



Nuevos avances en el desarrollo de la tecnología de destilación en membranas

Juan P. Pocostales Buenavida investigador senior de Abengoa

Rocío Rodríguez Aguilera investigadora senior de Abengoa

Abel Riaza-Frutos responsable técnico de Desalación de Abengoa

María del Carmen García Payo profesora titular de universidad, Facultad de Físicas, Universidad Complutense de Madrid

Mohamed Khayet Soauhaimi profesor titular de universidad, Facultad de Físicas, Universidad Complutense de Madrid e investigador del IMDEA Agua

Francisco Javier Bernaola Echevarría director de Abengoa Water Technologies de Abengoa

Víctor M. Monsalvo García director del Área Tecnológica de Agua de Abengoa

La destilación en membranas (DM) es un proceso prometedor de desalación basado en un mecanismo de separación no-isotérmico que permite poder trabajar a temperaturas más bajas que otros procesos de destilación. La DM permite alcanzar un elevado rechazo de sales a bajas presiones cuya eficacia no se ve afectada significativamente por la salinidad de la corriente a tratar. Esto hace que dicha tecnología sea especialmente atractiva para determinadas aplicaciones como la desalación de corrientes salinas para obtener agua de elevada calidad. Es especialmente apropiada para aplicaciones ambientales y en la industria química, petroquímica, alimentaria, farmacéutica y biotecnológica. Durante las últimas décadas, la DM ha sido ampliamente estudiada a escala laboratorio. Sin embargo, su aplicación industrial es aún limitada. Con estas premisas, Abengoa apuesta por una tecnología con un elevado potencial de mejora y aplicabilidad, desarrollando tecnología propia que actualmente está en periodo de evaluación a escala demostrativa.

Palabras clave

Salmuera, desalación, destilación, membrana, reutilización.

New advances in membrane distillation process

Membrane distillation (MD) is a promising non-isothermic desalination process that allows working temperatures lower than other distillation processes. MD is able to obtain high salt rejection at low working pressures and its efficiency is not significantly dependent of the salinity level of the stream to be treated. That makes MD technology very attractive for some specific applications where a saline effluent is treated to obtain high quality water. MD technology is especially appropriate for environmental applications and in certain industries like chemical, petrochemical, food, pharmaceutical and biotechnology. In the last few decades, MD has been widely studied at lab scale, though its industrial implementation is still scarce. On this basis, Abengoa supports this technology which presents a large room for improvement and applicability, through the development of its own MD technology, currently under evaluation at demonstrative level.

Keywords

Brine, desalination, distillation, membrane, reuse.



1. Introducción

El incremento demográfico y la creciente industrialización han acentuado la presión sobre los recursos hídricos, lo que ha conducido a problemas agudos de abastecimiento en gran parte del mundo para garantizar el consumo industrial, agrícola y doméstico. Además, la creciente actividad industrial lleva inexorablemente asociada un aumento en el volumen de residuos generados, si bien en los últimos años se han introducido mejoras en los procesos de producción encaminadas a su reducción o reutilización. Estos residuos, de no tratarse adecuadamente, terminan contaminando las aguas, lo que supone un potencial riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Las aguas constituyen uno de los sectores ambientales más comprometidos, debido a su relativa escasez y su uso intensivo, especialmente en las últimas décadas. Todo ello ha promovido el desarrollo e intensificación del uso de tecnologías de desalación como posible solución a este problema de ámbito global.

Una de las tecnologías más prometedoras es la destilación en membranas (DM), la cual consiste en un proceso de separación térmico cuya fuer-

za motriz o impulsora es la diferencia de presión de vapor a ambos lados de una membrana hidrófoba. Debido al carácter hidrófobo de las membranas empleadas en DM, el agua de la corriente acuosa a tratar no penetra hacia el interior de los poros y solo el vapor de agua puede atravesarla. El destilado generado se recoge al otro lado de la membrana, mientras sales y otras impurezas no volátiles son retenidas (**Figura 1**). La DM se distingue así de otros procesos de membranas en los que la membrana no es una parte activa en la separación y sirve únicamente como soporte de la interfase líquido/vapor [1-4].

