

*Comunicación Técnica*

## **Reducción del consumo específico de energía en las desalinizadoras de agua de mar de nueva generación**

**Autor principal:** Manuel Fariñas Iglesias

Institución: ACCIONA

Teléfono: 946050845

E-mail: msi@pridesa.com

**Otros autores:**

**ÍNDICE**

1. ANTECEDENTES.....	2
2. TURBINAS PELTON .....	3
2.1. Rendimiento neto de transferencia de energía .....	5
2.2. eficiencia energética del sistema.....	6
3. INTERCAMBIADORES DE PRESIÓN.....	7
3.1. Principio básico de funcionamiento .....	7
3.2. Eficiencia energética del sistema .....	11
4. CONCLUSIONES .....	13
5. BIBLIOGRAFÍA.....	14

## RESUMEN

En las desalinizadoras construidas hasta estos momentos, la recuperación de la energía existente en forma de presión en la salmuera de rechazo se realizaba mediante turbinas Pelton.

La puesta a punto, a escala real, de nuevos dispositivos, conocidos como intercambiadores de presión, para recuperar dicha energía con mayor rendimiento, va a permitir reducir el consumo específico de energía en las grandes desalinizadoras de agua de mar en unos 0,5 kWh/m<sup>3</sup>.

La aparición simultánea de nuevas membranas de ósmosis inversa con un mayor coeficiente de permeabilidad y un superior porcentaje de rechazo de sales va a disminuir todavía más dicho consumo específico de energía.

A lo largo de la presente ponencia se describen dichas innovaciones así como los nuevos rendimientos y consumos específicos que se esperan en las nuevas desalinizadoras de agua de mar.

## 1. ANTECEDENTES

En una conferencia celebrada hace un par de años [1], hablando de una gran desalinizadora de agua de mar como es la de Carboneras (120.000 m<sup>3</sup>/día), este ponente señalaba que los costes de producción del agua tenían el reparto mostrado en la figura 1.

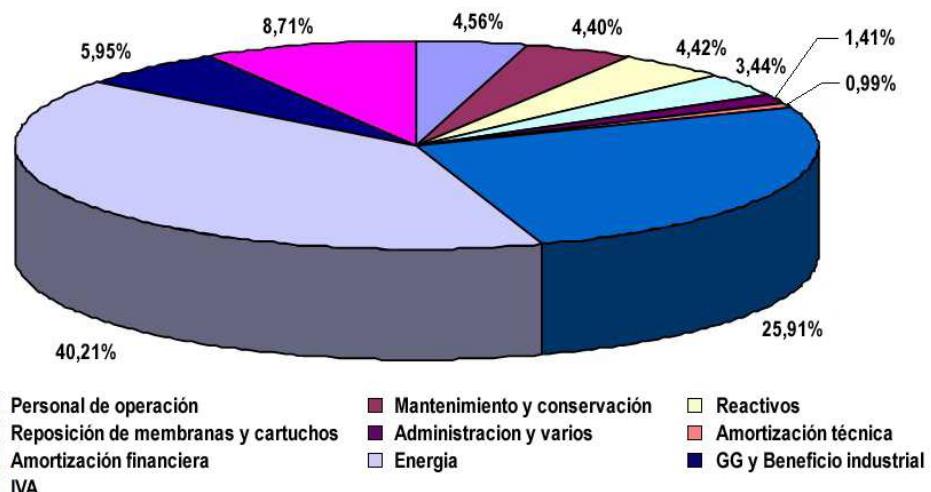


Figura 1  
Porcentajes de participación en el coste del agua desalinizada  
Desalinizadora de Carboneras

Como se puede ver, el coste debido al consumo de energía por parte del proceso es enormemente importante, ya que, en el caso de esta desalinizadora, supone el 40% del coste total de producción.

Aunque este porcentaje puede variar de unos países a otros en función del precio local de la energía [2], su repercusión en el coste total del agua desalinizada es siempre superior al 30%.

En la misma conferencia afirmaba que el consumo específico de energía en dicha desalinizadora presentaba el desglose indicado en la tabla 1.

