

04-004

## ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AS A KEY FACTOR IN SEAWATER DESALINATION PROJECTS

Lora-García, Jaime <sup>(1)</sup>; López-Pérez, M. Fernanda <sup>(1)</sup>; Cardona Navarrete, Salvador C.  
<sup>(1)</sup>; Fombuena Borrás, Vicent <sup>(1)</sup>; Carbonell Alsina, Carlos <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Universitat Politècnica de València

A global scenario of increasing vulnerability of water resources in Spain makes it increasingly necessary to find alternative sources to meet demand and to encourage natural resources conservation. Among others, desalination of seawater and brackish waters It is one of the most developed options. The desalination capacity of Spain by using reverse osmosis membranes is higher than 3 hm<sup>3</sup>/day, which represents 2% of the supply in agriculture and 5% of domestic consumption. Its energy intensity that has been decreasing in recent years up to 2.5 kWh/m<sup>3</sup> for seawater, makes the costs of the water produced are still high compared to conventional water supply. That is why desalination plants only operate at full capacity during periods of high drought despite the high investment made. In this paper a new energy approach of the desalination process is presented to show which variables affect energy consumption. In addition, different future actions are explored that will reduce this consumption even further to make desalination more economically viable as a new safe water resource securing the water supply at any time.

*Keywords: water scarcity; desalination; energy consumption; energy recovery; energy production*

## ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO COMO FACTOR CLAVE EN PROYECTOS DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR

La situación de vulnerabilidad creciente de los recursos hídricos en España hace que cada vez sea más necesaria la búsqueda de fuentes alternativas para satisfacer la demanda y favorecer la conservación de los medios naturales. Entre otras, la desalación de aguas marinas y salobres es una opción de las más desarrolladas. La capacidad desaladora de España mediante membranas de osmosis inversa supera los 3 hm<sup>3</sup>/día lo que representa el 2% del suministro en agricultura y el 5% del consumo doméstico. Su intensidad energética que ha ido disminuyendo en los últimos años hasta 2.5 kWh/m<sup>3</sup> para agua de mar, hace que los costes del agua producida sean todavía elevados en comparación con el agua potabilizada convencional. Por ello, las plantas desaladoras solo funcionan a pleno rendimiento en periodos de elevada sequía a pesar de la elevada inversión realizada. En este trabajo se aborda un nuevo análisis energético de la desalación de agua de mar para observar que variables afectan en mayor medida al consumo de energía. Además, se exploran diferentes acciones de futuro que permitirán reducir aún más dicho consumo para hacer más económicamente viable la desalación como una nueva fuente segura de agua que garantice el suministro en todo momento.

*Palabras clave: escasez de agua, desalación; consumo de energía; recuperación de energía; producción de energía*

Correspondencia: Jaime Lora García jlor@iqn.upv.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción.

El agua es un recurso imprescindible para el desarrollo sostenible. Sabemos que tiene una interrelación muy directa con la energía, pero también con otras cuestiones tan relevantes como el cambio climático, agricultura, salud y medio ambiente. Por esta razón, su problemática no se puede debatir desde una sola óptica. La denominada caja del agua planteada por Bullock et al. (2009) describe gráficamente algunas de estas interrelaciones. Se establece que cada sociedad define su estilo de vida y tanto los ciudadanos, los empresarios, y finalmente los gobernantes toman decisiones que influyen en determinados factores de presión, que a su vez impactan sobre el estado los recursos naturales entre los que están los recursos hídricos. La planificación y gestión de dichos recursos permite satisfacer la demanda de un conjunto de usuarios que forman sociedad, y definen el estilo de vida que lo condiciona todo. Los factores de presión que influyen en los patrones del uso del agua, y que añaden o quitan dicha presión sobre los recursos hídricos son para todos bien conocidos, como el crecimiento demográfico o el cambio climático entre otros.

Desde el punto de vista de la disponibilidad de agua, los recursos naturales globales en nuestro planeta son del orden de más de un Tera kilómetro cúbico, es decir un volumen prácticamente infinito. Sin embargo, de todo ese recurso aproximadamente solo el 2.5 es agua potable, y únicamente el 0.4% está disponible para ser consumida de forma directa (Shiklomanov & Rodda, 2003). El resto del recurso no es susceptible de consumo directo por diferentes razones: elevada salinidad, contaminación o necesidad de bombeos cada vez más profundos. La disponibilidad de los recursos de agua en España es preocupante, ya que ha alcanzado el estatus de vulnerabilidad hídrica, y supone un grave riesgo para el desarrollo las zonas con mayor escasez de agua como son el litoral mediterráneo y los territorios insulares (Cabrera, Estrela & Lora 2019).