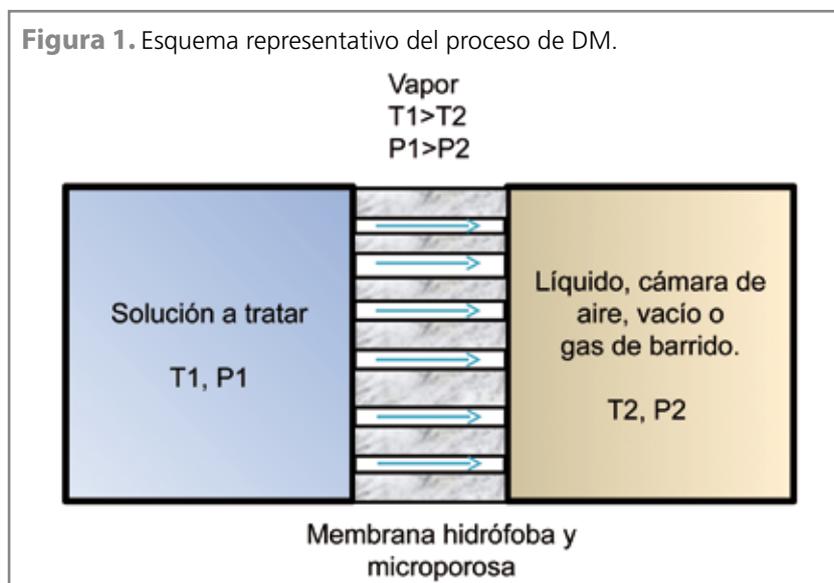
2. Membranas en DM y características de la tecnología

Las membranas en DM suponen la parte clave del proceso, estas presentan una elevada hidrofobicidad (repelen el agua, no se mojan), son microporosas y con un elevado volumen de poro. Además, es deseable que tengan una buena estabilidad térmica y resistencia química por lo que los materiales más utilizados son poliméricos como polipropileno (PP), polyvinylidene fluoride (PVDF) o polytetrafluoroetileno (PTFE, teflon) [5].

La DM como proceso de separación térmico posee una serie de características y ventajas que han despertado el interés de la comunidad científica e industrial en las últimas décadas y que la sitúan como una tecnología de desalación prometedora con un gran potencial por explorar. Entre sus ventajas más notorias y distintivas respecto a otros procesos de separación térmicos o de membranas destacan [6]:

- Temperaturas de operación óptimas entre 80 y 90 °C, aunque puede operar a temperaturas más bajas (50-60 °C). Ofrece un amplio rango de trabajo y permite el aprovechamiento de calor residual o el acoplamiento con fuentes de energías renovables.
- No precisa de pretratamientos intensivos.
- La ausencia de flujos a alta presión permite utilizar conducciones más delgadas y trabajar con materiales plásticos más económicos.
- Puede operar con corrientes de alta concentración salinas sin que esto repercuta significativamente en la calidad del permeado.
- Elevada flexibilidad para operar con un amplio intervalo de caudales.

Figura 1. Esquema representativo del proceso de DM.



Recientemente, los avances logrados en DM apuntan a una reducción significativa de los costes de inversión y de operación, lo que favorecerá su aplicación en algunos escenarios en los que las tecnologías más convencionales no resultan tan competitivas [7]. Aun así, la tecnología presenta una serie de desventajas que ocupan el objeto fundamental de los estudios en curso de la DM entre los que destacan evitar el mojado de la membrana, aumentar el flujo de permeado, aumentar la conversión del proceso y disminuir el consumo térmico.

