

**ENERGÍA OSMÓTICA:  
UNA RENOVABLE PROMETEDORA  
EN DESARROLLO**

Discurso leído en el acto de su recepción como  
*Académico Numerario* por

**Dr. D. Sebastián Delgado Díaz**

el día 20 de julio de 2017



**ENERGÍA OSMÓTICA:  
UNA RENOVABLE PROMETEDORA  
EN DESARROLLO**



**ENERGÍA OSMÓTICA:  
UNA RENOVABLE PROMETEDORA  
EN DESARROLLO**

Discurso leído en el acto de su recepción como  
*Académico Numerario* por  
**Dr. D. Sebastián Delgado Díaz**  
el día 20 de julio de 2017

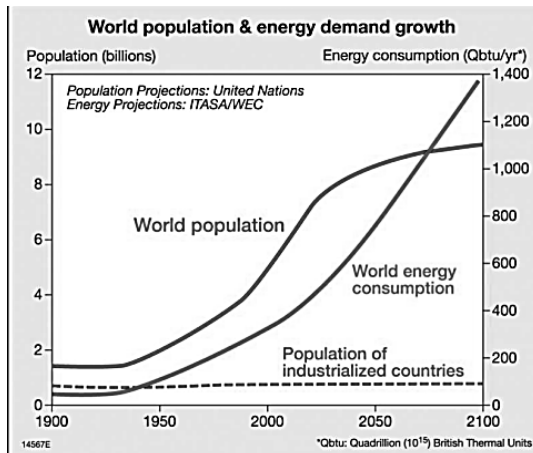
**Arrecife (Lanzarote), Hotel Lancelot Playa**



Excmo. Sr. Presidente de esta Academia  
Señoras y Señores Académicos  
Señoras y Señores todos,  
Buenas tardes

## ***Introducción***

El consumo mundial de energía, durante el siglo XX, seguía una tendencia casi directamente proporcional al crecimiento de la población. Sin embargo, durante este siglo XXI las previsiones de demanda energética hasta el año 2100 auguran un crecimiento mucho más que proporcional con el crecimiento demográfico (United Nations, Energy Projections. ITASA/WEC).

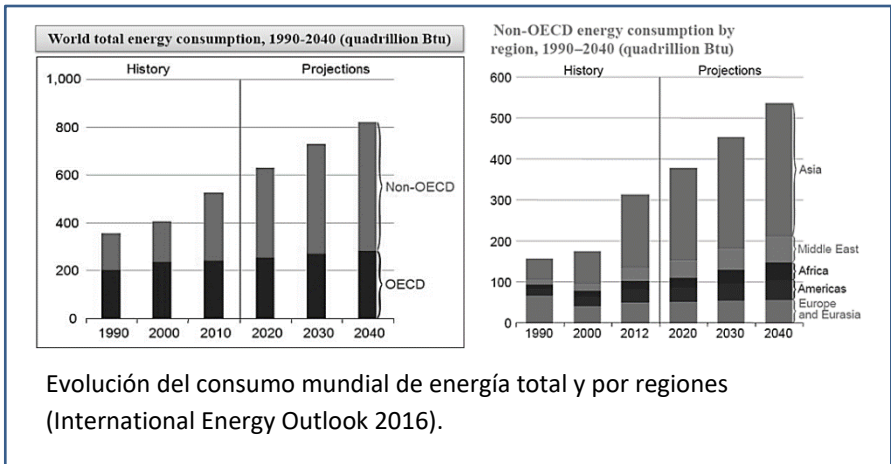


El análisis más detallado de la demanda energética global, y su tendencias futuras,

establece una gran diferencia entre el consumo actual y previsto en los países pertenecientes a la OCDE y en los no pertenecientes a esta organización, o dicho de otra manera, países industrialmente desarrollados y países en desarrollo.

Mientras en los primeros se aprecia un ligero aumento de demanda energética, en los segundos la tendencia prevista de consumo se hace casi exponencial (EIA, International Energy Outlook 2016).

