

El consumo de energía en la desalación de agua de mar por ósmosis inversa: situación actual y perspectivas

ANTONIO ESTEVAN (*) y MANUEL GARCÍA SÁNCHEZ-COLOMER (**)

RESUMEN En este artículo se realiza un cálculo del consumo específico generado durante el proceso de ósmosis inversa en una planta desaladora de agua de mar, en dos diferentes escenarios de recuperación de energía, mediante turbinas Pelton y mediante las denominadas cámaras isobáricas. Se definen el consumo físico ideal y el consumo mínimo industrial y se comparan con los consumos registrados en funcionamiento real en cuatro plantas desaladoras de agua de mar instaladas en España. Finalmente se examinan los márgenes para reducir los consumos energéticos en este proceso y las tendencias actuales en materia de eficiencia energética en el sector.

Con una presión de trabajo de 70 atm y un índice de conversión del 45%, el consumo físico ideal alcanza 1,97 kWh/m³. En un contexto de la mejor tecnología actualmente disponible, con ensamblaje y operación ideales, el consumo mínimo industrial aplicando turbinas Pelton es de 2,74 kWh/m³, mientras que con cámaras isobáricas baja hasta 2,51 kWh/m³. Los consumos óptimos calculados para plantas con turbinas Pelton con ensamblaje y operación reales se sitúan en una horquilla de 2,9 a 3,1 kWh/m³.

A la luz del análisis realizado se concluye que los márgenes disponibles para disminuir los consumos energéticos son ya bastante reducidos, dado que las principales plantas españolas superan los consumos óptimos calculados en la fase de ósmosis en un margen que varía entre un 9% y un 14%.

A corto plazo se contempla la posibilidad de la utilización generalizada de cámaras isobáricas en lugar de turbinas Pelton, junto con una pequeña reducción de la presión de trabajo, y ciertos perfeccionamientos en la arquitectura de las plantas desaladoras.

ENERGY CONSUMPTION IN REVERSE OSMOSIS SEAWATER DESALINATION: CURRENT SITUATION AND PERSPECTIVES

ABSTRACT *This article shows a calculation of the specific consumption generated during the process of reverse osmosis in a seawater desalination plant, by two different systems of energy recovery: Pelton turbines and isobaric chambers. Ideal physical consumption and minimal industrial consumption are defined, and compared with the real consumptions registered in four seawater desalination plants in Spain. Finally, the margins to reduce the energy consumptions in this process and the current tendencies in framework of technological progress are examined.*

With a work pressure of 70 atm and a conversion index of 45 %, the ideal physical consumption reaches 1,97 kWh / m³. In a context of the best available technology, with ideal assembly and operation, the minimal industrial consumption applying Pelton turbines is 2,74 kWh / m³, whereas with isobaric chambers goes down up to 2,51 kWh / m³. The ideal consumptions calculated for plants with Pelton turbines in real assembly and operation change between 2,9 and 3,1 kWh / m³.

This analysis concludes that the available margins to reduce the energy consumptions are already quite limited, because the principal Spanish desalination plants rise above optimal consumptions calculated in the reverse osmosis phase in a margin changing between a 9% and 14%.

In the short term the possibility of the widespread use of isobaric chambers instead of Pelton turbines is considered, together with a small reduction of the work pressure, and some improving in the architecture of the desalination plants.

Palabras clave: Consumo específico, Ósmosis inversa, Desalación.

1. INTRODUCCIÓN

La desalación de agua de mar tiene por objeto producir agua apta para cualquier uso a partir de agua marina. El agua de mar se caracteriza por su elevado contenido de sales en diso-

lución, las cuales deben ser eliminadas en su práctica totalidad. Según las leyes físicas que rigen el comportamiento de las disoluciones, esta separación requiere una considerable aplicación de energía.

El presente artículo pretende sintetizar las bases físicas del consumo energético en la desalación de agua de mar por ósmosis inversa, examinar el consumo actual de energía de la industria española del sector, y analizar las perspectivas de reducción de consumo que puede ofrecer el desarrollo tecnológico en los próximos años.

(*) Grupo de Estudios y Alternativas 21, S.L. (GEA21).

(**) Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX.

2. LA PRESIÓN OSMÓTICA DE LAS DISOLUCIONES

Si dos disoluciones acuosas de diferente concentración se encuentran separadas por una membrana semipermeable aparece un diferencial de presión entre los dos lados de la membrana. Cuando lo que se coloca a un lado de la membrana es agua pura y al otro una disolución cualquiera, la diferencia de presión que se registra entre ambos lados de la membrana recibe el nombre de "presión osmótica" de esa disolución.

Por efecto de la presión osmótica, un cierto flujo de agua atravesará espontáneamente la membrana desde el lado del agua pura hacia el lado de la disolución, tendiendo a rebajar la concentración de esta última. Este es el fenómeno que se conoce como "ósmosis natural". Sin embargo, si se aplica artificialmente cierta presión al lado de la disolución, se observa que el flujo de agua hacia ésta se reduce. Si se aumenta progresivamente la presión hasta alcanzar la presión osmótica de la disolución, el flujo se detiene por completo.

Si se continúa aumentando la presión el flujo se invierte, y comienza a pasar agua desde la disolución hacia el lado del agua pura. A este fenómeno se le denomina "ósmosis inversa", porque en él se invierte el flujo natural de los solutos a través de una membrana semipermeable. Mientras que por el proceso de ósmosis natural –sin presurización artificial–, el flujo de agua tendería a igualar las concentraciones de soluto a ambos lados de la membrana, en la ósmosis inversa tiende a diferenciarlas, generando en un lado agua libre de sales (para membranas ideales), y en el otro disolución crecientemente concentrada.

La presión osmótica de una disolución se puede calcular por la ley de van't Hoff:

$$P_o = i \cdot M \cdot R \cdot T \quad [1]$$

donde :

P_o es la presión osmótica que se pretende calcular, expresada en atmósferas.

i es el "factor de van't Hoff" y expresa el grado de disociación del soluto.