2.1. Configuraciones de trabajo en DM

En DM existen distintas configuraciones de trabajo dependiendo fundamentalmente en la forma en la que se condensa el vapor:

- Contacto directo (CD). En esta configuración la membrana separa dos disoluciones acuosas mantenidas a diferentes temperaturas: una de alimentación y otra de refrigeración. La diferencia de temperaturas entre las disoluciones induce una diferencia de presiones de vapor a ambos lados de la membrana, lo que causa la evaporación de la corriente a tratar y pasa, en fase vapor, a través de sus poros al otro lado de la misma, donde condensa al mezclarse con la disolución de refrigeración. La principal ventaja de esta configuración es su simplicidad, por este motivo es la más utilizada en el ámbito académico. Sin embargo, su mayor desventaja es la ineficiencia energética asociada a la transmisión de calor por conducción a través de la membrana [8].

- Gas de barrido (GB). En este caso la membrana separa la cámara donde se alimenta la corriente a tratar de otra donde se circula una corriente de gas inerte a menor temperatura. De este modo, el agua que se evapora en la interfase líquido-vapor se arrastra por efecto del gas para posteriormente condensar fuera del módulo de DM, mitigando de esta forma las pérdidas energéticas del sistema [9].

- Cámara de aire (CA). En esta modalidad el sistema cuenta con una superficie fría instalada en el lado del permeado, dentro del módulo de membrana, donde dará lugar a la condensación del vapor producido en la interfase caliente líquido/membrana. El vapor, en este caso, cruza la membrana a través de sus poros, atraviesa la cámara estanca de aire y llega a la superficie fría donde

condensa. Hay que destacar que los flujos de permeado obtenidos empleando esta configuración son menores que con el resto de modalidades debido a la mayor resistencia a la transferencia de materia que causa la cámara de aire. No obstante, presenta una mayor eficiencia energética ya que se reducen las pérdidas de calor por conducción [10-11].

- Vacío (DMV). En este tipo de sistemas la membrana separa una cámara a la que se alimenta la corriente a tratar de otra donde se genera vacío. De este modo, el agua que se evapora en la interfase líquido-vapor es arrastrada por el circuito de vacío y condensada externamente mediante, por ejemplo, trampas de nitrógeno líquido, reduciéndose así las pérdidas energéticas del sistema y aumentando sensiblemente el flujo de masa. Sin embargo, esta técnica requiere un buen control de las condiciones de operación a fin de evitar que el vacío provoque que el líquido penetre en los poros de la membrana, lo que conduciría al fenómeno indeseado de 'mojado' de la membrana [12-13].

Cada una de las configuraciones presenta ventajas e inconvenientes diferenciadores y su elección depende de varios factores tales como las características de la corriente a tratar, calidad requerida del permeado, disponibilidad de fuente de calor, capacidad de producción deseada, etc.

Además de las distintas configuraciones de trabajo, en la DM pueden utilizarse distintos tipos de membrana dependiendo de la morfología de las mismas: membrana plana, capilar o fibra hueca. La gran mayoría de los módulos diseñados a escala de laboratorio hacen uso de sistemas *plate-and-frame* basados en membranas planas por la simplicidad de su fabricación y versatilidad.

Actualmente, los sistemas comerciales también usan mayoritariamente membranas planas en distintas configuraciones, ya sea en espiral o tipo *plate-and-frame*. Sin embargo, el uso de membranas de fibras huecas se presenta altamente atractivo para su implementación a escala industrial debido a la elevada superficie específica por volumen de módulo que pueden albergar.