Tabla 1

Desglose del consumo específico de la energía de la desalinizadora de Carboneras

Punto de consumo	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )	Porcentaje (%)
Captación y pretratamiento	0,63	15,4
Desalación (O.I.)	3,10	76,0
Pérdidas y varios	0,12	3,0
Total a pie de desalinizadora	3,85	94,4
Bombeo al exterior	0,23	5,6
Total en la balsa de entrega	4,08	100,0

A la vista del mismo, se concluye fácilmente que el punto de mayor consumo de energía es el bombeo a alta presión que impulsa el agua hacia las membranas. Con el ánimo de abaratar el coste del m<sup>3</sup> del agua de mar desalinizada, no debe de extrañar que se esté haciendo un gran esfuerzo por parte de todos los participantes en el mercado de la desalinización (diseñadores de plantas, fabricantes de membranas de O.I., suministradores de las bombas de alta presión y equipos de recuperación de energía..., etc.) para reducir el consumo específico en este apartado.

Una de las líneas abiertas a tal respecto ha sido la mejora del rendimiento de los sistemas de recuperación de la energía existente en el rechazo.

## 2. TURBINAS PELTON

Para recuperar la energía existente en la salmuera de rechazo que abandona las membranas de ósmosis inversa, cada una de las doce líneas de producción de la desalinizadora de Carboneras va provista de una turbina Pelton tal y como se muestra en la figura 2.



Figura 2  
Grupo de alta presión  
Desalinizadora de Carboneras

La turbina está acoplada al eje del motor que acciona la bomba de alta presión, tal y como se muestra en la figura 3. En dicha figura se recogen los caudales, presiones y rendimientos de las distintas máquinas.

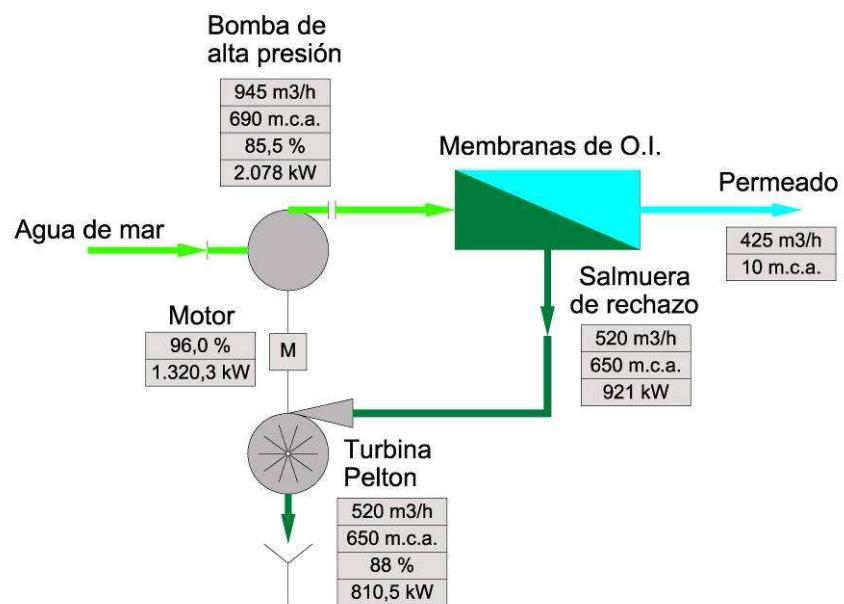


Figura 3  
Esquema de la recuperación de energía con turbina Pelton

En los inyectores de la turbina Pelton, la energía existente en forma de presión en la salmuera de rechazo se transforma en energía cinética de traslación y tras golpear sus cazoletas, en energía cinética de rotación en el eje de la turbina.

Con esta disposición el motor eléctrico de accionamiento sólo tiene que aportar la energía que reclama la bomba menos la que recupera la turbina.