M es la concentración molar de la disolución, expresada en moles/litro.

R es la constante de los gases, igual a 0,082 atmósferas x litro / Mol / °K.

T es la temperatura en grados Kelvin.

Para un agua de mar con una salinidad de 35.000 ppm a 25°C, el valor del factor de van't Hoff es de 1,82 (Petrucci *et al.* 2002). Teniendo en cuenta que la densidad de un agua de mar con 35.000 ppm de salinidad¹ a 25°C es de 1,0233 kg/litro, y que el peso molecular del cloruro sódico es 58,44 la concentración molar de esa agua de mar será:

$$M = 35 \text{ gr sal / kg agua} \cdot 1,0233 \text{ kg agua / litro} / 58,44 \text{ gr sal / mol} = 0,613 \text{ moles / litro}$$

En consecuencia, la presión osmótica del agua de mar con 35.000 ppm a 25 grados centígrados es de:

$$1,82 \cdot 0,613 \text{ mol/l} \cdot 0,082 \text{ atm} \cdot \text{l/mol} / \text{°K} \cdot 298,15 \text{ °K} = 27,31 \text{ atmósferas}$$

¹ En el ámbito de la oceanografía científica se utiliza como medida estándar la Unidad de Salinidad Práctica, que fue definida en 1978 por un grupo de trabajo internacional de la Scientific Commission for Oceanic Research (SCOR), el cual estableció que una muestra de agua de mar de 35.000 USP (unidades de salinidad práctica) es aquella que a la presión de 1 atmósfera y 15°C de temperatura tiene la misma conductividad que un patrón que contiene 32,4356 gramos de KCl por kilogramo de disolución.

Aplicando al agua de mar una presión superior a su presión osmótica, se iniciará el proceso de ósmosis inversa, y un caudal de agua pura comenzará a atravesar la membrana. El mantenimiento de esa presión será la única aportación de energía necesaria para obtener un flujo de agua pura en el sistema considerado.

3. EL CONSUMO IDEAL DE ENERGÍA EN LA ÓSMOSIS INVERSA

Si en un dispositivo ideal de ósmosis inversa se presuriza una disolución salina a una cierta presión P igual o superior a su presión osmótica, y se la pone en contacto a través de una membrana semipermeable con una masa de agua pura a la presión atmosférica, al cabo de cierto tiempo de funcionamiento, por el solo efecto de la presión aplicada, un volumen de agua V procedente de la disolución habrá atravesado la membrana y se encontrará en el lado del agua pura.

La energía necesaria para presurizar un volumen V de cualquier fluido incompresible a la presión P equivale al producto de la presión por el volumen:

$$W = P \cdot V \quad [2]$$

Puesto que la presión en el lado del agua pura es nula, esta será la energía consumida por el volumen de agua V al atravesar la membrana impulsado por la presión P .

Si el volumen osmotizado es 1 m³, el consumo de energía será:

$$W = P \text{ atm} \cdot 1 \text{ m}^3 = P \text{ atm} \cdot \text{m}^3 \cdot 0,02815 \text{ kWh / atm} \cdot \text{m}^3 = 0,02815 \cdot P \text{ kWh} \quad [3]$$

Esta expresión es generalizable a cualquier proceso de ósmosis inversa desarrollado en condiciones ideales: la energía consumida por 1 m³ de agua al atravesar una membrana de ósmosis inversa, expresada en kWh/m³, equivale a la presión de trabajo P expresada en atmósferas, multiplicada por el factor de conversión de la unidad de energía atmósferas*m³ a la unidad kWh que es 0,02815.

4. ENERGÍA MÍNIMA IDEAL DE DESALACIÓN

Dado que la presión osmótica P_o de una disolución es aquella a la que se pone en marcha el proceso de ósmosis inversa, la energía mínima necesaria para extraer 1 m³ de agua pura a partir de una disolución mediante un dispositivo ideal de ósmosis inversa será, según [3]:

$$W_{min} = 0,02815 \cdot P_o \text{ kWh}$$

Para el agua de mar en las condiciones descritas en el apartado anterior, la presión osmótica es de 27,31 atmósferas. Por consiguiente, la mínima energía necesaria para desalar 1 m³ de agua de mar con 35.000 ppm de salinidad a 25°C mediante un dispositivo de ósmosis inversa, en condiciones ideales, es de:

$$W_{min} = 0,02815 \cdot 27,31 = 0,769 \text{ kWh}$$

Esta sería la energía mínima necesaria para extraer agua pura de un agua de mar con 35.000 ppm de salinidad a 25°C. Conviene señalar que las condiciones ideales incluyen la necesidad de que el volumen de agua marina presurizado sea suficiente para que su presión osmótica no se vea alterada por la extracción de agua pura.

Cabe preguntarse si es posible desalar agua de mar por otros procedimientos, sean cuales sean, con un consumo de energía inferior al mínimo ideal que se desprende de esta expresión. En la formación de una disolución exotérmica, como la del agua del mar, se desprende energía en forma de calor. Si el proceso fuera totalmente reversible, idealmente sería posi-

ble separar los componentes de la disolución devolviendo al sistema esa misma energía. Para la disolución de electrolitos en agua la energía de disolución responde a la siguiente expresión (El-Sayed & Silver 1980, cit. por Valero, A. *et al.* 2001):

$$W_{min} = R \cdot T \cdot \ln a_w$$

en donde a_w es la actividad de los electrolitos que componen la disolución salina, y W_{min} viene expresada en kcal/mol. Para un agua marina con 35.000 ppm de salinidad a 25° la expresión anterior arroja un valor de 0,88 kWh/m³ de energía de disolución (Valero, A. *et al.* 2001). Esta sería la energía que, en un proceso termodinámico totalmente reversible, sería necesaria para separar agua del mar en agua pura, por un lado, y sal marina seca y cristalizada, por otro. Nótese la diferencia con el dispositivo ideal de ósmosis inversa arriba descrito, que extrae agua pura a partir de una disolución de volumen virtualmente infinito, para que su presión osmótica no se vea modificada por la pérdida de una cierta cantidad de agua pura.