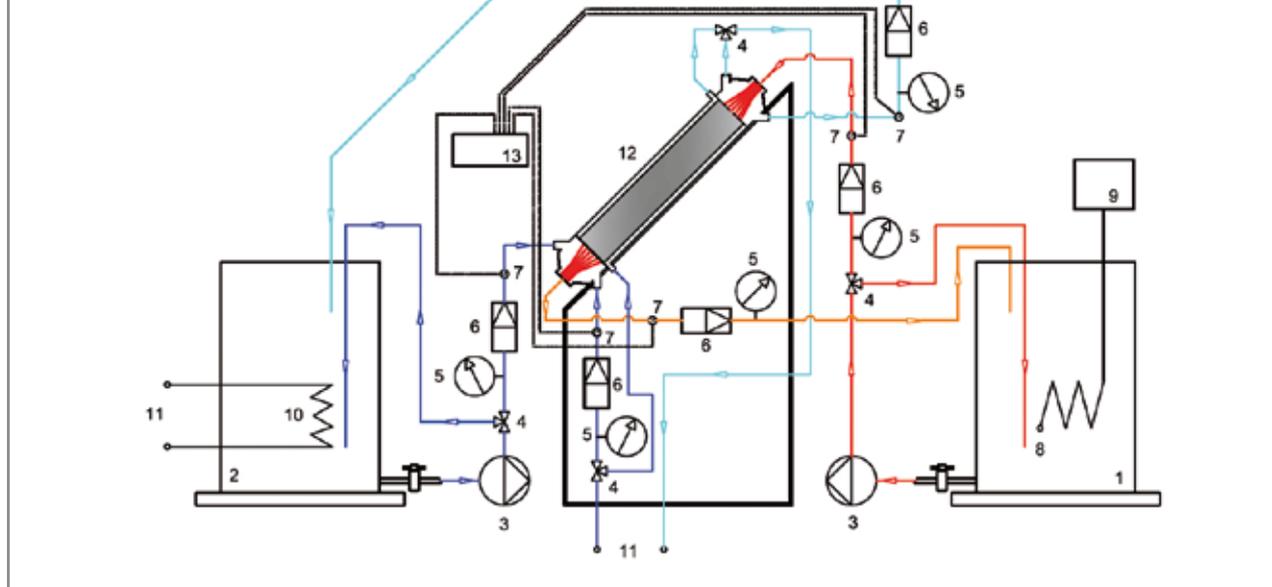
Abengoa apuesta por dicha configuración, para lo cual se ha trabajado intensamente en el desarrollo de un módulo de DM con membranas de fibra hueca (HOFI). La tecnología de Abengoa permite un elevado grado de empaquetamiento de las fibras y recuperación de energía interno que le confiere una elevada eficiencia térmica. Estos módulos de DM pueden trabajar tanto en serie como en paralelo dependiendo de cada caso, suponiendo un proceso modular cuyo número de unidades y disposición dependerá de la capacidad de producción requerida. Asimismo, HOFI está diseñado para poder trabajar en distintas configuraciones de DM dependiendo de la aplicación específica o de las fuentes de calor disponible.

2.2. Aplicaciones de la destilación en membrana

La destilación en membrana ha sido ampliamente estudiada y actualmente existen varios trabajos en los que se ha evaluado su aplicación para el tratamiento de corrientes de distinto origen y naturaleza, lo que ha permitido avanzar en su aplicación en industrias como la petroquímica, alimentación, farmacéutica, etc. [6]. Sin embargo, aún son pocos los casos de estudio a escala piloto, entre los que cabe destacar el trabajo de Qtaishat y Banatb (2013) en el que analizaron la viabilidad de su acoplamiento con energía solar [14].



Figura 2. Esquema de la instalación de la planta de pruebas DM en la configuración DMCD. Nota: 1 = depósito de alimentación; 2 = depósito de permeado; 3 = bombas centrífugas; 4 = llaves de tres bocas; 5 = manómetros; 6 = medidores de caudal; 7 = sondas de temperatura Pt100; 8 = resistencia térmica trifásica; 9 = relé y contactor; 10 = serpentín de refrigeración; 11 = circuito de refrigeración interno; y 12 = módulo de fibra hueca.