Los estudios prospectivos indican que la previsión de crecimiento demográfico en Asia es muy superior a la de otros países (UN, World Urbanization Prospects, 2011); si a esta situación se le agrega la expansión económica y la legítima aspiración social de mejora de nivel de vida, se comprende la previsión de la demanda energética creciente por encima de otros países. Hoy en día se considera que la demanda energética es un buen indicador del desarrollo o progreso de las naciones.





En el análisis de tendencias, la clase de energía de mayor demanda en los próximos años será la electricidad, considerada por los consumidores como combustible limpio en el punto de uso, si bien también es cierto que en la actualidad más de mil millones de personas, principalmente en India, África y ciertas partes de Asia en desarrollo, no tienen acceso a la electricidad (BP Energy Outlook, 2017).

En los Estados Unidos de América, el sector eléctrico alcanzó casi el 40% del total de la demanda de energía en 2015 (Política energética de los Estados Unidos, 2105).

El nuevo escenario energético mundial, en el que los mercados tradicionales de demanda energética están siendo superados claramente por los emergentes de rápido crecimiento económico, lleva consigo un cambio importante en la búsqueda y gestión de nuevas fuentes de energía, impulsado por las mejoras tecnológicas y por la preocupación ambiental, lo que obliga a una adaptación a la nueva situación.

La producción de energía se está viendo afectada por el cambio climático, en cuyo origen intervienen diversos factores entre los cuales figura la presencia en la atmósfera de gases de efecto invernadero, que conducen a un calentamiento global de consecuencias ya conocidas. Entre los gases conocidos de efecto invernadero aparece el metano y el dióxido de carbono, pero es este último el que se puede someter a un control de emisión más fácilmente, dado que la mayor parte proviene de la combustión de combustibles fósiles convencionales para la producción de energía.

La reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> será lenta y paulatina a medida que se vayan sustituyendo las fuentes de combustibles fósiles (contienen carbono en su composición) por otras alternativas más

limpias, de tipo renovable, al mismo tiempo que se adaptan y mejoran de tecnologías para su aplicación a la producción de energía.

## ***Las energías renovables***

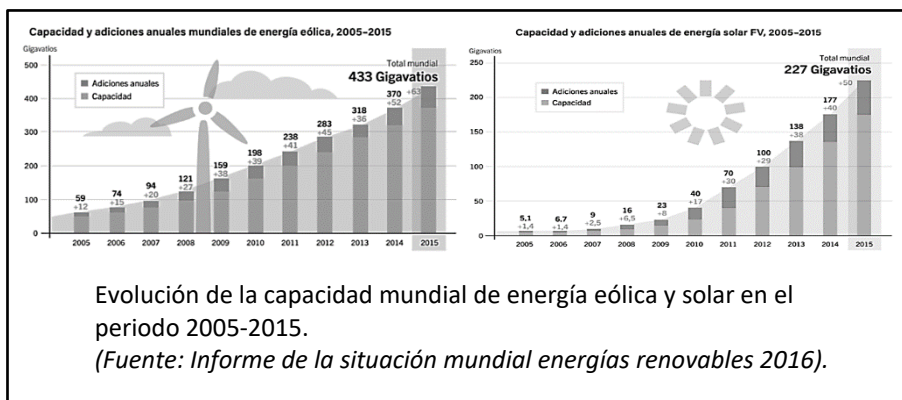
Como ya es bien conocido, las energías renovables proceden de fuentes teóricamente inagotables y de bajo o nulo contenido en carbono. No producen gases de efecto invernadero y sus costes evolucionan a la baja de forma sostenida.