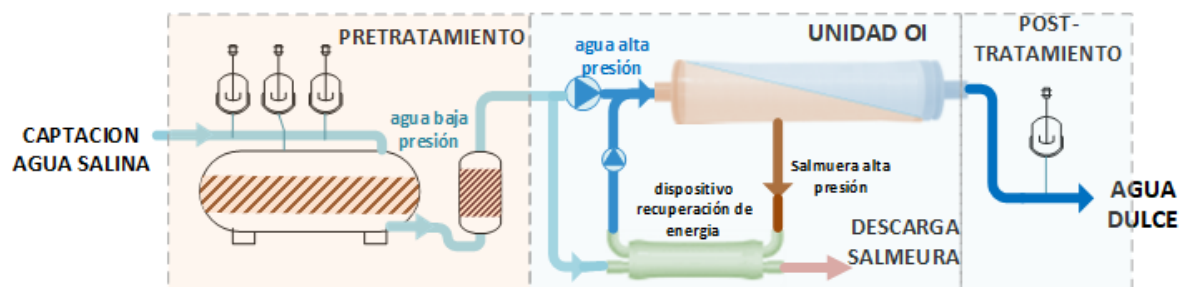
El desarrollo sostenible, ante un escenario de escasez de agua en buena parte del planeta, requiere la búsqueda de nuevos recursos de agua, que denominaremos no convencionales, con el fin de satisfacer la creciente demanda y conservar al mismo tiempo los recursos naturales. Entre las alternativas maduras, la desalación de aguas salinas viene contribuyendo de forma significativa, en las últimas décadas, a mejorar la disponibilidad de agua en el mundo. Hoy en día el suministro de agua desalada con cerca de 100 hm<sup>3</sup>/día, alcanza a más de 150 países que representan a más de 300 millones de ciudadanos. En España, la capacidad instalada alcanza los 1000 hm<sup>3</sup>/día, si bien por diferentes circunstancias solo el 30% está operativo, y representa el 8% de la demanda municipal.

Entre las técnicas desaladoras, la osmosis inversa (OI) es la más empleada con un 70% de las plantas instaladas gracias a la sencillez y modularidad de las instalaciones. Por otra parte, el agua de mar continúa siendo (>60%) la fuente predominante para alimentar el proceso.

Este proceso requiere una membrana semipermeable que, bajo presión, permite el paso del agua, pero no las sales que contiene. Para llevar a cabo la operación debe superarse la presión osmótica del agua salina a tratar, y en consecuencia se requiere una presión entre 10 y 25 bares para el agua salobre y entre 55 y 70 bares para el agua de mar. Las membranas actuales permiten la producción de agua dulce de alta calidad (salinidad <500 mg/l). El sistema comprende cinco subsistemas: captación, pretratamiento, unidad de ósmosis inversa (bomba de alta presión, membrana y dispositivo de recuperación de energía, cuando corresponda), postratamiento y descarga de salmuera (Figura 1). El agua, ya sea superficial o subterránea, se trata previamente mediante filtración y adición de productos químicos para a) eliminar sólidos en suspensión y coloides, b) para evitar la incrustación de sales poco

solubles, y c) para evitar la obstrucción de las membranas por el crecimiento de microorganismos.

**Figura 1: Esquema de un sistema de desalación de agua por osmosis inversa**



La unidad de OI es una configuración modular que incluye un sistema de bombeo de alta presión, donde los elementos de membrana se ensamblan en tubos de presión conectados en serie. El porcentaje de agua dulce obtenida por kg de agua salada es aproximadamente del 50% para el agua de mar, y puede alcanzar hasta el 85% para el agua salobre. Como resultado se obtienen dos flujos, uno de agua desalada (agua dulce) a presión atmosférica, y otro que contiene el concentrado o salmuera, a una presión ligeramente más baja que la presión de bombeo. Para el agua de mar, esta energía puede recuperarse a través de intercambiadores de presión o turbinas, logrando así un considerable ahorro de energía.

Antes de introducir el agua en la red urbana, el agua dulce obtenida requiere de un tratamiento para ajustar el pH y compensar la falta de  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$ . Por otro lado, la salmuera producida se gestiona mediante un vertido controlado para minimizar su impacto ambiental en el área de descarga. El procedimiento más común utilizado es diluirla y difundirla en el mar de manera controlada.

Los sistemas modernos, que procesan agua de mar, registran una intensidad energética de entre 2.5 - 4 kWh/m<sup>3</sup> de agua desalada según sea la salinidad de entrada, y siendo la unidad de OI la etapa más exigente, con un 70%. En las plantas de agua salobre el consumo eléctrico se reduce a 1-1.5 kWh/m<sup>3</sup>. A pesar de haber reducido durante los últimos años en más de 2 kWh/m<sup>3</sup>, estos procesos son mucho más intensivos energéticamente que los procesos tradicionales de tratamiento de aguas superficiales, en general 0.2-0.4 kWh/m<sup>3</sup>, o de tratamiento de aguas residuales, en el rango de 0.5-1.0 kWh/m<sup>3</sup>. Sin embargo, la principal ventaja es que el agua de mar es una fuente ilimitada, mientras que las fuentes tradicionales dependen del clima, de las condiciones ambientales, y del grado de explotación de los acuíferos en el caso de aguas subterráneas, y en España, como se ha dicho anteriormente, estos recursos son muy limitados.

En términos de costes la producción de agua desalada se ve seriamente influenciada por el consumo energético que puede llegar a ser superior al 50% de los costes de producción, y representa un hándicap para el desarrollo de los procesos de desalación (Zarzo & Prats, 2018). Por todo ello, los avances tecnológicos y el diseño de las plantas actuales están orientados a su disminución, dado que todavía hay un cierto margen para mejorar.