## 2.1. RENDIMIENTO NETO DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

En el caso de Carboneras, la potencia existente en el rechazo que retorna a cada turbina Pelton sería:

$$P_{\text{rechazo}} = \frac{Q (\text{m}^3/\text{h}) \cdot H (\text{mca})}{367} = \frac{520 \times 650}{367} = 921 \text{ kW}$$

Como el rendimiento hidráulico de cada turbina, según la figura 3, es del 88% quiere decir que la potencia que recupera en su eje es de:

$$P_{\text{turbina}} = 0,88 \times 921 = 810,5 \text{ kW}$$

Esta potencia, en contra de lo que parece, no se aprovecha íntegramente. Como se utiliza a su vez para impulsar el agua de mar, un parte de esta energía recuperada se pierde en la bomba de alta presión (cuyo rendimiento es del 85,5%). Otra parte se pierde al transmitirla a través del eje del motor debido a las pérdidas en rodamientos..., etc., (este rendimiento es del orden del 98,5%).

Si definimos el rendimiento neto de transferencia de energía (Net transfer efficiency) por la expresión:

$$Nte = \frac{\text{Energía hidráulica transferida al agua de mar}}{\text{Energía hidráulica disponible en el rechazo}}$$

Dicho valor para el sistema de Carboneras descrito sería:

$$Nte = \eta_{\text{turbina}} \cdot \eta_{\text{bomba}} \cdot \eta_{\text{transf.motor}}$$

Sustituyendo valores:

$$Nte = 0,88 \times 0,855 \times 0,985 = 0,741$$

Lo que quiere decir que en el caso de la desalinizadora de Carboneras sólo el 74,1% de la energía hidráulica existente en el rechazo se transmite de nuevo al agua de mar.

## 2.2. EFICIENCIA ENERGETICA DEL SISTEMA

Como las bombas de alta presión tienen un rendimiento del 85,5%, la potencia absorbida en su eje es:

$$P_{\text{bomba}} = \frac{Q(\text{m}^3/\text{h}) \cdot H(\text{mca})}{367 \cdot \eta_{\text{bomba}}} = \frac{945 \times 690}{367 \times 0,855} = 2.078 \text{ kW}$$

Como la turbina recupera 810,5 kW, la potencia neta que debe aportar el eje del motor es:

$$P_{\text{motor}} = P_{\text{bomba}} - P_{\text{turbina}} = 2.078 - 810,5 = 1.267,5 \text{ kW}$$

Dado que el rendimiento con el que el motor transforma la energía eléctrica en mecánica es del 96%, la potencia eléctrica solicitada sería:

$$P_{\text{eléctrica}} = \frac{P_{\text{motor}}}{\eta_{\text{motor}}} = \frac{1.267,5}{0,96} = 1.320,3 \text{ kW}$$

Dividiendo los 1.320,3 kW entre los 425 m<sup>3</sup> de agua desalinizada producidos cada hora, obtendríamos 3,1 kWh/m<sup>3</sup> que es el consumo específico de energía en esta parte del proceso.

Si tuviésemos una bomba de alta presión, una turbina Pelton y un motor de accionamiento perfectos, esto es, con rendimientos del 100%, ¿cuál sería el consumo específico debido a las membranas?

La potencia absorbida por la bomba sería:

$$P_{\text{bomba}} = \frac{Q(\text{m}^3/\text{h}) \cdot H(\text{mca})}{367 \cdot \eta_{\text{bomba}}} = \frac{945 \times 690}{367 \times 1} = 1.776,7 \text{ kW}$$

La potencia recuperada por la turbina sería igualmente:

$$P_{\text{turbina}} = \frac{Q(\text{m}^3/\text{h}) \cdot H(\text{mca}) \cdot \eta_{\text{turbina}}}{367} = \frac{520 \times 650 \times 1}{367} = 921 \text{ kW}$$

La potencia que debe aportar el eje del motor es:

$$P_{\text{motor}} = P_{\text{bomba}} - P_{\text{turbina}} = 1.776,67 - 921 = 855,7 \text{ kW}$$

Suponiendo que su rendimiento fuese del 100% la potencia eléctrica solicitada sería:

$$P_{\text{eléctrica}} = \frac{P_{\text{motor}}}{\eta_{\text{motor}}} = 855,7/1 = 855,7 \text{ kW}$$

El consumo específico debido solamente a las membranas, sin tener en cuenta las pérdidas de energía en los equipos de bombeo y de recuperación sería por tanto:

$$\frac{855,7}{425} = 2,01 \text{ kWh/m}^3$$

Nótese que este consumo específico depende sólo de la conversión de trabajo y de las membranas utilizadas siendo independiente de los equipos e bombeo y de recuperación de energía.