Inicialmente la DM nace como una alternativa para la desalación de agua de mar y salobre con la que producir agua de alta calidad, apta incluso para aplicaciones médicas o farmacéuticas, gracias a su elevada eficacia para el rechazo de sales y compuestos no volátiles [1]. En los últimos años se han explorado nuevas aplicaciones enfocadas al tratamiento de aguas de más elevada salinidad en las que no es viable el empleo de tecnologías convencionales de desalación. El objetivo de los trabajos más actuales sobre la aplicación de la DM es aumentar la producción de permeado, disminuir el volumen de corriente residual final y la reducción del coste de operación. Asimismo, dado que la DM puede trabajar a temperaturas relativamente moderadas presenta un gran potencial para la concentración de productos donde trabajar a elevada temperatura no suponga la degradación del alimento o algún compuesto del mismo. Este es el

caso de procesos de concentración de zumos, productos lácteos o la recuperación de aromas de concentrados [1].

Uno de los casos demostrativos más importantes del potencial de la tecnología es la planta piloto de DM construida por Abengoa en Ghantoot (Abu Dabi) en el contexto de un proyecto de colaboración con Masdar, en el cual se evalúa su viabilidad para el tratamiento de salmuera procedente de una planta de osmosis inversa, también propiedad de Abengoa [15]. Este pilotaje es actualmente uno de los más importantes a nivel mundial, tanto por la escala de la misma (más de 60 m³/día de producción de permeado) como también por su elevada eficiencia térmica. En este proyecto la DM permite un aumento en el grado de conversión global del proceso y disminuye el volumen de salmuera generado, demostrando la potencial sinergia para el acoplamiento de ambas tecnologías.

3. Materiales y métodos

En la **Figura 2** se muestra un esquema simplificado del sistema de pruebas diseñado para la evaluación del módulo de fibra hueca HOFI, en este caso operando con la configuración de contacto directo. El sistema de pruebas cuenta con un área de membrana de 0,26 m² y permite operar en las configuraciones de contacto directo, cámara de aire y vacío. El alimento (salmuera sintética 35 g/L de NaCl) se calienta en el depósito de alimentación (1) y se bombea al módulo donde se circula por el interior de las fibras (12) para ser devuelto de nuevo al tanque de alimentación. El permeado resultante se recircula en contracorriente al alimento (depósito 2), el cual a su vez se refrigera mediante un serpentín conectado a un sistema de refrigeración interno (circuito 11).

El permeado obtenido en el proceso se recoge mediante un capilar instalado en la pared del tanque de permeado (2) y se pesa para determi-

nar el flujo de producto. El permeado obtenido se devuelve al tanque de alimentación para evitar la concentración del alimento con el tiempo de operación. La planta de pruebas permite operar con caudales de alimentación y permeado de 5-10 L/min.

Los resultados respecto a la evaluación del módulo HOFI operando en tres configuraciones diferentes se muestran en la **Tabla 1**. Estos resultados son de gran utilidad para comparar el rendimiento de cada una de las configuraciones evaluadas y alcanzar conclusiones sobre la operación de cada una de ellas y su aplicabilidad para el tratamiento de corrientes de diferentes características.

El flujo transmembrana es el parámetro utilizado en DM para evaluar el rendimiento del sistema en términos de producción. Teniendo en cuenta que los tres experimentos se llevaron a cabo en las mismas condiciones de operación, las diferencias observadas se deben únicamente a la influencia de la configuración del sistema. El valor más alto de flujo transmembrana se obtuvo con la configuración de vacío (DMV). Esto se debe a que el vacío permite eliminar el aire existente en los poros de la membrana y se reduce así la resistencia a la transferencia de materia de las moléculas de vapor a través de esta.

Por otro lado, la configuración de cámara de aire (CA) es la que presenta el menor valor de flujo transmembrana, un 51% más bajo que DMV. Esto se debe a que en CA el aire existente en los poros de la membrana así como en la propia cámara ejerce una importante resistencia a la transferencia de materia al paso del agua en forma de vapor a través de la membrana. Finalmente, la configuración de contacto directo (CD) presenta un valor de flujo intermedio, aunque un 32% inferior al observado en DMV.