El desarrollo de nuevas membranas ultra-permeables basadas en canales selectivos al agua, mediante acuaporinas, nanotubos de carbono y grafeno están obteniendo a nivel de laboratorio resultados muy esperanzadores en este sentido, pero todavía lejos de su implantación a nivel industrial. Por otra parte, el desarrollo de nuevos módulos de membrana, con mejores condiciones hidrodinámicas para el transporte de agua a través de la membrana,

pueden favorecer la disminución de las presiones de operación actuales con el consiguiente ahorro energético (Voutchkov, 2018).

Si nos centramos en el caso de agua de mar, por ser el más intensivo en consumo de energía, la optimización del diseño de cada una de las etapas que comprende el proceso de desalación puede ayudar también a reducir el consumo energético de las plantas desaladoras actuales. El factor principal de las primeras etapas es la mitigación del ensuciamiento que influye negativamente en la producción de agua y en la vida útil de las membranas. La configuración de la unidad de ósmosis inversa y las condiciones operativas de este proceso son también factores influyentes en dicha optimización.

En este sentido, el objetivo de este trabajo es analizar el efecto que las condiciones de operación de la ósmosis inversa tienen sobre el consumo de energía en una instalación de agua de mar. Para ello se tendrán en cuenta como variables de diseño, la conversión de agua, el flux promedio, y el número de tubos de presión por bastidor, para un agua tipo del Mar Mediterráneo.

## 2. Transporte del agua en membranas de ósmosis inversa.

Las membranas utilizadas en el proceso de ósmosis inversa presentan una capa selectiva ultrafina con “poros” inferiores a 1nm. La existencia de estos canales selectivos puede describirse en términos de volumen libre intermolecular donde el transporte convectivo, propio de los sistemas filtrantes, pasa a ser una transferencia de materia de carácter difusivo.

En los procesos de separación de OI se han propuesto varios modelos matemáticos para describir la transferencia de materia externa e interna de la membrana. La transferencia interna se explica de forma simple por el modelo de disolución-difusión, propuesto por Lonsdale, Merten y Riley (1965), mientras que el modelo más utilizado para describir la transferencia de materia fuera de la membrana es el modelo de polarización por concentración basado en la teoría de la película. Más recientemente Merdaw, Sharif y Derwish (2010), Attarde, Jain y Gupta (2016), y Chen y Qin (2019) han propuesto y validado modelos combinados de ambos mecanismos, que están basado en un sistema de resistencias en serie para describir el paso de disolvente a través de la membrana.

La ecuación general del flux de agua,  $J_w$ , o flujo de agua por unidad de superficie de membrana, es similar a la del modelo clásico de Lonsdale, y está basada en el producto de un coeficiente de permeabilidad de la membrana por el gradiente de fuerza impulsora entre los dos lados de la membrana, corregida por el módulo de polarización por concentración  $\phi$ , que es función del propio flux y del coeficiente de transferencia de materia en la parte externa de la membrana,  $k$ .

$$J_w = A_{wm}(\Delta P - \phi(J_w, k)\Delta\Pi_m) \quad (1)$$

donde,  $A_{wm}$  es la permeabilidad al agua por difusión a través de la membrana, y  $\Delta P$ , y  $\Delta\Pi_m$  son las diferencias de presión hidráulica, y presión osmótica a ambos lados de la membrana.

La solución de esta ecuación permite optimizar las condiciones operativas del proceso, en términos de presión y velocidad tangencial de la corriente alimento en los elementos de membrana.

El flux de soluto se describe por un mecanismo de carácter difusivo mediante la siguiente ecuación,

donde  $B_{sm}$  es el coeficiente de permeabilidad del soluto y  $\Delta c$  es la diferencia de

$$J_S = B_{sm} \Delta c \quad (2)$$

concentraciones del soluto a ambos lados de la membrana

El flux de soluto tiene un efecto importante sobre la selectividad de la membrana y determina la calidad del agua producto desalada.

Finalmente cabe decir, que todos los coeficientes de transferencia se ven afectados directamente con la temperatura. Así, un aumento de la temperatura incrementa el volumen libre de la estructura densa de la membrana, y provoca un aumento del flux de agua y de solutos.

En términos prácticos, en el proceso de ósmosis inversa, el flux total del disolvente y soluto  $J_V$ , que sale por el lado del permeado de la membrana, se expresa mediante la siguiente ecuación, considerando que las membranas de OI rechazan prácticamente todos los solutos,

$$J_D = J_W + J_S \approx J_W \quad (3)$$

Si aplicamos el principio de conservación de materia al proceso de OI, se tiene la siguiente expresión,

$$Q_F c_F = Q_P c_P + Q_C c_C \quad (4)$$

donde Q y c, son los caudales y concentraciones de alimentación, permeado y concentrado respectivamente.

Para un área de membrana S, el caudal de permeado está relacionado con el flux de agua,

$$Q_P = J_P S \quad (5)$$

Por otra parte, para un caudal de permeado determinado, la velocidad de la corriente de alimentación, así como el nivel de concentración del proceso, están determinados por el factor de conversión de agua Y,

$$Y = \frac{Q_P}{Q_F} \quad (6)$$

El conjunto de ecuaciones presentado en este apartado constituye una base sólida para el diseño de una unidad de osmosis inversa tanto a nivel de investigación como industrial. En la práctica esto requiere la realización una gran cantidad de cálculos, y por ello los fabricantes de membranas han desarrollado determinados softwares que facilitan el trabajo. Son bastante similares en funcionalidad, diseño de interfaz de usuario, valores de entrada requeridos y la salida de resultados.