El exceso de consumo energético del sistema formado por la bomba de alta presión y la turbina Pelton sería entonces:

$$\epsilon = 100 \times \frac{3,10}{2,01} = 154,2\%$$

Como se ve, aunque los rendimientos tanto de la bomba como de la turbina parecen altos (85,5 y 88% respectivamente) el rendimiento global del sistema es bajo ya que el consumo específico del conjunto bomba-motor-turbina es un 54,2% superior al teórico.

### **3. INTERCAMBIADORES DE PRESIÓN**

#### **3.1. PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO**

Los intercambiadores de presión, conocidos en inglés por las siglas WEER (Work Exchanger Energy Recovery), y que podrían trasladarse al español con las siglas SIPRE (Sistemas intercambiadores de presión para la recuperación de energía), son dispositivos que transfieren directamente la alta presión de la salmuera de rechazo al agua de mar sin convertirla previamente en energía mecánica de rotación.

Imaginemos un cilindro provisto en su interior de un disco cuyo rozamiento sea mínimo. Supongamos que un lado de dicho cilindro se conecte con el agua de mar que hay que enviar hacia las membranas y que se encuentra a una presión  $P_a$  (presión de alimentación). Supongamos igualmente que dicha conexión se realice mediante unas

válvulas de retención dispuestas como muestra la figura 4 y que el otro extremo se conecte mediante la válvula V1 con la salmuera de rechazo procedente de las membranas y que se encuentra a una presión  $P_s$  (presión de salida) y con el drenaje que se encuentra a la presión atmosférica  $P_o$  a través de la válvula V2.

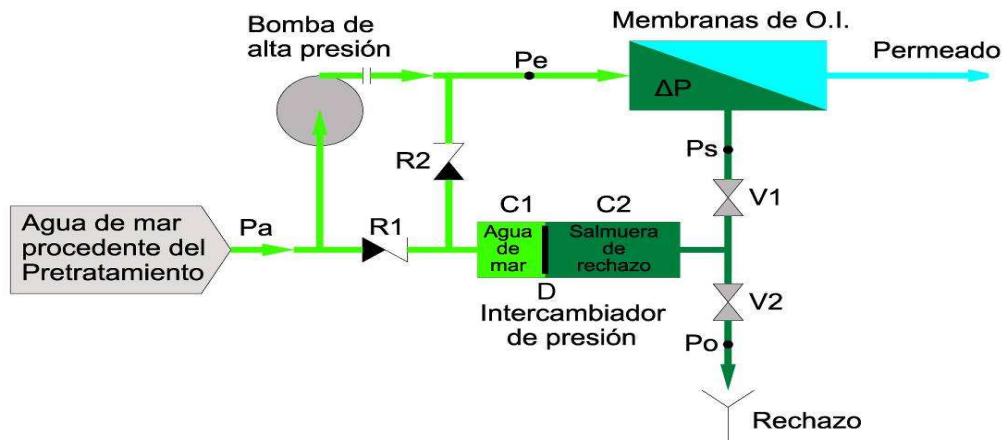


Figura 4  
Esquema de la conexión de un intercambiador de presión

Cuando la válvula V2 está abierta y la V1 cerrada, como se recoge en la figura 5, la salmuera de rechazo del interior del cilindro está en contacto con la atmósfera siendo desplazada por el agua de mar a baja presión que, a través de la válvula de retención R1, penetra en la cámara C1 llenándola al desplazar el disco D hacia la derecha.