5. LAS PRESIONES DE TRABAJO EN SISTEMAS INDUSTRIALES

Aplicando una presión de 27,31 atmósferas a un agua marina de 35.000 ppm a 25°C, la “primera gota” de agua pura atravesaría la membrana, pero el flujo de agua sería insignificante, por lo que tal proceso no tendría interés comercial. Para obtener un flujo de agua producto que resulte comercialmente rentable es preciso trabajar a presiones mucho más elevadas. Actualmente las presiones de trabajo en las instalaciones comerciales varían, en la mayor parte de los casos, entre 65 y 70 atmósferas. Según [3], para estas presiones de trabajo, el consumo ideal de energía en el paso por la membrana se sitúa en el rango de 1,83 a 1,97 kWh/m³.

En un proceso industrial se define como *presión neta* a la diferencia entre el *diferencial de presiones aplicadas* a un lado y otro de la membrana, y el *diferencial de presiones osmóticas* del agua de mar y el permeado. El flujo de agua, o caudal por unidad de tiempo y de superficie de membrana, es proporcional a la presión neta:

$$F_A = K_A * P_N = K_A * [(P_T - P_S) - (P_{OA} - P_{OP})] \quad [4]$$

El diferencial de presiones aplicadas es la diferencia entre la presión con la que llega el agua de aporte a la entrada de la membrana, que se denomina “presión de trabajo” (P_T), y la presión residual o presión de salida del agua producto al otro lado de la membrana (P_S). La presión de salida es muy baja en comparación con la de entrada, pero en los procesos industriales suele tener un valor no despreciable, de entre una y dos atmósferas. El diferencial de presiones osmóticas viene dado por la diferencia entre la presión osmótica del agua de aporte (P_{OA}) y la presión osmótica del agua producto (P_{OP}), que es en general muy baja, aunque también significativa. Por ejemplo, un permeado típico con 350 ppm de salinidad a 25°C tiene una presión osmótica de 0,3 atmósferas.

La relación entre el flujo de agua por unidad de superficie (F_A) y la presión neta de trabajo es el denominado “coeficiente de transporte de agua” de la membrana (K_A), y es una de sus características más importantes, pues determina su capacidad de producción de permeado.

La salinidad del agua de aporte tiene una influencia apreciable en el consumo energético de las plantas de desalación. Una mayor salinidad del agua de aporte supone una mayor presión osmótica P_{OA} , y por tanto requiere una presión de trabajo P_T superior en la misma proporción para alcanzar un flujo similar.

En las plantas desaladoras, las membranas están colocadas en serie dentro de un tubo de presión, en el que se ubican nor-

malmente, en las grandes plantas, entre seis y siete membranas, aunque este número puede variar en función del diseño de la planta. El agua de mar entra en la primera membrana a la presión de trabajo e inmediatamente comienza a ceder agua pura al permeado a través de la membrana. Al sobrepasar la primera membrana el agua de aporte habrá aumentado su salinidad porque habrá perdido cierta cantidad de agua pura, y habrá perdido algo de presión por efecto del rozamiento del agua con las paredes de la membrana y del tubo.

Así, al entrar en la siguiente membrana, la corriente de agua de aporte tendrá mayor salinidad y por tanto mayor presión osmótica, y habrá perdido algo de presión de trabajo. Ambos factores contribuyen a reducir la presión neta, por lo que el rendimiento de la segunda membrana será inferior al de la primera, esto es, producirá menos agua por unidad de superficie. Por las mismas razones, la tercera membrana producirá menos que la segunda, etc.

Para que la última membrana pueda funcionar con un rendimiento que justifique su coste tiene que contar con una presión neta significativa, del orden de 10 atmósferas. Por ejemplo, trabajando con un rendimiento del 45% con agua del Mediterráneo, la salinidad del agua al salir de la última membrana sería de unos 70.000 ppm, y su presión osmótica de unas 54 atmósferas. Para obtener flujos de permeado rentables en la última membrana habría que trabajar a presiones del orden de 64 atmósferas o superiores.

El desarrollo tecnológico de las membranas de ósmosis se viene orientando en los últimos años al incremento del coeficiente de transporte, esto es, a lograr mayor producción de permeado con la misma presión, o a mantener la producción con una menor presión de trabajo. En los próximos años, si se consolida, como parece probable, la tendencia alcista de los precios de la energía, ello supondrá un incentivo adicional para el diseño de membranas con menores presiones de trabajo.

Existen otros aspectos que influyen en el consumo de energía en las plantas de desalación, como la temperatura del agua de aporte o ciertos problemas de operación de las plantas (polarización, compactación de membranas, ensuciamiento, etc.), cuya consideración escapa del alcance del presente artículo.

6. LOS RENDIMIENTOS ENERGÉTICOS EN LOS PROCESOS DE DESALACIÓN INDUSTRIAL

Desde el punto de vista energético, el proceso estricto de la ósmosis inversa, dejando aparte la captación de agua de mar y los pretratamientos, presenta las siguientes etapas:

- A. Accionamiento de las bombas de alta presión por los motores eléctricos.
- B. Presurización del agua en las bombas de alta presión.
- C. Pérdidas por rozamiento en los circuitos de entrada y en los tubos de presión.
- D. Obtención de permeado y generación de un porcentaje de salmuera presurizada.
- E. Recuperación de la energía de la salmuera mediante dispositivos recuperadores:
 - E.1. Turbinas Pelton.
 - E.2. Cámaras isobáricas.
- F. Salida del producto y las salmueras con cierta energía residual.

En cada una de estas fases se obtiene un cierto rendimiento de proceso inferior a la unidad, con lo que se generan ciertas pérdidas de energía, que son acumulativas:

Accionamiento de las bombas de alta presión por los motores eléctricos.