El procedimiento de cálculo generalmente comienza con la entrada del análisis del agua de alimentación, y los parámetros de proceso y diseño. De acuerdo con los modelos empíricos desarrollados con las membranas de cada fabricante, se establece un algoritmo de cálculo que converge a una solución estable. Dicha solución establece la configuración de la unidad de OI con todos los detalles operativos de presión, caudales y composición en cada elemento de membrana. Además, supervisa las especificaciones del fabricante de membrana, y alerta de posibles riesgos de incrustación de sales.

### 3. Metodología experimental

De acuerdo con el objetivo del trabajo, el análisis energético del proceso de OI se va a realizar considerando una instalación desaladora grande de unos 135000 m<sup>3</sup>/día, para agua del Mar Mediterráneo, cuya composición se muestra en el Tabla 1.

Se estima que la captación se realiza por toma superficial sumergida, y el pre-tratamiento es de tipo convencional (SDI<3), incluyendo dos unidades de filtración de diferente medio filtrante (bicapa silex-antracita para la primera y cartuchos textiles para la segunda), así como las correspondientes dosificaciones de productos químicos para prevenir la presencia de sólidos en suspensión, coloides finos, y microorganismos, así como agentes oxidantes, antes que el agua acceda a los elementos de membrana.

Para los cálculos de diseño se utilizará el software IMSDesign (2020) de la firma comercial Hydranautics Nitto-Denko, disponible en su *website*.

**Tabla 1. Composición del agua alimento**

Temperatura, °C	24.0	pH	8.1
Conductividad <sub>25</sub> mS/cm	59.4	Sólidos disueltos, g/l	38.5
Cationes, mg/l		Aniones, mg/l	
Ca <sup>++</sup>	421.7	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	104.7
Mg <sup>++</sup>	1313.7	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	2776.0
Na <sup>+</sup>	12033.0	Cl <sup>-</sup>	21370.7
K <sup>+</sup>	408.5	F <sup>-</sup>	1.4
Ba <sup>++</sup>	0.02	SiO <sub>2</sub>	3.5
Sr <sup>++</sup>	8.14	B	4.6

La unidad de OI tiene 11 bastidores, diseñados en una única etapa, con una capacidad de producción de agua cada uno de unos 12300 m<sup>3</sup>/día. Cada bastidor dispondrá de una bomba de alta presión, así como de un dispositivo de recuperación de energía mediante intercambio de presión equipado con bomba *booster*, como aparece en la figura 1. Los parámetros operativos, así como las variables de diseño que afectan directamente al consumo energético se presentan en la siguiente Tabla 2.

**Tabla 2. Parámetros operativos por bastidor**

Parámetros fijos			
Caudal de permeado	12300 m <sup>3</sup> /día	Edad de la membrana	5 años
Disminución deflujo por año	7%	Incremento de sales por años	7%
Elementos por tubo de presión	7	Factor de ensuciamiento	0.7
Parámetros variables			
Conversión	20-60%	Elemento de membrana	SWC5MAX
Flux promedio, l/m <sup>2</sup> h	11-17 lmh		SWC6MAX

Las dos membranas seleccionadas para el estudio son de la misma área y se diferencian en sus propiedades en cuanto a que la SWC5MAX es de alto rechazo de sales, mientras que la SWC6MAX es de alto flujo. De esta forma se podrá realizar una configuración híbrida alternativa.

También se analizará también como influyen los cambios de temperatura en el consumo energético con un incremento de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  sobre la temperatura de diseño.

Finalmente, se realizará una apreciación económica de los cambios producidos con las variaciones de los parámetros de diseño, de acuerdo con el trabajo de Wilf et al. (2007).

## 4. Resultados y discusión

Con el fin de poder comparar los resultados obtenidos con cada uno de los parámetros de diseño, se establecerá un valor de referencia, considerando las tendencias actuales en el diseño de plantas desaladoras, y teniendo en cuenta las especificaciones técnicas del fabricante de membranas. Así, se tomará una conversión,  $Y_{\text{ref}}=0.45$  y  $J_{\text{W global}}= 13.6 \text{ l/m}^2 \text{ h}$ .

### 4.1 Efecto de la conversión.

El intervalo analizado está comprendido entre el 20 y 60%, sabiendo de antemano que los valores extremos están fuera de las especificaciones del fabricante de membranas, tanto por razones técnicas como económicas. Se fija el flux de referencia y la membrana tipo empleada será la SWC5MAX.