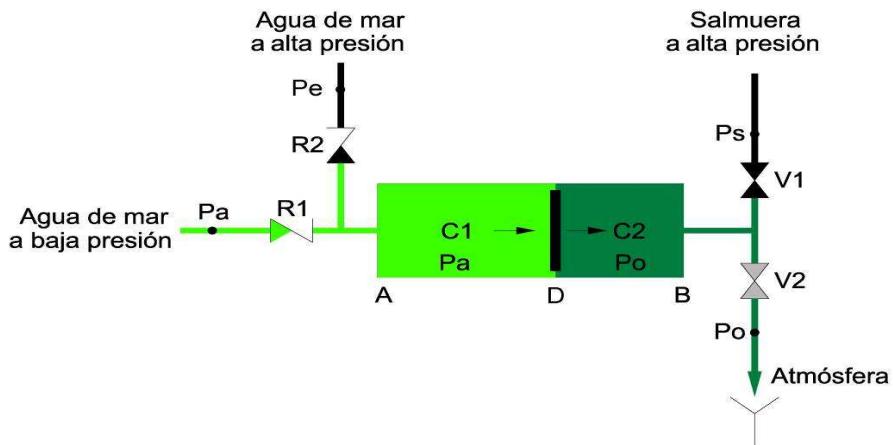


Figura 5  
Alimentación con agua de mar

La válvula de retención R2 no deja pasar el agua a su través porque la presión existente en la cámara C1 es baja, no siendo suficiente para abrir la clapeta de la válvula de retención R2 ya que ésta está en contacto con agua de mar a la presión  $P_e$  de entrada a las membranas.

Cuando el disco D llega al extremo derecho B, la válvula V1 se abre cerrándose la V2 como muestra la figura 6. En tal circunstancia la salmuera a alta presión ( $P_s$ ) desplaza el disco D hacia la izquierda, transmitiendo de esta forma la presión que posee al agua de mar existente en la cámara C1.

El agua de mar de la cámara C1 no puede atravesar la válvula de retención R1 ya que su posición es contraria y sólo puede atravesar la R2 cuando la presión que alcance iguale a la existente en la entrada a las membranas ( $P_e$ ).

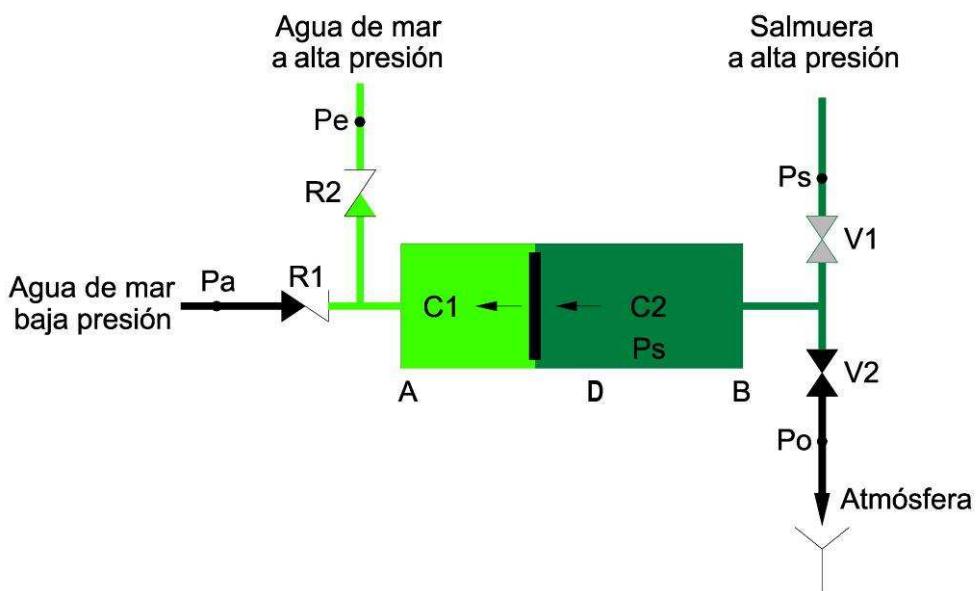


Figura 6  
Transferencia de la presión existente en la salmuera de rechazo

Cuando el pistón llega al extremo izquierdo A, se cierra la válvula V1 abriéndose la V2 repitiéndose de nuevo el ciclo.