Entre las energías renovables, también denominadas energías limpias, encontramos:

- Energía eólica: la energía que se obtiene del viento
- Energía solar: la energía que se obtiene del sol. Las principales tecnologías son la solar fotovoltaica (aprovecha la luz del sol) y la solar térmica (aprovecha el calor del sol)
- Energía hidráulica o hidroeléctrica: la energía que se obtiene de los saltos de agua de los ríos y corrientes de agua dulce
- Energía geotérmica: la energía calorífica contenida en el interior de la Tierra
- Energía mareomotriz: la energía que se obtiene del movimiento de las mareas
- Energía undimotriz u olamotriz: la energía que se obtiene de las olas del mar
- Biomasa y biogás: la energía que se extrae de materia orgánica
- Bioetanol: combustible orgánico que se obtiene mediante procesos de fermentación de productos vegetales, apto para uso en automoción

- Biodiésel: combustible orgánico para automoción, entre otras aplicaciones, que se obtiene a partir de aceites vegetales.

La energía eólica y la energía solar, especialmente la fotovoltaica, han experimentado un gran avance en los últimos años, como se puede observar en la evolución de consumo mundial en el periodo 2005-2015, haciéndose cada vez más competitiva frente a las energías convencionales (Informe de la situación mundial energías renovables 2016).



La comunidad internacional ha dado un respaldo importante a la transición hacia una economía baja en carbono por el futuro sostenible del planeta, como se ha demostrado con el ‘Acuerdo de París’ suscrito en la Cumbre Mundial del clima celebrada en diciembre de 2015 en la capital francesa.

Aunque a corto plazo se mantendrá el ajuste continuo del mercado del petróleo, y que el gas natural crecerá algo más rápido que el petróleo, los considerables progresos conseguidos en las mejoras y

competitividad de las energías renovables hará que, junto con la energía nuclear y la hidroeléctrica, podrán proporcionar casi la mitad del aumento de la demanda energética global prevista hasta el año 2035 (BP, Energy Outlook 2017).

### ***La energía osmótica o del gradiente salino***

Una de las energía renovables muy poco conocida, por no estar ampliamente comercializada a nivel industrial, pero con grandes posibilidades de futuro, es la energía osmótica.

La energía osmótica, también denominada energía del gradiente salino o energía azul, es la resultante de la mezcla de corrientes de agua con diferentes concentraciones de sales disueltas, tales como agua dulce y agua de mar o agua dulce y una salmuera.

La cantidad teórica máxima de energía que se puede obtener del gradiente salino se calcula utilizando la termodinámica, y viene dada por la “energía libre de Gibbs” o energía de mezcla, aplicable a la mezcla de disoluciones ideales. Representa la diferencia entre el potencial químico de la mezcla resultante y el de las disoluciones de partida.

La energía libre de mezcla se puede calcular de forma explícita a través de parámetros medibles en las disoluciones a mezclar (K. Nijmeijer et al., 2010), según la ecuación:

$$\Delta G_{mix} = [c_{i,c} V_c RT \ln(x_{i,c}) + c_{i,d} V_d RT \ln(x_{i,d}) - c_{i,b} V_b RT \ln(x_{i,b})]$$