Los motores eléctricos presentan rendimientos de hasta un 96%.

EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Presurización del agua por las bombas de alta presión

Las bombas de alta presión pueden alcanzar rendimientos de hasta el 88%.

Pérdidas por rozamiento en los circuitos y en los tubos de presión.

Se puede aceptar una pérdida del 2,5% de la energía suministrada por la bomba de alta presión, o lo que es lo mismo, un rendimiento del 97,5% en esa etapa del proceso.

Índice de conversión y generación de salmuera

Con las membranas estándar actuales se suele operar con índices de conversión del 45% y presiones de trabajo en torno a 70 atmósferas.

Recuperación de la energía de las salmueras

a) Turbinas Pelton: el rendimiento de una turbina Pelton puede llegar al 90% y el de las bombas de alta presión al 88%. Por consiguiente, la recuperación óptima es el producto de ambos porcentajes, esto es, el 79,2% de la energía de las salmueras.

b) Cámaras isobáricas: aunque varía según los equipos, se puede adoptar un rendimiento del 95% (Martín & Sánchez 2005). Las cámaras isobáricas entregan directamente la energía al agua de mar a presurizar, por lo que no hay pérdidas adicionales.

Energías residuales

Para el agua producto, se puede tomar como valor típico una presión de salida de 1 atm, y para las salmueras, la contrapresión de salida es nula en las turbinas Pelton y del orden de 1 atmósfera en las cámaras isobáricas. Las presiones residuales se transforman en rendimientos energéticos de la fase final de salida calculando el porcentaje que representan sobre las presiones de la etapa inmediatamente anterior.

7. RENDIMIENTOS Y CONSUMOS ÓPTIMOS EN INSTALACIONES INDUSTRIALES

Los rendimientos de cada una de las fases de un proceso industrial de ósmosis inversa actúan en cascada, como en cualquier proceso físico. El rendimiento global de la instalación r_G es el producto de los rendimientos de cada etapa. Aplicando este factor a la expresión [3] que proporciona el consumo unitario ideal en función de la presión de trabajo se obtiene el consumo específico de energía de una planta industrial en la fase de ósmosis:

$$We = 0,02815 * P_T / r_G \quad [5]$$

Para hallar el rendimiento global máximo alcanzable en la ósmosis industrial se ha supuesto una instalación imaginaria en la que todos los componentes incorporan la mejor tecnología disponible, todos los equipos ofrecen los rendimientos máximos, y todo el ensamblaje y la operación de la planta funcionan en términos óptimos. Se ha supuesto una presión de 70 atmósferas y un índice de conversión del 45%, por ser estos parámetros los más habituales en la industria.

En la Tabla 1 se calculan los rendimientos en cascada: si desde la red eléctrica entran 100 unidades de energía, un 4% se disipará en el motor eléctrico, transmitiéndose a la bomba 96 unidades. Ésta aprovechará el 88% por ciento de las 96 unidades que le llegan, lo que representa 84,5 unidades, etc...

Los rozamientos en los circuitos hidráulicos, válvulas de control, tubos de presión y membranas disiparán del orden de un 2,5% de las 84,5 unidades aportadas por la bomba, de modo que quedarán disponibles para la ósmosis inversa 82,4 unidades de energía, asociadas al agua de mar puesta en la superficie de las membranas, lista para la ósmosis. Un 45%

por ciento de esta energía (37,1 unidades) es aplicada al agua que se desala, mientras que el 55% restante (45,3 unidades) permanece en las salmueras y pasa al circuito secundario o de recuperación.

La turbina Pelton recupera hasta el 90% de esta energía (40,8 unidades) y la entrega a la bomba de alta presión, la cual transmite efectivamente al agua de mar hasta un 88% de la energía entregada (35,9 unidades). Por último hay una pérdida estimada en el 1,4% correspondiente a la energía de salida del agua producto. Globalmente, de las 100 unidades de energía entregadas se habrán aplicado realmente al proceso de ósmosis inversa un total de $(37,1 + 35,9) * 0,986 = 36,5 + 35,4 = 71,9$ unidades.

El mejor rendimiento global al que se puede aspirar recuperando la energía de las salmueras mediante turbinas Pelton con las mejores tecnologías actualmente disponibles es del 71,9%. Con este rendimiento, según la expresión [5], para una presión de trabajo de 70 atmósferas se obtiene un consumo específico de 2,74 kWh/m³. Este consumo podría ser considerado como el "estado del arte" en la industria de la desalación con recuperación mediante turbinas Pelton.

8. LOS CONSUMOS REALES EN LA INDUSTRIA DE LA DESALACIÓN EN ESPAÑA

Para valorar el estado actual de los consumos energéticos en la fase de la ósmosis inversa en la industria española de desalación se ha recabado información directa de cuatro grandes plantas de desalación con recuperación por turbinas Pelton y se ha reconstruido su ciclo de rendimientos, a fin de compararlo con el correspondiente a los consumos ideales. Las plantas seleccionadas han sido las siguientes:

- La EDAM de Bahía de Palma (Mallorca), con una capacidad de 65.000 m³/día. Toma el agua en pozos costeros semiconectados directamente con el mar. La planta se sitúa a unos 3 km del mar.
- La EDAM de la Tordera, en Blanes (Gerona), con una capacidad de 28.800 m³/día, y con toma de agua en pozos costeros situados en el delta del río Tordera.
- La EDAM del Canal de Alicante, con una capacidad de 65.000 m³/día. La planta se ubica junto al mar y toma el agua en pozos costeros situados en las proximidades.
- La planta Lanzarote IV, situada en Arrecife de Lanzarote, con una capacidad de 30.000 m³/día. Toma el agua de pozos costeros ubicados en la misma parcela en la que se ubica la planta.

Los datos utilizados han sido aportados directamente o publicados en la literatura especializada por las entidades gestoras. Los resultados se presentan en la Tabla 2 en un orden aleatorio para mantener la confidencialidad de los datos.