El dispositivo descrito en la figura 4, necesita resolver dos problemas para funcionar correctamente. El primer problema es que la transferencia de presión al agua de mar por parte de la salmuera debe ser continua. En el caso descrito, mientras el disco D se mueve hacia la derecha, no impulsa agua de mar, lo que no es aceptable para las

membranas ya que se quedarían sin agua. Este problema se resuelve instalando en paralelo al menos un segundo cilindro cuyo funcionamiento debe estar desfasado respecto al primero [3], tal y como se recoge en la figura 7, de manera que las membranas estén recibiendo permanentemente agua de mar a alta presión procedente del intercambiador de presión.

El segundo problema es que la presión con la que sale la salmuera de rechazo ( $P_s$ ), debido a la pérdida de carga que sufre al atravesar las membranas, es inferior a la presión con la que el agua de mar entra a éstas ( $P_e$ ).

Consecuentemente la presión con la que el agua de mar sale de los intercambiadores de presión es ligeramente inferior a la requerida por las membranas.

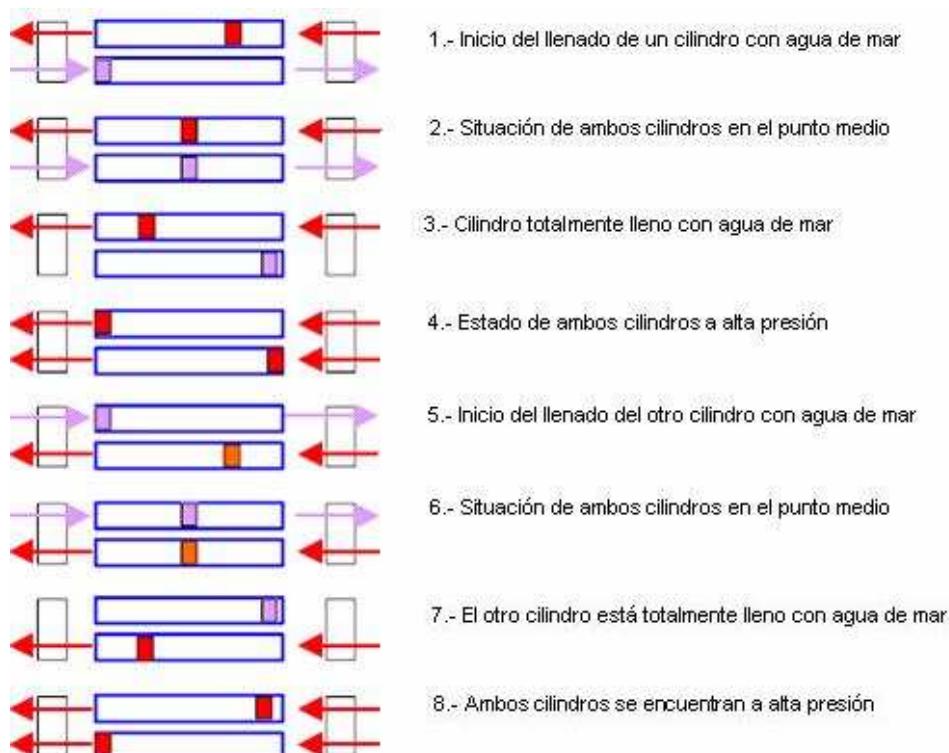


Figura 7  
Esquema del desfase que debe existir entre ambos cilindros

Este segundo problema se resuelve instalando una bomba booster a la salida de los intercambiadores de presión tal y como se muestra en la figura 8.

La bomba booster impulsa un caudal de agua de mar ligeramente inferior al caudal de la salmuera de rechazo y la presión diferencial que aporta debe compensar la pérdida de carga que sufre la salmuera tanto en las membranas como en las tuberías y válvulas.

La bomba de alta presión debe suministrar por tanto el caudal de agua de mar que falta, es decir, un caudal ligeramente superior al de permeado.