donde,

$\Delta G_{mix}$  = energía libre de Gibbs de mezcla, J/mol

$c_i$ , = concentración del componente i en la disolución, mol/litro

$V$  = volumen de la disolución, litros

$R$  = constante universal de los gases, 8,314 J/mol K

$T$  = temperatura absoluta, K

$x_i$ , = fracción molar del componente i en la disolución

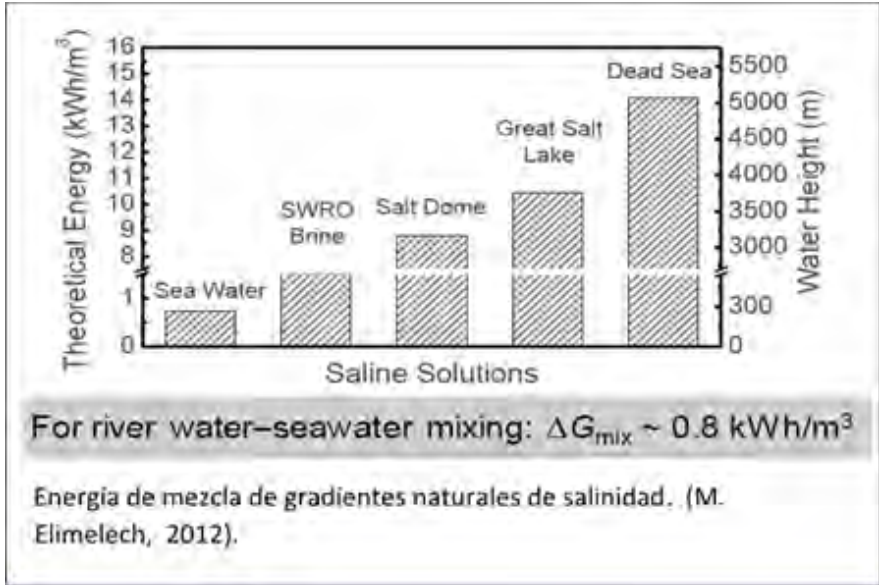
Los subíndices b, c y d se refieren a la disolución mezcla resultante, a la disolución concentrada y a la disolución diluida, respectivamente.

Esta energía libre es la máxima teórica disponible al mezclar dos disoluciones salinas de diferentes concentraciones; depende de temperatura de operación, de los volúmenes mezclados y de la diferencia de concentración entre las dos disoluciones.

En la desembocadura de los ríos en el mar se produce energía debido al gradiente salino, la cual puede ser aprovechada si se aplica la tecnología adecuada. La energía global teórica se estima en unos 2,6 TW, lo que representa un 20% de la demanda energética total mundial, y corresponde a la segunda fuente de energía renovable del mar (energía de las olas, 2,7 TW; energía del gradiente térmico marino, 2 TW; energía de las corrientes marinas, 0,05 TW; energía de las mareas, 0,03 TW) (OCEANS 2003, Proceedings, Vol 4).

Según Elimelech (M. Elimelech, 2012), la energía teórica derivada de la mezcla de agua de río con agua de mar es de 0,8 KWh/m<sup>3</sup>, cantidad que se puede incrementar cuando la diferencia de salinidad entre las aguas es mayor; para mezcla de agua de río con agua

del mar muerto se puede alcanzar hasta 14 KWh/m<sup>3</sup>, como se representa en la figura.



Por otra parte, si se tiene en cuenta que el caudal total de agua de río vertida al mar en el planeta es del orden de 37300 km<sup>3</sup>/año, y si se aprovechara el 10% de este caudal para producir energía se obtendrían unos 1370 TWh/año, equivalente al consumo eléctrico de unos 520 millones de personas y un ahorro de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera de más de mil millones de toneladas/año (M. Elimelech et al. 2012); (I. L. Alsvik. Norwegian University of Science and Technology (www.ntnu.no)).

Por sus características, la energía del gradiente salino se considera una energía renovable, y su contribución en el conjunto de las

energías puede ser muy importante en un futuro próximo; las estimaciones más optimistas establecen que la energía osmótica puede alcanzar una cuota de más del 16% en el conjunto de fuentes de energía, lo que permitirá reducir hasta un 40% los gases de efecto invernadero (J.W. Post. 2009).

No obstante, la mezcla de agua de río y agua de mar se aleja de una situación ideal, no solamente por la compleja composición química del agua de mar, sino también por las limitaciones tecnológicas susceptibles de extraer la energía de mezcla, que hará que la energía aprovechable represente una pequeña fracción de la energía teórica termodinámica.