Los cuatro índices de consumo que figuran en la tabla se definen del modo siguiente:

- Consumo físico ideal: consumo del proceso físico ideal de ósmosis a la presión de trabajo de cada planta. Este parámetro sólo depende de la presión de trabajo.
- Consumo industrial óptimo: consumo en una planta industrial ideal, con todos los equipos funcionando en el "estado del arte", con un ensamblaje ideal.
- Consumo industrial calculado: consumo que se obtiene a partir de los rendimientos declarados por cada planta para los principales equipos del sistema.

EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Parámetros de operación			
Presión salida bombas (atm)		70,0	
Presión salida salmuera (atm)		68,3	
Presión residual salida turbina (atm)		0,0	
Presión residual salida producto (atm)		1,0	
Índice de Conversión		45%	

Rendimientos de equipos	
Motor Eléctrico	96%
Bomba Alta Presión	88%
Turbina de Recuperación	90%

Ciclo energético			
Turbinas Pelton	Rendimiento	Circuito Primario	Circuito Recuperación
Entrada de energía de la red		100,0	
Motor eléctrico	96,0%	96,0	
Bomba alta presión	88,0%	84,5	
Pérdidas en circuitos y membranas	97,5%	82,4	
Conversión OI	45,0%	37,1	
Energía residual salmuera			45,3
Turbina recuperación	90,0%		40,8
Presión residual salida turbina	100,0%		40,8
Bomba alta presión	88,0%		35,9
Presión residual salida producto	98,6%	36,5	35,4
TOTAL PROCESO	71,9%	36,5	35,4

Consumo energético con la mejor tecnología disponible (kWh/m ³)			
Presión de trabajo (atm)	Índice de Conversión	Consumo físico ideal	Consumo mínimo industrial
70	45%	1,97	2,74

TABLA 1. Rendimientos teóricos en un proceso industrial de desalación. Recuperación de energía mediante turbinas Pelton.

- Consumo real registrado: consumo total de energía registrado en la fase de ósmosis de cada planta dividido por la producción obtenida.

Para valorar correctamente las diferencias entre las diversas plantas hay que tener en cuenta que existen determinados factores, como el envejecimiento de las membranas o de otros elementos de las instalaciones, la calidad del agua producto o la salinidad del agua de entrada, que influyen sobre el rendimiento. Pese a sus diferencias en estos u otros aspectos, las cuatro plantas examinadas convergen de modo muy apreciable en su consumo energético unitario en el proceso de ósmosis, en un entorno aproximado de 3,25 a 3,50 kWh/m³, que se puede considerar como el estándar actual de la gran industria española de desalación, para la fase de la ósmosis inversa, con recuperación de energía mediante turbinas Pelton. Teniendo en cuenta los múltiples factores que concurren en la explotación real de una planta, los márgenes disponibles para la reducción del consumo de energía con las tecnologías actuales son bastante limitados.

9. NUEVOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA: LAS CÁMARAS ISOBÁRICAS

A principios de la década de 1990, mientras las turbinas Pelton se imponían como el sistema estándar de recuperación de energía en la gran industria de la desalación, comenzó a aparecer una nueva generación de equipos de recuperación inicialmente denominados “sistemas de desplazamiento positivo”, y hoy conocidos genéricamente como “cámaras isobáricas” o “intercambiadores de presión”. Todos se basan en el mismo principio: la salmuera a presión empuja directamente al agua de mar a lo largo de un cilindro, transmitiéndole así la presión que tiene. Este empuje se puede realizar poniendo directamente en contacto a los dos líquidos (pistón líquido), o mediante un elemento separador (pistón sólido). Una vez que el agua de mar ha recibido la presión de la salmuera, se independizan los dos líquidos mediante algún dispositivo de separación, manteniendo confinada el agua de mar a presión y descargando la salmuera al exterior, a presión atmosférica.

EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

	Planta A	Planta B	Planta C	Planta D
PARÁMETROS OPERACIÓN				
Presión de trabajo (Atm)	70,0	67,6	70,0	70,0
Índice de Conversión	45%	45%	45%	45%
RENDIMIENTOS				
Motor eléctrico	95,0%	94,0%	94,0%	94,0%
Bombas alta presión	83,0%	84,0%	83,0%	84,0%
Turbina recuperación	88,0%	90,0%	88,0%	90,0%
Rendimiento global calculado	64,3%	65,1%	63,6%	65,5%
CONSUMOS (kWh/m³)				
Consumo físico ideal	1,97	1,90	1,97	1,97
Consumo industrial óptimo	2,74	2,65	2,74	2,74
Consumo industrial calculado	3,06	2,92	3,10	3,01
Consumo real registrado	3,45	3,26	3,53	3,27
Rendimiento global registrado	57,1%	58,3%	55,8%	60,2%
% Incr. Cons. Registrado/Calculado	13%	11%	14%	9%

TABLA 2. Consumos energéticos en la fase de OI en varias plantas españolas.

A mediados de la presente década, después de haber sido ensayada en numerosas plantas de pequeño y mediano tamaño, esta nueva generación de equipos ha comenzado a introducirse en la gran industria de la desalación.

Para examinar el potencial teórico de reducción de consumo que ofrecen estos equipos se ha aplicado un procedimiento de cálculo de rendimientos globales similar al aplicado anteriormente a las instalaciones con turbinas Pelton.

Cuando se utilizan cámaras isobáricas, además de la energía necesaria para alimentar las bombas de alta presión (las 100 unidades iniciales), hay que aportar una energía complementaria al circuito de recuperación para alimentar una bomba *booster* que regenera la presión del agua del mar presurizada en las cámaras isobáricas hasta equipararla a la presión de trabajo, antes de entregarla a las membranas.