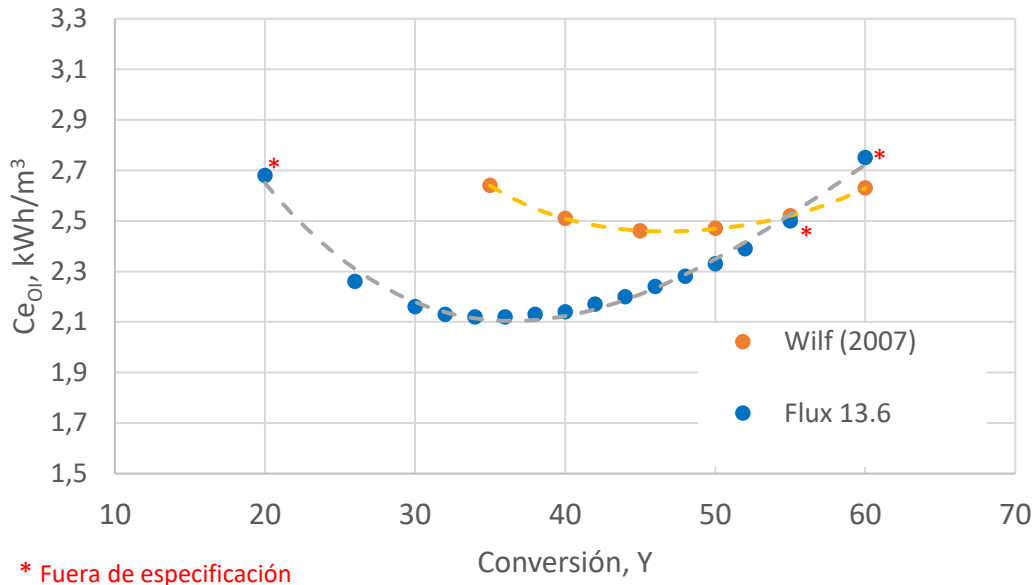
De acuerdo con la ecuación (1) del modelo de disolución-difusión para un flux de agua determinado, es la relación entre el gradiente de presiones y la permeabilidad del agua a través de la membrana, quien condiciona el consumo energético. Los valores de conversión elevados reducen el caudal de salmuera y por tanto, aumenta la concentración de sales en esta corriente y su presión osmótica. De esta forma, se debe aumentar la presión de bombeo a alta presión ( $\Delta P$ ) para mantener el flux de agua, con el consiguiente aumento del consumo de energía, representado en la figura 2 por el consumo específico en la unidad de  $\text{OI}$ ,  $\text{Ce}_{\text{OI}}$ .

A valores menores de conversión, también se aprecia en la figura 2 un aumento considerable de energía. En este caso, el caudal de salmuera es significativamente mayor, lo que provoca un aumento de la pérdida de carga en el tubo de presión que debe ser restaurada por la bomba *booster* del recuperador de energía, a ello se suma la necesidad de un mayor caudal en la bomba de alimentación de alta presión. Por tanto, es evidente que hay un valor óptimo de consumo de energía que el caso estudiado se sitúa en torno a al 36%.

En el gráfico de la figura 2 se han introducido los valores obtenidos por Wilf et al. (2007) adaptados a la temperatura del presente estudio. Se constata también la presencia de un valor óptimo de conversión en torno al 47%. Esta diferencia estaría justificada por la mejora de las prestaciones de las nuevas membranas con respecto a las de hace una década en términos de permeabilidad, de acuerdo con el trabajo de Fane, Wang y Hu (2015).

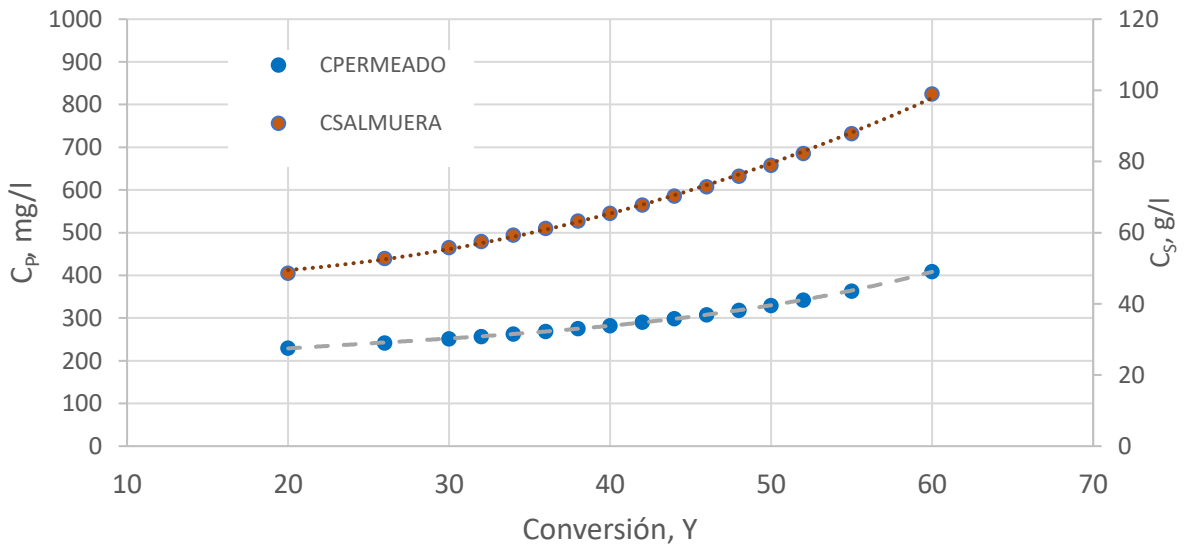
Por otra parte, la conversión provoca un efecto de concentración de sales en la corriente de salmuera al reducirse su caudal y mantenerse prácticamente el nivel de selectividad de la membrana. En la figura 3, se observa que los valores del agua desalada en el eje de la izquierda son propios de un agua de excelente calidad para todos los valores de conversión estudiados, mientras que en el caso de la salmuera se aprecia una elevada salinidad a valores altos de conversión, lo que representaría una dificultad añadida para la gestión y vertido de la salmuera al mar.