Tabla 1. Flujo de permeado y temperaturas de operación en distintas configuraciones de trabajo estudiadas durante el periodo experimental del módulo de DM.

Configuración	T _{alimentación} (°C)	Flujo (LMH)	T _{rechazo} (°C)
Contacto directo (CD)	60 +/-1	5,3	52,5
Cámara de aire (CA)	60 +/-1	3,8	57,6
Vacío (DMV) (0,3 bar)	60 +/-1	7,7	55,1

En la verificación del tipo de configuración más adecuada para una aplicación específica es importante tener en cuenta criterios de eficiencia energética. Por este motivo, en la **Tabla 1** también se muestran las temperaturas de entrada y salida del módulo de la corriente tratada, lo que puede emplearse como parámetro indicador del aprovechamiento energético. Los resultados indican que, en términos de consumo térmico, la configuración más adecuada es CA, la cual presenta una diferencia de solo 2,0 °C entre ambos extremos, frente a los 4,5 °C de DMV y los 6,8 °C de CD. Podría pensarse que esa menor diferencia de temperatura se debe solo al hecho de ser menor la cantidad de agua que se evapora de la alimentación. No obstante, estudios más extensos han demostrado que este hecho se debe a la mayor resistencia a la transmisión de calor que caracteriza este tipo de configuración. Por otra parte, CD es la configuración con el mayor consumo térmico de las 3 estudiadas. Esto se debe a las importantes pérdidas de calor por conducción que tienen lugar a través de la membrana.

Por último, es importante destacar que, aunque la configuración de vacío presenta el valor más alto de flujo transmembrana y un valor intermedio en términos de consumo térmico, no hay que olvidar que esta configuración requiere también de

cierto consumo eléctrico asociado a la generación de vacío que no tienen las otras configuraciones.

Los resultados obtenidos indican que la selección de la configuración óptima depende de muchos factores entre los que destaca la temperatura de la corriente a tratar o, en su defecto, la disponibilidad de calor. Si se dispone de una fuente de calor más o menos ilimitada la configuración de CD podría ser la óptima pues podría dar una capacidad de producción adecuada sin introducir la complejidad técnica de hacer vacío y condensar el producto exteriormente, caso de la DMV. Por el contrario, si la fuente de calor es muy limitada, habrá que optar por una configuración más eficiente térmicamente. En cualquier caso, la selección de la configuración más adecuada, vendrá dada en último término por el análisis técnico-económico [16].

En este sentido, el módulo desarrollado por Abengoa supone un gran avance en tecnología de DM ya que, entre otras ventajas, permite operar en diferentes configuraciones. Este diseño de gran versatilidad permite incluso adaptar el sistema a posibles cambios en el escenario para el que sea inicialmente diseñada la planta de DM, como podría ser situaciones de mayor o menor disponibilidad de calor. A su vez, esto podría ser de gran utilidad para su acoplamiento con fuentes intermitentes de calor como la energía solar.



4. Conclusiones

La DM es una tecnología de desalación ampliamente estudiada a escala laboratorio en las últimas décadas. Sin embargo, son aún escasos los ejemplos de implementación a escala industrial. La tecnología presenta una serie de ventajas como su robustez para el tratamiento de corrientes con diferente contenido salino, la temperatura moderada de operación, el elevado rechazo de sales y la elevada calidad del producto. Esto hace de la tecnología una alternativa especialmente competitiva para el tratamiento de efluentes de elevada salinidad, especialmente si se tratan corrientes cálidas o se cuenta con una fuente de calor residual.

Abengoa ha apostado por el desarrollo de tecnología de DM propia que permita exprimir al máximo las posibilidades técnicas y de aplicaciones de la misma, consiguiendo un

producto competitivo que permita la gestión sostenible de corrientes salinas y la obtención de agua de elevada calidad.

