos fabricantes de otros es el sistema elegido para dar paso y salida a cada fluido de las cámaras. Después veremos los detalles de cada uno.

Las cámaras del tipo de rotación se basan en el mismo principio que las anteriores, poner en contacto ambas corrientes. Lo que las diferencia es que en el caso anterior las partes móviles del equipo son los elementos, válvulas generalmente, que dan paso a una corriente u otra. En este caso el elemento que da paso no existe y lo que se mueve es la propia cámara. Para entenderlo fijémonos en la figura 6; en ella hay una salmuera entrante, flecha marrón de la derecha, que presuriza el agua de mar que se encuentra en la pequeña cámara de la zona superior del dibujo, que sale por el otro extremo presurizada. En la parte inferior del dibujo vemos una corriente de agua de mar entrando que desplaza a la salmuera existente en el interior de la mini-cámara. Ahora hagamos rotar esta parte central de la figura, no los cabezales por donde entran y salen las corrientes, tal y como indican las flechas de giro del dibujo. Las mini-cámaras se situarán frente a la corriente de salmuera entrante a presión, permitiendo la salida del agua de mar a presión, y en otro momento se situarán frente a la entrada de agua de mar a baja presión, que llena la mini-cámara y desplaza la salmuera sin presión al exterior. En definitiva, tenemos la mitad de las mini-cámaras haciendo las funciones del paso 1 y la otra mitad haciendo las funciones del paso 2. En la parte inferior de la figura vemos una sección del tambor que gira; tiene el aspecto del tambor de un revólver; en él están las mini-cámaras donde tiene lugar el proceso. El giro lo lleva a cabo la propia agua, no tiene necesidad de motor, y la velocidad de giro es en torno a 1.500 rpm. En este sistema el contacto entre los fluidos es directo, no existiendo ninguna separación física, ni pistón entre ambas corrientes.

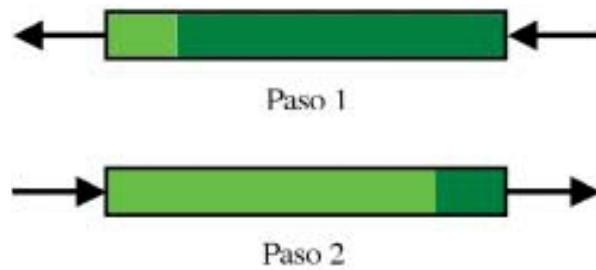


Fig. 5. Funcionamiento de las cámaras de tipo desplazamiento. Fuente: el autor.

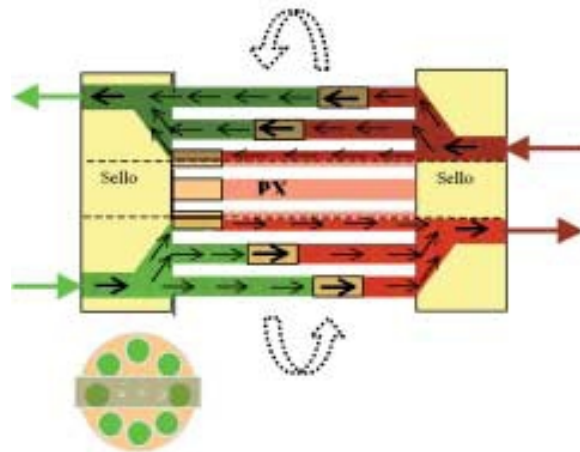


Fig. 6. Funcionamiento de las cámaras de tipo rotación. Cortesía de ERI.

El rendimiento de recuperadores por Cámaras de Intercambio de Presión (CIP), tanto de desplazamiento como rotativo, es muy alto, en torno al 96%. No obstante, el rendimiento global para la planta desaladora es inferior, como después se explicará.