**Figura 2: Efecto de la conversión de agua sobre el consumo energético.**



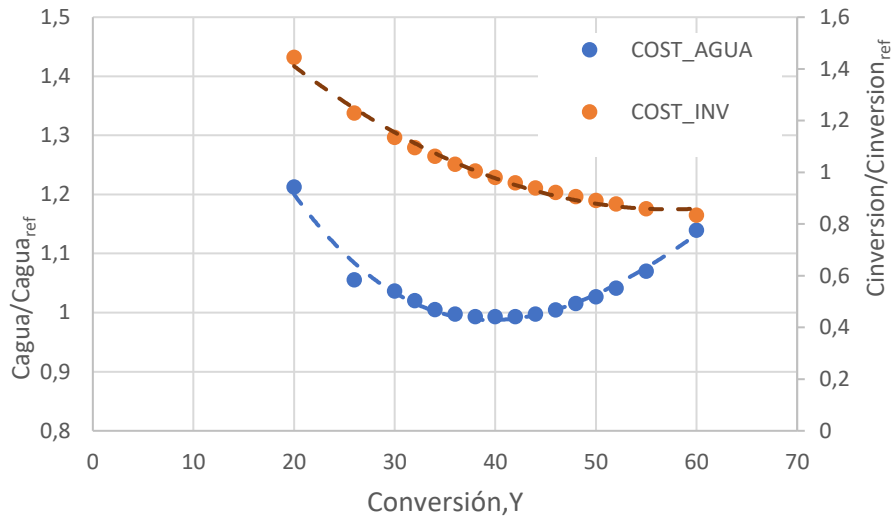
Finalmente, si analizamos los costes relativos de producción del agua, con respecto al diseño de referencia, encontramos que también aparece un óptimo en función de la conversión. Sin embargo, se ve desplazado a un valor mayor de la conversión ( $\approx 40\%$ ) que el obtenido para el consumo de energía como se observa en la figura 4. Esto es debido a la disminución del coste de inversión de la instalación al reducirse el tamaño de los equipos de bombeo y recuperación de energía por el efecto de compactación que tiene la conversión sobre ellos.

**Figura 3: Efecto de la conversión de agua la salinidad del permeado y la salmuera.**





**Figura 4: Efecto de la conversión sobre los costes del agua.**

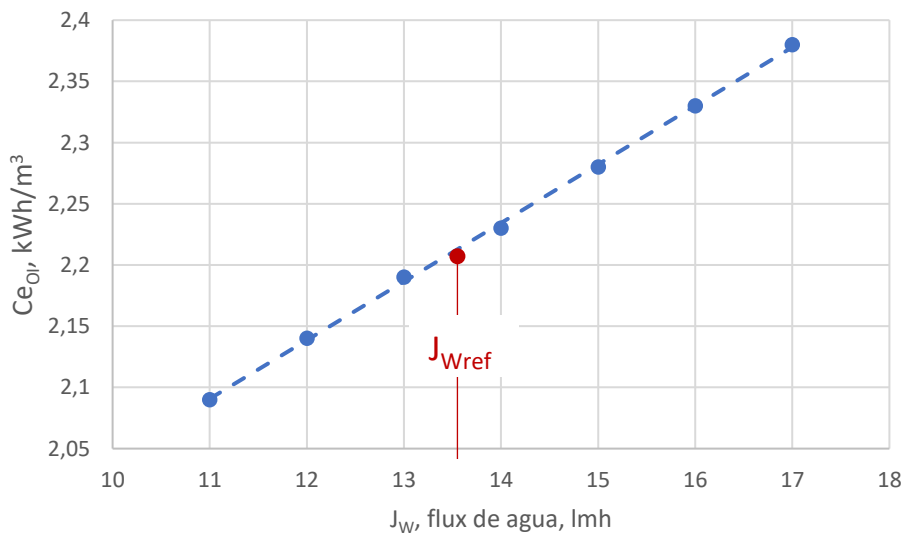


#### 4.2 Efecto del flux.

El flux de agua a través de la membrana es un parámetro crítico que se ve influenciado por la calidad del agua a tratar, así como por las condiciones operativas de presión, temperatura, velocidad tangencial y nivel de turbulencia sobre la superficie de la membrana. Por esta razón el fabricante de ésta considera una serie de valores limite que minimizan los ciclos de limpieza y alargan la vida útil dentro de los años que comprende la garantía de la membrana.

Los valores analizados de flux global de agua se muestran en la figura 5, para una variación sobre el valor de referencia recomendado por el fabricante, y a una conversión del 45%.

**Figura 5: Efecto del flux de agua sobre el consumo energía con Y=45%.**



Cuando el flux aumenta se produce un incremento de la presión aplicada, de acuerdo con la ecuación (1) y (3) del modelo presentado en el apartado 2, lo que justifica el aumento del consumo energético. Por otra parte, a valores de flux bajos, aunque el consumo energético disminuye, se requiere un mayor número de tubos de presión, es decir más área de membrana, para mantener el nivel de producción de agua fijado, lo que lleva a un aumento considerable de los costes de inversión que pueden llegar a alcanzar el 20%. Por otra parte, la disminución del flux, es una consecuencia del aumento del fenómeno de polarización por concentración, que facilita el paso de sales de acuerdo con la ecuación (2).