### ***Tecnologías de aprovechamiento de la energía osmótica***

Si bien existen varios métodos para el aprovechamiento de la energía del gradiente de salinidad o energía osmótica, son dos las tecnologías más prometedoras y ampliamente estudiadas, basadas en membranas selectivas:

- La Electrodialisis Inversa (RED, por sus siglas inglesas)
- La Ósmosis Retardada por Presión (PRO, por sus siglas inglesas)

Con ambas tecnologías la energía de mezcla se convierte en energía eléctrica. En la RED, mediante un proceso electroquímico, y en la PRO mediante un proceso osmótico que da lugar a un trabajo mecánico que acciona una turbina acoplada a un generador eléctrico.

Cada una de estas tecnologías tiene su propio campo de aplicaciones. La concentración de sales en el agua salina influye en el rendimiento de la tecnología aplicada. LA RED presenta un mayor rendimiento en la generación de energía eléctrica con la mezcla de agua de río y agua de mar, mientras el proceso PRO incrementa su rendimiento con la mezcla de agua de río con aguas más concentradas en sales que el agua de mar, como puede ser la salmuera procedente de la desalinización de agua de mar por ósmosis inversa, o situaciones equivalentes.

### ***Electrodiálisis Inversa (RED)***

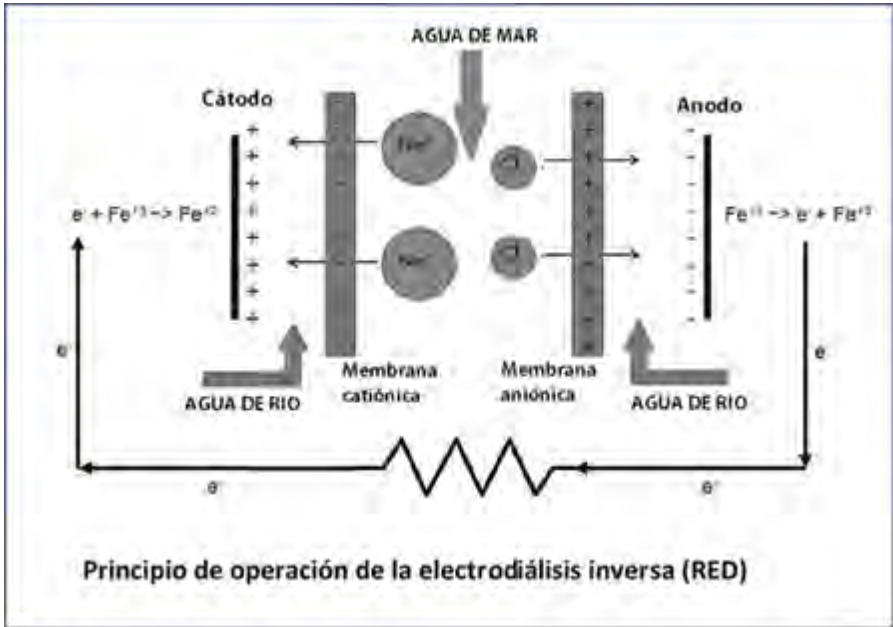
La electrodiálisis inversa es un proceso electroquímico que hace uso de membranas selectivas de intercambio iónico, catiónicas y aniónicas, para generar una corriente eléctrica sobre los electrodos colocados en los extremos de una pila de membranas alternantes, catiónicas y aniónicas, entre las cuales fluye agua dulce y agua salada.

La membrana catiónica, que por la composición química de su estructura contiene cargas eléctricas negativas, resulta permeable a los iones con carga positiva (cationes) y rechaza a los iones de carga negativa. De la misma forma, la membrana aniónica contiene en su composición química cargas positivas, con lo cual permite el paso de los iones negativos y rechaza los iones positivos.

Si un par de membranas, aniónica y catiónica, separa agua salina de agua dulce, se produce un transporte iónico desde el agua salina hacia el agua dulce, a través de ambas membranas, para alcanzar el equilibrio químico, dando lugar a un potencial eléctrico entre las



membranas, denominado potencial de membrana. Al conjunto de una membrana aniónica y otra catiónica que separa las disoluciones concentrada y diluida se le denomina “par de celda”.