Aspectos comunes a las cámaras de intercambio de presión

Como se puede deducir, al tener las cámaras un volumen determinado y ser el mismo para llenarlas de salmuera que de agua de mar, y como la frecuencia de los ciclos es, lógicamente, la misma para ambas corrientes, el caudal de agua de mar presurizada tiene que ser sensiblemente igual al de salmuera de alta presión. Por otra parte, la presión de salida de la salmuera es inferior a la de entrada del agua de mar a membranas, como ya hemos comentado. La presión de la salmuera entrando a las cámaras es aún menor que la de salida de las membranas, ya que hay que restarle las pérdidas de carga en tuberías y válvulas hasta llegar a las cámaras. Como además las cámaras tienen un rendimiento en la transmisión de presión al agua de mar, cuando ésta sale presurizada de las cámaras, requiere un incremento de presión para alcanzar la de entrada a las membranas. Es necesaria, por tanto, la instalación de una bomba *booster*, entre la salida de las cámaras y la entrada a las membranas, que le proporcione dicho incremento.



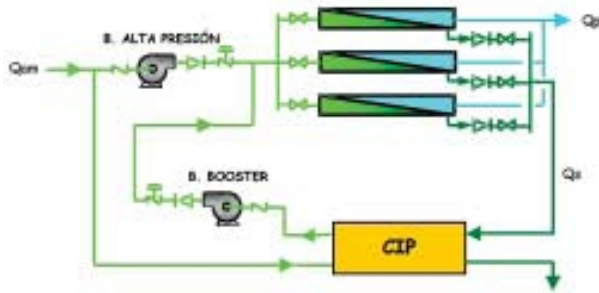


Fig. 7. Ciclo tipo con recuperadores CIP. Fuente: el autor.

El ciclo de corrientes, con este tipo de recuperadores, es un poco diferente a lo que han sido hasta ahora en las plantas de desalación por ósmosis inversa. En la figura 7 tenemos un ciclo tipo con recuperadores CIP. De acuerdo a lo que hemos razonado anteriormente, el caudal de la bomba *booster* debe ser muy parecido al caudal de salmuera, Q_s , y el caudal de la bomba de alta presión debe ser muy parecido al caudal de producto de la planta, Q_p . Como es lógico, el caudal de agua de mar Q_{am} será la suma de ambos caudales. Este ciclo es común a cualquier tipo de Cámara de Intercambio de Presión.

Cuando se analiza con más detenimiento el funcionamiento de las CIP, encontramos varios aspectos que modifican de forma importante el comportamiento ideal hasta ahora expuesto. Así, tenemos que el contacto entre las corrientes de agua de mar y salmuera no se salda sin consecuencias y, como resultado, el agua de mar incrementa su salinidad, lo que implica que, para que la producción sea la misma, es necesario introducir el agua de mar en las membranas con más presión. También se dan pérdidas de caudales que hacen que el rendimiento global de la planta sea inferior al teórico. Todos estos conceptos son los que enumeramos a continuación y cuyo valor máximo hay que pedir al fabricante del equipo que garantice con su oferta.

- **Mezcla (*Mixing*):** Es la medida de la contaminación del agua de mar por la salmuera, y se define como un cociente cuyo numerador es la diferencia de salinidad del agua de mar a la salida de las cámaras menos la salinidad del agua de mar y cuyo denominador es la diferencia de salinidad de la salmuera a la salida de las cámaras menos la salinidad del agua de mar. Expresado como tanto por ciento.
- **Agua de barrido (*Overflush*):** Es un caudal de agua de mar que se pierde con la salida de la salmuera, y está motivado por varias razones: necesidad de lubricar el giro del rotor, lavar la cámara de la salmuera que queda para reducir el valor anterior de mezcla, pérdidas de los cierres de válvulas, etc. Este caudal se mide en tanto por ciento y se define como el cociente entre el agua de mar entrando en las cámaras dividido entre el caudal de agua de mar saliendo de las cámaras y restando uno a dicho cociente.
- **Pérdidas de salmuera (*Leak*):** Es un caudal de salmuera que se pierde antes de realizar el trabajo, de forma que representa finalmente una pérdida de rendimiento. Esta pérdida es debida a fugas que se producen de salmuera desde el lado de alta presión al de baja presión directamente. Se



Fig. 8. Recuperador de energía ERI. Planta de Mazarrón.

mide en valores absolutos de caudal y es igual al caudal de salmuera entrando a las cámaras menos el caudal de salmuera saliendo de las cámaras.