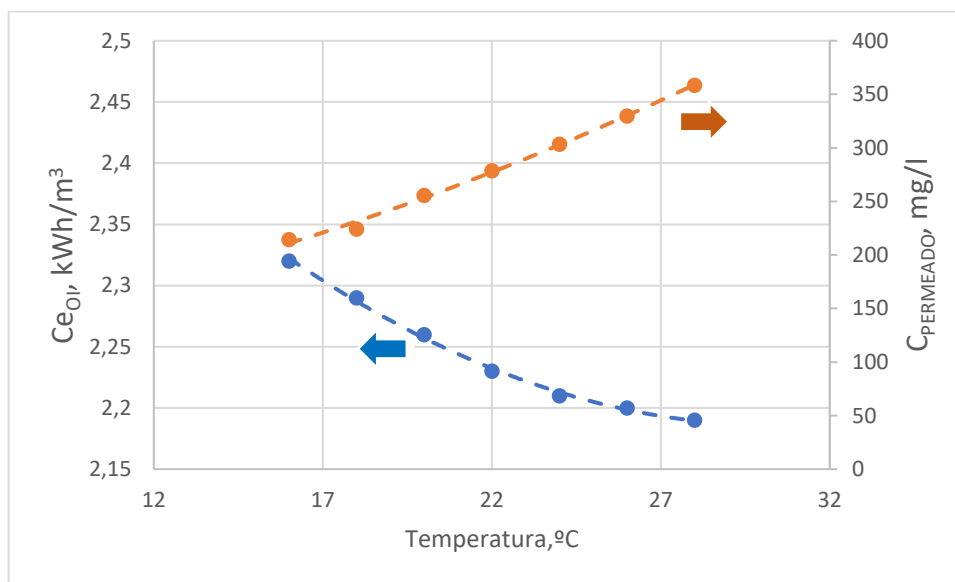
### 4.3 Efecto de la temperatura.

Aunque la temperatura de un medio natural no se puede controlar como los parámetros operativos de planta, es interesante evaluar su efecto sobre el funcionamiento de la osmosis inversa.

Es bien conocido que la permeabilidad en los procesos de transporte suele variar con la temperatura siguiendo una relación de tipo Arrhenius, y así ocurre en el caso de la osmosis inversa (Mulder 1996). Así, a mayor temperatura, el coeficiente de permeabilidad de la membrana aumenta, y de acuerdo con la ecuación (1) se requiere menor gradiente de presión para mantener el nivel de producción de agua. El efecto sobre el consumo de energía se ve reflejado en la figura 6, con una disminución de éste con la temperatura.

Además, cuando aumenta la temperatura, también aumenta el coeficiente de permeabilidad de las sales, y de acuerdo con la ecuación (2) aumenta el paso de éstas, disminuyendo la calidad del agua desalada.

**Figura 6: Efecto de la temperatura sobre el consumo energía con Y=45%.**



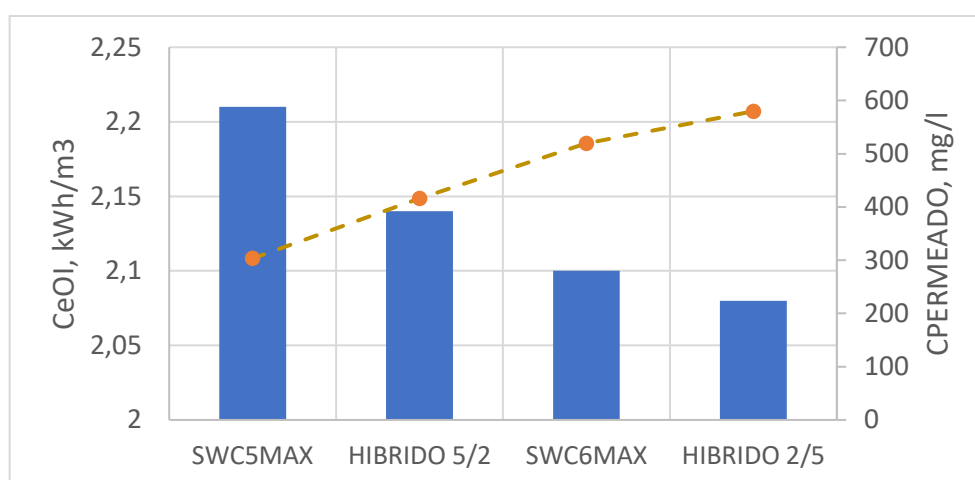
### 4.4 Efecto del tipo de membrana.

Cada vez más los fabricantes de membranas ofrecen diferentes tipos elementos para situaciones específicas dentro de un mismo proceso de desalación. Por esta razón se pueden mejorar los diseños mediante una selección adecuada de los elementos que se conectan en los tubos de presión en las etapas de osmosis inversa. En este caso, para comprobar el efecto de esta selección sobre el consumo de energía, se han planteado cuatro escenarios.

El primero, que se toma como referencia, y utiliza 7 elementos de la membrana SWC5MAX considerada de alto rechazo de sales. El segundo empleará la misma configuración con elementos del tipo SWC6MAX de alto flujo, y finalmente, los dos últimos representan una configuración híbrida con los 2 primeros elementos del tipo SWC6MAX y los cinco últimos del tipo SWC5MAX, viceversa.