Con esta salvedad, el contenido de la Tabla 3 es conceptualmente similar al de la presentada anteriormente para las turbinas Pelton. Las cámaras isobáricas llegan a aprovechar hasta el 95% de la energía que permanece en las salmueras, pero pierden un 1% para facilitar la evacuación de las salmueras ya despresurizadas. La bomba *booster* sólo aprovecha un 80% de la energía adicional entregada al sistema y las energías de salida del agua producto son las mismas.

Finalmente, de las 101,3 unidades de trabajo aportadas se aplican efectivamente a la ósmosis inversa 79,4 unidades, lo que supone un rendimiento global del 78,4%.

Utilizando cámaras isobáricas el rendimiento global de una instalación industrial ideal puede alcanzar el 78,4%, esto es, un 9% superior al de las turbinas Pelton, que se situaba en el 71,9%. No obstante, como se ha observado en la comparación de plantas en funcionamiento en España, los rendimientos reales de las turbinas Pelton y de las bombas de alta presión suelen ser sensiblemente inferiores a los óptimos nominales, mientras que los de las cámaras isobáricas suelen ser más estables. Por ello, en aplicaciones prácticas la diferencia de rendimiento a favor de las cámaras suele ser mayor que la calculada en términos ideales, alcanzando el entorno del 15%.

10. LOS CONSUMOS DE CAPTACIÓN Y PRETRATAMIENTO

Para poder someter el agua marina al proceso de ósmosis inversa es necesario captarla en el medio natural, transportarla hasta la planta y someterla a un pretratamiento antes de su paso por las membranas.

Los costes energéticos de estas tareas son mucho menores que los del proceso de ósmosis, pero aún así son significativos, especialmente porque las operaciones de captación y pretratamiento afectan a la totalidad del agua de aporte, el 55% de la cual se devuelve al mar en forma de salmuera. La energía de captación y pretratamiento de esta agua desechada repercute sobre el coste energético del agua producto.

Existen básicamente tres tipos de toma de agua marina: tomas abiertas constituidas por una conducción sumergida abierta en su extremo y protegida por alguna rejilla para impedir el paso de organismos marinos u objetos de cierto tamaño; pozos costeros situados normalmente en primera línea del litoral, que captan el agua marina subyacente; y drenes horizontales o galerías perforadas bajo el lecho marino, de longitud variable desde pocos cientos de metros hasta más de 1 kilómetro, por cuyas paredes se infiltra el agua de mar.

En función de las características hidráulicas de la toma, los costes energéticos de la captación pueden variar considerablemente. Las tomas abiertas suelen ser las que menor coste de captación presentan, pues la cota de toma es el mismo nivel del mar. En los pozos marinos, la cota de toma es el nivel dinámico del pozo, que variará con las condiciones de transmisividad del subsuelo y con la configuración y diseño del pozo. En los drenes horizontales las condiciones de captación también dependen de la transmisividad del fondo marino en el que está excavado el dren, así como de la geometría de éste.

Normalmente, las mismas bombas que realizan la captación impulsan el agua hasta la ubicación de la desaladora. En esta etapa la diversidad de consumos también es considerable, en función de la distancia al mar y de la cota en la que se sitúa la instalación. La suma de la captación y la impulsión a planta puede representar una altura manométrica

EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Parámetros de operación			
Presión salida bombas		70,0	
Presión salida salmueras		68,3	
Presión salida booster		70,0	
Presión residual salida cámaras		1,0	
Presión residual salida producto		1,0	
Índice de Conversión		45%	

Rendimientos de equipos	
Motor Eléctrico	96%
Bomba Alta Presión	88%
Booster	80%
Cámaras Isobáricas	95%

Ciclo energético			
Cámaras Isobáricas	Rendimiento	Circuito Primario	Circuito Recuperación
Entrada de energía de la red		100,0	1,3
Motor eléctrico	96,0%	96,0	
Bomba alta presión	88,0%	84,5	
Pérdidas en circuitos y membranas	97,5%	82,4	
Conversión OI	45,0%	37,1	
Energía residual salmuera			45,3
Cámaras isobáricas	95,0%		43,0
Presión residual salida cámaras	98,6%		42,4
Booster	80,0%		43,5
Presión residual salida producto	98,6%	36,5	42,9
TOTAL PROCESO	78,4%	36,5	42,9

Consumo energético con la mejor tecnología disponible (kWh/m ³)			
Presión de trabajo (atm)	Índice de Conversión	Consumo físico ideal	Consumo mínimo industrial
70	45%	1,97	2,51

TABLA 3. Rendimientos teóricos en un proceso industrial de desalación. Recuperación de energía mediante cámaras isobáricas.

de menos de 10 metros, en los casos más favorables, o puede llegar hasta 80 metros o más en los casos más desfavorables. En términos de coste energético, teniendo en cuenta que las bombas de baja presión rara vez alcanzan rendimientos superiores al 75%, y asignando a los motores eléctricos un rendimiento del 95%, el rango de variación del consumo energético en captación e impulsión a planta se puede situar entre 0,03 y 0,30 kWh por m³ de agua de aporte.

Los consumos energéticos en pretratamiento derivan de las operaciones de filtrado, que suelen ser dos: filtro de arena y filtro de cartuchos. La segunda de estas operaciones de filtración es la que requiere normalmente una mayor aportación de presión, mientras que el paso por los filtros de arena se realiza en unos casos a presión en filtros cerrados y en otros por gravedad, a la presión atmosférica. Frecuentemente la misma impulsión desde los pozos encamina el agua de mar hasta los filtros de arena.

La presión necesaria para el paso por los filtros de cartuchos varía entre 3 y 7 atmósferas, en función de las características de la instalación y de la calidad del agua de toma. Se puede tomar como cifra de referencia la de 5 atmósferas sumando los filtros de arena, que precisan muy poca presión, y los de cartuchos. En conjunto, las operaciones de filtración pueden representar un consumo energético de entre 0,15 y 0,20 kWh por m³ de agua de aporte.