- **Presión mínima de entrada del agua de mar a las cámaras.** Es un valor absoluto y que el fabricante de las cámaras impone para que pueda entrar el agua de mar, y es consecuencia de las pérdidas de carga en los sistemas de entrada, en el llenado de las cámaras, etc.
- **Presión mínima de salida de salmuera de las cámaras.** Es un valor absoluto y que el fabricante de las cámaras impone para que pueda salir la salmuera, y es consecuencia de las pérdidas de carga en los sistemas de salida, en el vaciado de las cámaras, etc. Hay cámaras que cavitan si el valor es inferior al especificado.

Todos los parámetros anteriores tienen como consecuencia una reducción del rendimiento de las cámaras. Por tanto, hay que redefinir qué se entiende por rendimiento de una Cámara de Intercambio de Presión; esta definición es la siguiente:

- **Rendimiento (*Efficiency*):** Se define por un cociente cuyo numerador es la energía recuperada útil para nosotros, que es el producto del caudal de agua de mar saliendo de las cámaras por la presión de ese agua de mar a la salida de las cámaras, y cuyo denominador es la energía que le hemos entregado a las cámaras para hacer su trabajo, que es la suma del caudal de agua de mar entrando a las cámaras por su presión de entrada, más el caudal de salmuera entrando a las cámaras por su presión de entrada.

El Rendimiento, definido de esta forma, tiene en cuenta todos los factores arriba mencionados excepto uno, la Mezcla, ya que este valor solo puede ser cuantificado conociendo cuánto incrementa la presión a la entrada de membranas por culpa de este efecto. Este cálculo es más complejo y dependiente del diseño global de la instalación. Otro efecto colateral no contemplado es el incremento de la potencia de las bombas de agua de mar para dar el caudal extra pedido por las cámaras, debido al agua de barrido.

A pesar de todo lo mencionado sobre las CIP, son los equipos que más rendimiento tienen globalmente, recuperando la energía en las plantas de ósmosis inversa, llegando a los valores indicados en la figura 2. Al mencionar todos estos conceptos el objetivo es hacer ver la complejidad de factores que intervienen, que el cálculo final del consumo específico tiene que ser adecuadamente realizado y que, en las ofertas de las CIP, hay que obtener garantías sobre los parámetros indicados.

Tipos comerciales de Cámaras de Intercambio de Presión

Vamos a enumerar las Cámaras de Intercambio de Presión que, hasta el momento, se pueden encontrar en el mercado español, sabiendo que, como todo producto nuevo, puede sufrir cambios importantes en muy poco tiempo y que puede haber otros equipos similares cuyo conocimiento no tengamos.

Entre los equipos basados en el desplazamiento con elementos móviles que dan paso al agua de mar y a la salmuera, se encuentran los siguientes:

- Aqualyng. Es un equipo de tecnología noruega implantado en Canarias. Utiliza cámaras verticales y un sistema de válvulas cuya apertura y cierre controla la entrada y salida de las corrientes. Hay equipos instalados en Canarias.
- Dweer. Es un equipo desarrollado por la empresa Desalco. Posteriormente ha sido vendida la licencia a la empresa suiza Calder, fabricante también de turbinas Pelton. Este sistema utiliza dos cámaras horizontales con una válvula de corredera patentada, cuyo nombre es LinX, para la admisión y descarga de la salmuera, y válvulas de retención para la entrada y salida del agua de mar. Tiene diversas instalaciones en la zona del Caribe y actualmente se está instalando en la planta de Ashkelon, en Israel, de 160.000 m³/día.
- RO Kinetics. Es un equipo desarrollado por el ingeniero canario Miguel Barreto. Utiliza dos cámaras en forma de bucle y una válvula tipo corredera. Hay varios equipos instalados en Canarias y Cabo Verde.
- Siemag. Es un equipo adaptado desde la industria minera. Utiliza tres cámaras y un juego de válvulas todo-nada. Fue uno de los primeros equipos en instalarse, concretamente en la planta de Inalsa-I, de Lanzarote. Parece que han dejado de fabricarlo.