En la figura 7, se observa que la configuración híbrida 2/5 es la que consume menos energía al requerir menor gradiente de presión hidráulica por la disposición de los elementos. Sin embargo, la calidad del agua desalada es sensiblemente menor, más del doble de salinidad, que la configuración con elementos de alto rechazo. En definitiva, los resultados muestran que es posible adaptar de una forma mas flexible el diseño de las instalaciones a las condiciones operativas requeridas para cada tipo de agua y para las especificaciones requeridas del agua desalada.

**Figura 7: Efecto de la temperatura sobre el consumo energía con Y=45%.**



## 5. Conclusiones

La desalación se presenta hoy en día como una alternativa madura para aumentar la disponibilidad de agua en muchas zonas del planeta que sufren escasez de recursos hídricos ocasionada por los denominados factores de presión, como el crecimiento demográfico y el cambio climático entre otros.

El sistema más utilizado para la producción de agua desalada es la osmosis inversa y la fuente mas segura es el agua de mar. Sin embargo, el consumo de energía de este proceso es una barrera para su desarrollo, a pesar de la reducción de éste en la última década, gracias a los avances tecnológicos en mejoras de las membranas y en los módulos de presión.

Con el objeto de analizar el efecto de los parámetros y variables de diseño del proceso se ha realizado un estudio comparativo para diferentes escenarios tomando como referencia las condiciones operativas de las plantas en funcionamiento.

Los resultados muestran que los valores de conversión actuales cercanos al 45% podrían disminuirse hasta el 40% con una reducción del consumo de energía cercana al 20%, lo cual podría reducir un 7% el coste de producción del agua. Con ayuda del modelo de disolución-difusión se ha demostrado que existe un valor óptimo de conversión para el menor consumo

de energía, que equilibra el exceso de presión osmótica a elevadas conversiones, y las pérdidas de carga cuando a baja conversión se aumenta en exceso el caudal de salmuera.

El efecto del flux sobre el consumo de energía es directamente proporcional, sin embargo, operar a flux bajos provocaría un aumento de los costes de inversión al necesitar más área de membrana. En este caso, suelen ser los fabricantes de membrana los que limitan el flux para evitar un mal funcionamiento de la membrana. La temperatura sobre el consumo de forma inversamente proporcional, si bien se empeora la calidad del agua a mayor temperatura. Por otra parte, las nuevas configuraciones híbridas permiten ajustar de forma más adecuada los elementos en los tubos de presión de acuerdo con las condiciones operativas para optimizar el consumo de energía.

Finalmente, queremos señalar que los resultados de este trabajo pueden ayudar a introducir algunas mejoras en los diseños actuales de plantas desaladoras atendiendo a reducir el consumo de energía, y mantener una calidad aceptable del agua desalada.

## 6. Referencias

- Attarde, D., Jain, M., & Gupta S.K. (2016). Modeling of a forward osmosis and a pressure-retarded osmosis spiral wound module using the Spiegler-Kedem model and experimental validation. *Separation and Purification Technology*, 164, pp.182–197. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.03.039>
- Bullock, A., Cosgrove, W., Van der Hoek W. & Winpenny, J. (2009). Getting out of the box - linking water to decisions for sustainable development. *World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World*. Paris: UNESCO, and London: Earthscan. pp 3-23 <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001819/181993e.pdf#page=29>
- Chen, C. & Qin, H. (2019). A Mathematical Modelling of the Reverse Osmosis Concentration Process of a Glucose Solution. *Processes*, 7, pp.271. DOI: 10.3390/pr7050271
- Cabrera, E., Estrela, T., & Lora J. (2019). Desalination in Spain. Past, present and future. *La Houille Blanche*, 1, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019011>
- Fane A.G., Wang, R. & Hu, M.X. (2015). Synthetic Membranes for Water Purification: Status and Future. *Angewandte Reviews* 54. *Water Purification Special Issue 150 Years of BASF*, pp. 3368–3386. DOI: 10.1002/anie.201409783
- IMSDesign (2020) <https://membranes.com/solutions/software-imsdesign/>
- Lonsdale, H.K, Merten, U. & Riley, R.L. (1965). Transport properties of cellulose acetate osmotic membranes. *J. Applied Polymer Science* 9, pp.1341–1362. <https://doi.org/10.1002/app.1965.070090413>
- Merdaw, A.A. Sharif, A.O. & Derwish G.A.W. (2010). Water permeability in polymeric membranes. Part II. *Desalination* 257 issues 1–3, pp. 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.02.013>
- Mulder, M. (1996). *Basic Principles of Membrane Technology*. Ed. Springer ISBN-10: 0792342488. DOI:10.1007/978-94-017-0835-7
- Shiklomanov, I. A. & Rodda J.C. (2003). *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. International Hydrology Series. Editorial Cambridge University Press.
- Voutchkov, N. (2018). “Energy use for membrane seawater desalination. Current status and trends”. *Desalination* 431, pp. 2-14. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.033
- Wilf M., Awerbuch, L. Bartels, C. Mickley, M. Pearce, G. & Voutchkov, N. (2007). *The Guidebook to Membrane Desalination Technology. Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems Process, Design, Applications and Economics*. Edition Balaban Publishers. ISBN-10: 0866890653

Zarzo, D. & Prats D. (2018). "Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future?" *Desalination.*, 427, pp.1-9.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.046>

**Comunicación alineada con los  
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