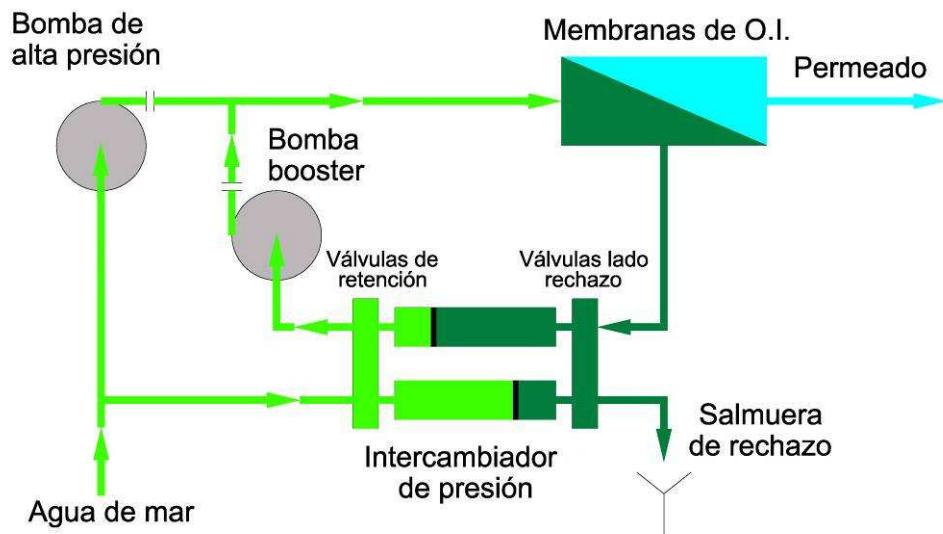


Figura 8  
Esquema de la recuperación de energía con intercambiadores de presión

### 3.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA

La figura 9 muestra los caudales y potencias absorbidas en una desalinizadora de agua de mar que utilizase la misma bomba de alta presión que Carboneras pero instalando un intercambiador de presión en lugar de la turbina Pelton mostrada en la figura 3.

Puede verse que con la misma bomba, aunque con un motor de más potencia, el caudal de permeado producido en este caso es de  $945 \text{ m}^3/\text{h}$ .

La potencia eléctrica total absorbida en este caso sería la mostrada en la tabla 2. Nótese que en estos consumos se han considerado los rendimientos de los variadores de frecuencia de la bomba de agua de mar y de la bomba booster.

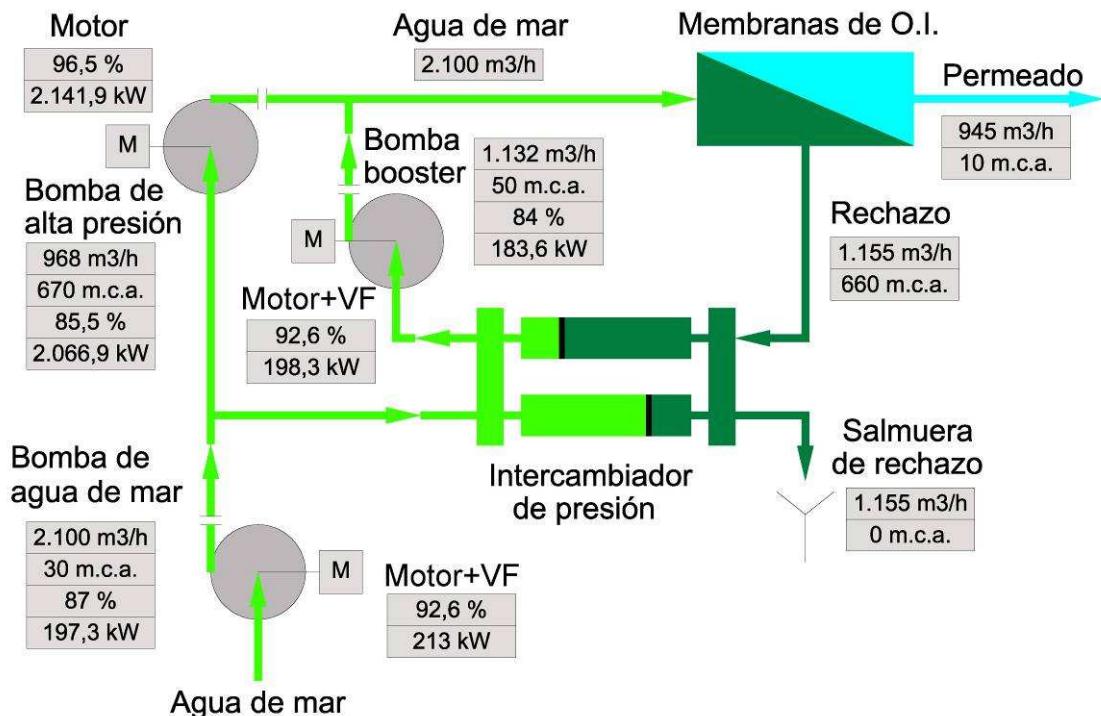


Figura 9

Diagrama de caudales y potencias absorbidas en una desalinizadora con las bombas de alta presión de Carboneras