El único equipo rotativo comercializado es:

- ERI, de la empresa americana Energy Recovery Inc. No tiene válvulas para dar entrada y salida a los fluidos, pero sí un rotor que gira a 1.500 rpm. Tiene diversas referencias en España, en Chipre y en países del Golfo.

Entre las Cámaras de Intercambio de Presión del tipo de desplazamiento que están en fase de desarrollo, pero aún no se han comercializado, se encuentran las de:

- KSB. Este fabricante de bombas está desarrollando un sistema de dos cámaras, parecido al de Dweer, pero con una válvula rotativa en vez de corredera.
- Osmopompe, de la empresa francesa Octave. Está en fase de prototipo.

¿Cuál es el consumo futuro?

Una de las preguntas que más se hace en los foros de debate de la desalación es: ¿hasta dónde puede llegar la reducción en el consumo energético?

A la vista de la figura 2, podemos observar que la reducción ha sido muy importante, por lo que es difícil que ese ritmo pueda seguir, ya que llegaríamos al absurdo de consumo cero.

Si disolvemos en un metro cúbico de agua pura 38 kilos de sales del mismo tipo que las que tiene el mar, se desprende una cantidad de calor de 670,8 kcal, que equivalen a 0,78 kWh. Si el proceso fuese reversible, la termodinámica nos dice que esa sería la mínima energía que deberíamos aportar al sistema para separar de nuevo las sales del agua.

Parece evidente la no reversibilidad del proceso; en consecuencia, si consideramos un factor de tres entre el proceso reversible y el práctico ideal, tendremos un consumo específico de 2,34 kWh/m³ para el proceso de ósmosis inversa, por lo menos.

Si además consideramos los otros consumos necesarios para el total funcionamiento de la planta, como son: el bombeo de captación del agua de mar hasta la cota de la planta, considerando que el agua producida se deja a nivel del mar, los consumos por tratamientos químicos, por lavado de membranas, por lavado de filtros, por pérdidas de carga, etc., el valor real, considerando la totalidad de estos consumos, que puede alcanzarse en las plantas desaladoras en los próximos diez años es el de 2,7 a 2,9 kWh/m³.

Esto, lógicamente, sin cambio de proceso. Si se descubre y desarrolla un proceso más eficaz, puede ocurrir lo mismo que pasó con la aparición de la ósmosis inversa frente a los sistemas de destilación. Pero en cualquier caso, por muy eficaz que sea el proceso, siempre estará muy por encima del teórico termodinámico antes mencionado. □

Francisco Martín Morales* y Juan María Sánchez Sánchez**

*Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
Administrador Único de Consulnima S.L.

**Ingeniero Industrial
Experto en Desalación

Referencias bibliográficas

- Wangnick Consulting, "2000 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory. Report N° 16". May-2000.
- Walter Wesson Lora, "Los intercambiadores PX de ERI: el sistema de cámaras isobáricas de recuperación de energía más fiable y extendido en el mundo". Jornadas nacionales sobre desalación. Desalación '04. Madrid, 17 y 18 de noviembre de 2004.
- Juan María Sánchez Sánchez, "Consumo de energía en los procesos de desalación del agua de mar". I Congreso Nacional de AEDyR. Murcia, 28 y 29 de noviembre 2000.