Bibliografía

- [1] Lawson, K.W.; Lloyd, D.R. (1997). Review: membrane distillation. *J. Membrane Sci.*, núm. 124; págs. 1-25.
- [2] El-Bourawi, M.S.; Ding, Z.; Ma, R.; Khayet, M. (2006). Review: A framework for better understanding membrane distillation separation process. *J. Membrane Sci.*, núm. 285; págs. 4-29.
- [3] Khayet, M. (2008). Membrane distillation. In: N.N. Li, A.G. Fane, W.S.W. Ho, T. Matsuura, (Eds.). *Advanced Membrane Technology and Applications*. John Wiley & Sons, Inc, New York (Estados Unidos), cap. 5, págs. 297-370.
- [4] Schofield, R.W.; Fane, A.G.; Fell, C.J.D. (1987). Heat and mass transfer in membrane distillation. *J. Membrane Sci.*, núm. 33, págs. 299-313.
- [5] Khayet, M.; Mengual, J.I.; Zakrzewska-Trznadel, G. (2005). Direct contact membrane distillation for nuclear desalination: Part I- Review of membranes used in membrane distillation and methods for their characterization. *Int. J. Nuclear Desalination*, núm. 1(4); págs. 435-449.
- [6] Khayet, M.; Matsuura, T. (2011). Chapter 1 - Introduction to Membrane Distillation, In *Membrane Distillation*. Edited by Mohamed Khayet/Takeshi Matsuura, Elsevier, Amsterdam, (Holanda), págs. 1-16.
- [7] Peng, W.; Tai-Shung, C. (2015). Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring. *Journal of Membrane Science*, núm. 474, págs. 39-56.
- [8] Izquierdo-Gil, M.A.; García-Payo, M.C.; Fernández-Pineda, C. (1999). Direct contact membrane distillation of sugar aqueous solutions. *Sep. Sci. & Tech.*, núm. 34, págs. 1.773-1.801.
- [9] Basini, L.; D'Angelo, G.; Gobbi, M.; Sarti, G.C.; Gostoli, C. (1987). A desalination process through sweeping gas membrane distillation. *Desalination*, núm. 64, págs. 245-257.
- [10] Izquierdo-Gil, M.A.; García-Payo, M.C.; Fernández-Pineda, C. (1999). Air gap membrane distillation of sucrose aqueous solutions. *J. Membrane Sci.*, núm. 155, págs. 291-307.
- [11] García-Payo, M.C.; Izquierdo-Gil, M.A.; Fernández-Pineda, C. (2000). Air gap membrane distillation of aqueous alcohol solutions. *J. Membrane Sci.*, núm. 169; págs. 61-80.
- [12] Bandini, S.; Saavedra, A.; Sarti, G.C. (1997). Vacuum membrane distillation: experiments and modelling. *AIChE J.*, núm. 43(2), págs. 398-408.
- [13] Li, B.; Sirkar, K.K. (2005). Novel membrane and device for vacuum membrane distillation-based desalination process. *J. Membrane Sci.*, núm. 257, págs. 60-75.
- [14] Qtaishat, M.R.; Banatb, F. (2012). Desalination by solar powered membrane distillation systems. *Desalination*, núm. 308; págs. 186-197.
- [15] Bernaola, F.J.; Revuelta, E.A.; Pocostales, J.P.; Rodríguez-Aguilera, R.; Fernández-Alonso, V. (2015). Advanced and innovative seawater desalination pilot plants. Conference proceedings International Desalination Association, San Diego (Estados Unidos).
- [16] Rodríguez-Aguilera, R.; Pocostales, J.P.; Riaza-Frutos, A.; Bernaola, F.J. (2013). Techno-economical comparison of air gap and direct contact membrane distillation. Conference proceedings International Desalination Association, Tianjin (China).

EN WWW.TECNOAQUA.ES ENCONTRARÁ
MUCHOS MÁS ARTÍCULOS TÉCNICOS
Y OTRAS INFORMACIONES DE SU INTERÉS

SÍGANOS EN TWITTER: [@TECNOAQUA](https://twitter.com/TECNOAQUA)