En las cuatro plantas utilizadas en el análisis comparativo en el presente artículo, la suma de los consumos de captación y pretratamiento del agua de aporte varía entre 0,22 y 0,34 kWh por m³ de agua de aporte. La repercusión de estos consumos sobre el agua producto oscila entre 0,48 y 0,77 kWh/m³. Todas las plantas estudiadas utilizan tomas en pozos, aunque las características de éstos y sus ubicaciones en relación con sus respectivas plantas son muy diferentes. La

calidad del agua varía también en cada una de las plantas, pero en general es bastante aceptable.

Los costes energéticos de captación y pretratamiento son importantes en la determinación de la presión óptima de trabajo. Aunque reduciendo la presión de trabajo el consumo ideal unitario es menor, para un mismo tipo de membrana la reducción de la presión de trabajo redundaría en una reducción del flujo y por tanto en una reducción del índice de conversión. Ello exige captar y pretratar un mayor volumen de agua marina por unidad de agua producto, lo que representa un consumo energético adicional. Además, un mayor porcentaje de la energía entregada al sistema permanecerá en las salmueras, porque éstas representarían una mayor proporción del agua aportada. Como la recuperación de la energía de las salmueras está afectada por un rendimiento inferior a la unidad, la energía total perdida será mayor.

Hay que tener en cuenta que cualquier reducción de la presión de trabajo genera una reducción de flujo más que proporcional. Según la expresión [4], una reducción de la presión de trabajo de un 10% partiendo, por ejemplo, de 70 atm, puede ocasionar una reducción del flujo, y por tanto del índice de conversión, superior al 20%. Fácilmente se comprueba que en tal hipótesis el volumen adicional de agua que hay que captar y pretratar, más el incremento de las pérdidas en el circuito de salmueras, prácticamente cancelan el ahorro energético obtenido con la reducción de la presión de trabajo. Con la generación de membranas disponible en los momentos actuales, el entorno de presiones de trabajo de 68-70 atm. corresponde al compromiso óptimo de coste tanto energético como económico, y por eso la industria trabaja en ese entorno.

Después de ser obtenida en el proceso de ósmosis inversa, el agua producto debe ser sometida a ciertos post-tratamientos que la reequilibren iónicamente y aseguren su potabilidad. Generalmente esas operaciones no requieren consumos energéticos significativos. Normalmente el agua producto es encaminada hacia los depósitos de almacenamiento en la planta simplemente mediante la presión residual de salida de las membranas, aunque en algunos casos hay que aplicar un bombeo de trasiego cuyo consumo resulta irrelevante.

Por su parte, las salmueras suelen ser vertidas al mar por gravedad, sin consumo energético adicional, aunque en algunos casos son necesarios pequeños bombeos de impulsión, u operaciones de predilución o de difusión forzada, todos los cuales conllevan pequeños costes energéticos. No obstante, estos costes son en general evitables con un adecuado diseño de las instalaciones que permita el vertido directo por gravedad.

En este punto termina el proceso del tratamiento del agua de mar para convertirla en agua utilizable para cualquier uso. La fase siguiente en el ciclo del agua es la de la entrega a los puntos de uso, y en ella no hay ninguna especificidad de los procesos basados en recursos de origen marino en relación con los basados en recursos continentales, ya sean de origen superficial o subterráneo. En consecuencia, los consumos de energía correspondientes a ese transporte no se deben adscribir al proceso de desalación, sino a la distribución en alta del agua desde la instalación de tratamiento hasta el depósito de cabecera de la red de distribución en baja, como en cualquier otro proceso de potabilización.

11. PERSPECTIVAS DE REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Hacia finales de la presente década se espera que las cámaras isobáricas se hayan convertido en el nuevo estándar industrial en materia de recuperación. No obstante, la ganan-

cia de rendimiento que se puede obtener con estos equipos es limitada, como se ha indicado anteriormente. Por otra parte, las posibilidades de mejora de rendimientos del resto de los equipos y de los circuitos hidráulicos están prácticamente agotadas. Todo ello implica que para conseguir nuevas reducciones sustanciales en los niveles de consumo energético es necesario actuar sobre las presiones de trabajo.

Respondiendo a esta demanda, los fabricantes de membranas están tomando el relevo de los diseñadores de equipos en la reducción de consumo energético de la desalación, construyendo membranas que pueden operar a menor presión sin merma de la producción, o incluso incrementándola. De hecho en los últimos años se han presentado en el mercado varias membranas que trabajan con rendimientos aceptables con presiones en el entorno de 55 atmósferas.

Con la intención de valorar las posibilidades de ahorro energético que ofrece la combinación de las cámaras isobáricas con las nuevas membranas de baja presión se lanzó en California, en abril de 2004, el proyecto *Affordable Desalination Collaboration*² (Colaboración por una desalación asequible). El objetivo era demostrar la factibilidad de producir agua potable a partir de agua del Océano Pacífico, incluyendo la captación y el pretratamiento, a un coste energético inferior a 2 kWh/m³, menor que el coste energético de los principales trasvases que abastecen el sur de California. En el proyecto participaban inicialmente una quincena de entidades públicas y privadas, incluyendo agencias federales, estatales y municipales del sector del agua, abastecedores, fabricantes de equipos, ingenierías y consultoras. Posteriormente se fueron incorporando nuevas entidades hasta sumar 23 en la última fase del proyecto.

La planta de demostración se construyó en la base naval de Port Hueneme, situada entre las localidades de Santa Bárbara y Los Ángeles. La planta estaba equipada con cámaras isobáricas de tambor con un rendimiento del 95-96% y en los trabajos se ensayaron varias membranas de baja presión y nuevas arquitecturas en los bastidores de membranas. El funcionamiento de la planta experimental comenzó en el verano de 2005, y en diciembre de ese mismo año la dirección del proyecto anunció que se había rebajado la barrera de los 2 kWh/m³ en la etapa estricta de la ósmosis inversa.