Tabla 2  
Potencia total absorbida con un intercambiador de presión

Equipo	Potencia absorbida (kW)
Bomba de agua de mar	213
Bomba de alta presión	2.141,9
Bomba booster	198,3
Total	2.553,2

También se ha tenido en cuenta el aumento de la presión de trabajo de las membranas debido al incremento de la salinidad del agua que les llega como consecuencia de la mezcla con salmuera de rechazo en el intercambiador de presión.

Aunque la bomba de agua de mar no se ha incluido en la figura 3, la potencia absorbida por la misma se ha tenido en cuenta en la presión diferencial de la bomba de alta presión.

El consumo específico de energía con intercambiadores sería:

$$C_{\text{específico}} = \frac{2.553,2}{945} = 2,70 \text{ kWh/m}^3$$

Como puede verse, este valor supone un ahorro frente al valor de Carboneras de:

$$3,10 - 2,70 = 0,40 \text{ kWh/m}^3$$

Como el consumo específico debido solamente a las membranas para una conversión dada es constante, y en el momento actual con un conversión del 45% vale 2,01 kWh/m<sup>3</sup> según se ha visto en el apartado 2.2., el exceso de consumo energético del sistema formado por la bomba de alta presión, el intercambiador de presión y la bomba booster es:

$$\epsilon = 100 \times \frac{2,70}{2,01} = 134,3\%$$

El consumo específico del sistema es un 34,3% superior al teórico lo que significa veinte puntos porcentuales menos que el sistema bomba de alta presión – turbina Pelton.

#### 4. CONCLUSIONES

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

- ❖ Algunos de los intercambiadores de presión han alcanzado ya la mayoría de edad tecnológica en plantas de mediano tamaño.

Aunque no están suficientemente probados en plantas de gran tamaño (no hay suficiente experiencia acumulada) y a pesar de que tienen que resolver todavía algunos problemas, a mi entender, ha llegado el momento de instalarlos, con la debida prudencia y las oportunas garantías, en las grandes plantas desalinizadoras que se van a construir en España.

- ❖ Los intercambiadores de presión suponen un avance importante en la recuperación de la energía existente en el rechazo ya que permiten disminuir en veinte puntos porcentuales el exceso de

consumo de energía respecto al valor teórico con las membranas actuales pasando del 54,2 % al 34,3 %.

- ❖ No queda mucho más margen de maniobra para seguir reduciendo el consumo específico en esta parte del proceso (34,3% de exceso). La instalación de bombas de mayor tamaño y la reducción de las pérdidas de energía en los intercambiadores ayudarán sin duda pero veo difícil que la reducción supere otro 10% - 15% (0,2 – 0,3 kWh/m<sup>3</sup>).
- ❖ Teniendo en cuenta que el consumo mínimo teórico de energía en la desalación con una conversión del 45% ronda 1 kWh/m<sup>3</sup> y que las membranas consumen en la actualidad 2,01 kWh/m<sup>3</sup> el esfuerzo en el ahorro de energía en la desalación debe hacerse en el campo de las membranas.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Fariñas, M. "La desaladora de Carboneras", 1<sup>as</sup> Jornadas Técnicas sobre Construcción, explotación y mantenimiento de plantas de desalación y reutilización de agua, Institute for International Research, Madrid 2004.
- 2) Wilf, M., Bartels, C. "Optimization of seawater systems design", Desalination 173 (2005).
- 3) Shymway Scott A., "The work exchanger for SWRO energy recovery", International Desalination & Water Reuse Quarterly, February/March 1999.