Los iones transportados tienden a descargarse en los electrodos metálicos, ánodo y cátodo, mediante el intercambio de electrones derivados de una reacción de oxidación-reducción. En el caso indicado en la figura, los iones cloruro y sodio transportados a través de las membranas se descargan en los electrodos de hierro que están conectados por un circuito externo por el que fluye una corriente de electrones (corriente eléctrica) derivada de la reacción de oxidación-reducción del hierro.

Para una disolución acuosa concentrada de ClNa y otra diluida de la misma sal, separadas por un par de celda de membranas ideales de intercambio iónico (totalmente selectivas para el ion sodio y cloro), el potencial teórico de celda viene dado por la ecuación de Nernst:

$$\Delta V = \frac{2RT}{zF} \ln\left(\frac{C_c}{C_d}\right)$$

donde,

$\Delta V$  = potencial del par de celda en circuito abierto, voltios

R = constante de los gases, 8,314 J/mol.K

T = temperatura absoluta, K

Z = valencia electroquímica (en este caso para el ClNa igual a 1)

F = constante de Faraday, 96485 cul/mol

C<sub>c</sub> = concentración de ClNa en disolución concentrada, mol/litro

C<sub>d</sub> = concentración de ClNa en disolución diluida, mol/litro

Dado que la diferencia del potencial químico de las disoluciones concentrada y diluida genera el voltaje en el par de celdas de las membranas selectivas, la diferencia de potencial eléctrico global del sistema viene dado por el número de pares de celdas que intervienen en el proceso.

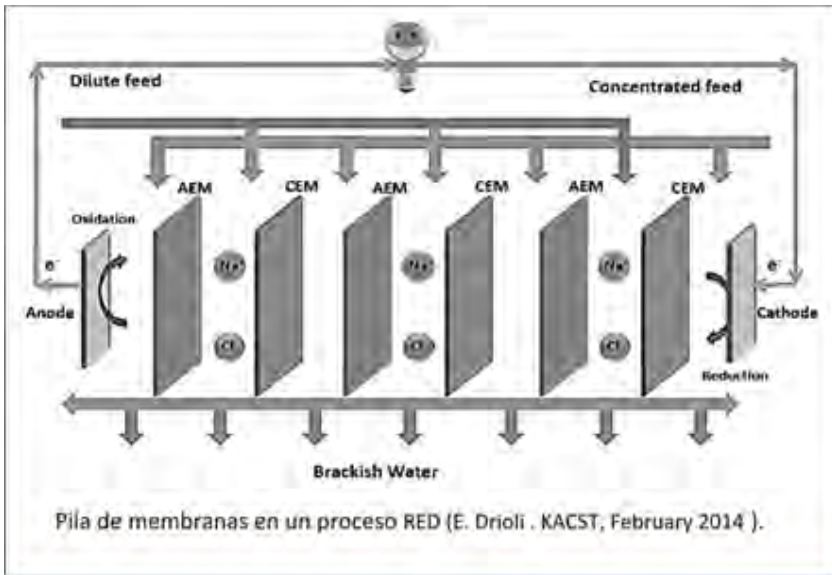
La potencia eléctrica teórica externa suministrada por el par de celda, W en vatios, se puede calcular teniendo en cuenta la carga o resistencia óhmica externa, R<sub>e</sub>, y la de la celda, R<sub>c</sub>, en ohmios.

$$W = [\Delta V / (R_e + R_c)]^2 R_e$$

En un sistema real, la potencia eléctrica entregada a la carga exterior es inferior a la teórica, y se puede expresar como potencia

específica relativa al volumen de cada disolución, vatios/m<sup>3</sup>, o a la superficie total de las membranas, vatio/m<sup>2</sup> membrana.

Los sistemas experimentales y comerciales del proceso RED se compone de una pila de pares de membranas (aniónicas y catiónicas) separadas entre sí por un dispositivo aislante (separador) que permite el paso de las disoluciones entre las mismas. En los extremos se colocan los electrodos metálicos.