A principios de 2006 se inició un nuevo ciclo de ensayos que finalizó en mayo de ese mismo año. En él se consiguió operar la planta con un consumo en la fase de ósmosis de 1,58 kWh/m³, con un índice de conversión del 42,5%. La dirección del proyecto aseguró que ese consumo energético constituía en ese momento el récord mundial en desalación marina por OI. No obstante, se indicó que el óptimo desde el punto de vista financiero se situaba a una presión más elevada, que permitía elevar el índice de recuperación al 50%, pero presentaba un consumo mayor (1,89 kWh/m³).

Cabe señalar por último que en ensayos privados en plantas industriales realizados en Canarias se ha rebajado holgadamente la barrera de los 2 kWh/m³ en la etapa de ósmosis, utilizando bombas de pistón de elevado rendimiento y cámaras isobáricas de tambor con agua atlántica tomada en pozos playeros (Ojeda 2005). No obstante, estas condiciones son difícilmente extrapolables a grandes plantas de suministro urbano.

12. CONCLUSIONES

El análisis realizado indica, como conclusión general, que los márgenes todavía disponibles para reducir los consumos energéticos con la generación actual de las tecnologías bási-

² www.affordabledesal.com

EL CONSUMO DE ENERGÍA EN LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

cas del proceso de desalación por ósmosis inversa en gran escala (bombas de alta presión, membranas y turbinas Pelton de recuperación), son ya bastante reducidos, y en el caso particular de la gran industria española, están próximos al agotamiento. El límite de los 3 kWh/m³ de consumo en la fase de ósmosis puede considerarse como la asíntota a perseguir en el perfeccionamiento de los sistemas actuales, y las principales plantas se encuentran ya muy próximas al mismo.

A corto plazo se contempla la posibilidad de una reducción adicional mediante la utilización de cámaras isobáricas en lugar de turbinas Pelton junto con una pequeña reducción de la presión de trabajo, y ciertos perfeccionamientos en la arquitectura de las centrales. Esta combinación permitiría situar la asíntota del consumo en OI en el nivel de 2,5 kWh/m³. Diseñando sistemas de captación y pretratamiento que no generen una repercusión mayor de 0,5 kWh/m³ sobre el agua producto, se configura un objetivo de 3 kWh/m³ de consumo global de desalación, que parece asequible como estándar de excelencia de la industria para finales de la presente década.

Para obtener reducciones mayores e intentar aproximarse a medio plazo al nivel de 2 kWh/m³ en la fase de ósmosis inversa (2,5 kWh/m³ de consumo global), que se puede considerar como el límite absoluto de la ósmosis inversa industrial con agua del Mediterráneo, será necesario combinar la utilización de nuevas generaciones de membranas de baja presión con cámaras isobáricas de alto rendimiento, y nuevas arquitecturas tanto en las líneas de desalación como en los bastidores de membranas. Sería de gran interés que se abordara la experimentación de estos conceptos con ensayos a escala industrial en las condiciones reales propias del Mediterráneo Español.

13. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren transmitir su agradecimiento a Antonio Nieto Llobet por su minuciosa revisión del artículo.

El presente artículo se basa en el estudio "Planificación y gestión hidrológica de la desalación de agua de mar: estado de la cuestión", encargado en 2006 por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX a la empresa consultora Gea21, S.L. y realizado por Antonio Estevan bajo la dirección de Manuel García Sánchez-Colomer. El informe básico fue revisado por Miguel Torres (CEDEX) y por José María Novoa (IBAEN).

14. BIBLIOGRAFÍA

PETRUCCI, R. H., W. S. HARWOOD, F. G. HERRING. (2002). *General Chemistry Principles and Modern Applications (Eighth Edition)*. Table 14.3. Ed. CHIPS. Weimar, USA.

EL-SAYED, Y. M., SILVER, R. S. (1980). *Fundamentals of Distillation*. Academic Press Inc. Cit. en VALERO, A.; UCHE, J.; SERRA, L. (2001). *La desalación como alternativa al PHN*, pág. 15. CIRCE-Univ. de Zaragoza.

VALERO, A.; UCHE, J.; SERRA, L. (2001). *Op.cit.*

MARTÍN, F. Y SÁNCHEZ, J.M. (2005). Mejora de la eficiencia energética de las plantas desaladoras. Nuevos sistemas de recuperación de energía. *Ingeniería y Territorio*, n° 72. Barcelona.

OJEDA, F. (2005), comunicación personal. Operación realizada en presencia del autor en las instalaciones de desalación de la empresa BONNY en Gran Canaria.

polyfelt
Geosynthetics

es ahora

TENCATE

Soluciones Geosintéticas en las que Usted puede confiar

Ha nacido TenCate Geosynthetics Europe, resultado de la fusión del grupo Polyfelt con Royal TenCate perteneciente a Nicolon B.V. Como resultado ofrecemos ahora una mayor gama de productos y su correspondiente Servicio Técnico también en España. Disponemos para Usted de nuevas tecnologías, continuando la tradición de productos de calidad y soluciones genéricas y personalizadas.



PROTECCIÓN DE GEOMEMBRANAS
Geotextiles no tejidos Polyfelt® y Bidim®.



REGENERACIÓN DE PLAYAS
Sistemas Geotubes® y Sistemas Geocontainers®.



REFUERZO DE MUROS Y TALUDES
Tejidos Geolon, Geomallas y Rock PEC.



CONTROL DE EROSIÓN EN ENCAUZAMIENTOS
Geosintéticos Polymat® y Robulon®.

TENCATE

Geotube

Tecnología Avanzada para control de erosión y desecado de lodos.



TENCATE GEOSYNTHETICS IBERIA, S.L.

c/ Azalea, 1 edificio E - 2.º Miniparc 1
El Soto de la Moraleja
28109 Alcobendas (Madrid) España

Tels: +34 91 650 63 18 / 64 61
Fax: +34 91 650 98 28
www.tencate.com

TENCATE
materials that make a difference