De esta forma, el gradiente de salinidad se convierte en energía eléctrica en el proceso RED. Los sistemas experimentales, la mayoría a escala de laboratorio, que utilizan membranas comerciales actuales, han permitido comprobar que para agua de mar y agua de río, la potencia específica alcanzada es del orden de 0,40 vatios/m<sup>2</sup>, pero si se utiliza

una salmuera, en vez de agua de mar, con agua de río se puede alcanzar una potencia específica de 1,2 vatios/m<sup>2</sup>.

Teóricamente, la energía específica media generada por un proceso RED es de 0,47 KWh/m<sup>3</sup>, que equivale a 1,7 MJ/m<sup>3</sup>, cuando se mezcla agua de río con un volumen igual de agua de mar (E. Drioli, 2014).

### ***Prototipos del proceso RED***

Si bien la mayoría de la información aportada procede de estudios teóricos y experimentales a escala de laboratorio, en estos últimos años se ha tratado de verificar el comportamiento de este tipo de proceso en condiciones reales, a través del diseño, construcción y puesta en operación de plantas piloto equipada con sistemas de medida y control equivalente a lo que sería una planta comercial.

Entre las plantas piloto instaladas en los últimos años, cabe citar la descrita por (M. Tedesco et al., 2016), instalada en Sicilia, Italia, compuesta por 125 pares de celdas, con superficie total de membranas de 50 m<sup>2</sup>. Se alimenta con una salmuera concentrada (aguas madres de un proceso de cristalización de sal en unas salinas) con una concentración de 4-5 molar de ClNa equivalente, y agua salobre con concentración de 0,03 molar de ClNa equivalente, procedente de un pozo cercano.

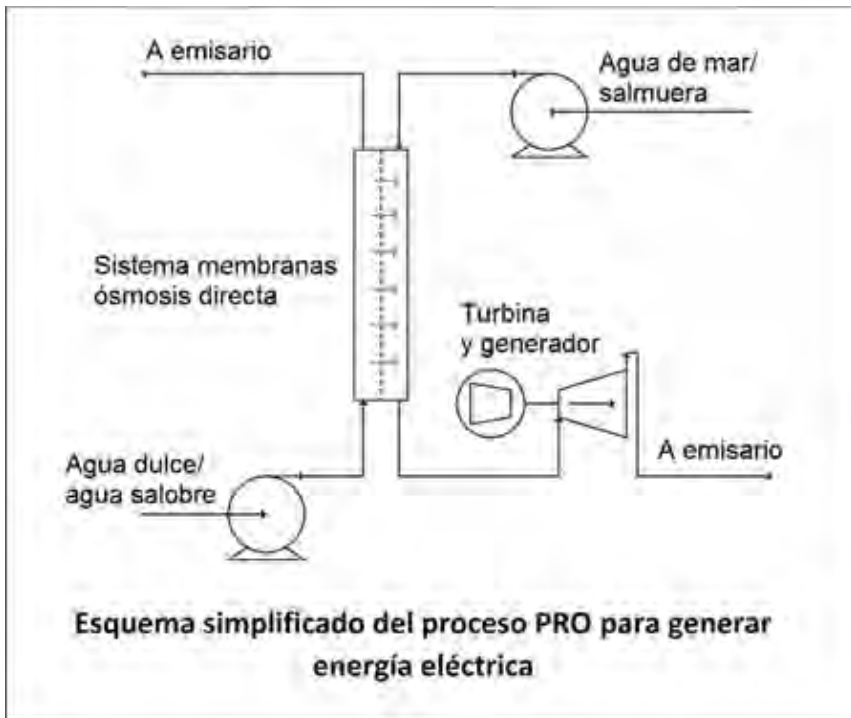
Durante cinco meses de operación la planta suministró una potencia de unos 40 vatios (1,6 vatios/m<sup>2</sup> de par de celdas) y no se destacaron problemas importantes de comportamiento por

ensuciamiento de las membranas.

Otra planta piloto con proceso RED está instalada en Holanda. Se alimenta con agua de mar (28 g sales/litro) y agua de un lago (0,2-0,5 g sales/litro), con caudales de diseño de 220 m<sup>3</sup>/h para cada tipo de agua, y puede suministrar una potencia global de 50 KW (J.W. Post et al., 2010).

### ***Ósmosis retardada por presión (PRO)***

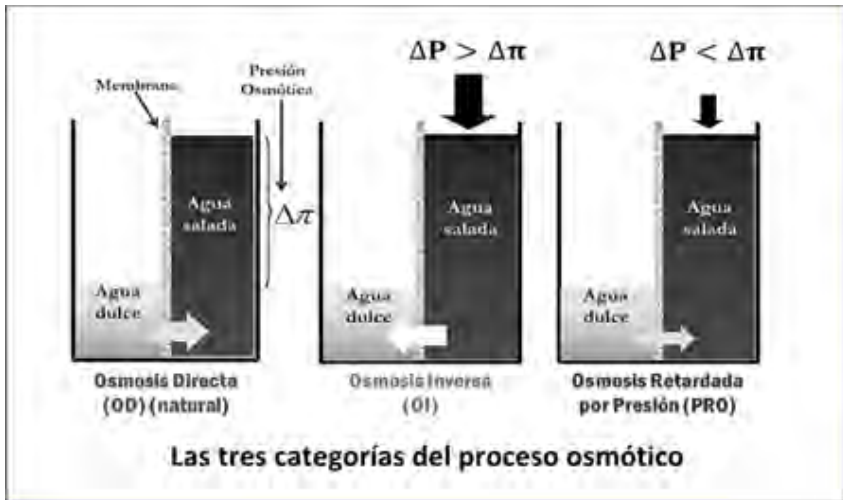
Este proceso se basa en el uso de una membrana semipermeable, que permite el paso de agua y no de sales, para separar una disolución concentrada en sales (agua de mar o una salmuera) de otra disolución diluida (agua dulce o agua salobre) aprovechando el mecanismo de ósmosis natural o directa. A través de este mecanismo, el gradiente salino existente entre las dos disoluciones constituye una fuerza impulsora para el transporte de agua desde la diluida hasta la concentrada hasta alcanzar el equilibrio de potencial químico. Si la cámara que contiene la disolución concentrada se mantiene a volumen constante, se produce un incremento de presión suficiente para actuar sobre una turbina, la cual mueve un generador que produce energía eléctrica. El esquema simplificado del principio del proceso se indica en la figura siguiente.



El proceso de ósmosis retardada por presión es una variante de los procesos osmóticos, intermedio entre la ósmosis directa y la ósmosis inversa. Las membranas selectivas semipermeables utilizadas permiten el paso de agua y rechazan las sales que contienen.

Cuando una membrana de este tipo separa dos disoluciones salinas de diferente concentración, por ejemplo agua dulce y agua salada, se produce un transporte de agua cuya dirección y caudal depende de la presión que actúa en la superficie libre de las

disoluciones.



Cuando la presión en la superficie de las dos disoluciones es la misma, se produce un transporte de agua desde la disolución diluida hacia la concentrada; es el mecanismo de ósmosis directa o natural. Este transporte cesa cuando se alcanza el equilibrio de potencial químico. La presión hidráulica alcanzada en la disolución concentrada, en ese instante, por encima de la diluida constituye la presión osmótica de dicha disolución,  $\Delta\Pi$ . A la diferencia de presión entre ambos lados de la membrana se le denomina presión transmembrana,  $\Delta P$ .

Cuando en la disolución concentrada se aplica una presión  $\Delta P > \Delta\Pi$  se produce un transporte de agua hacia la disolución diluida, ósmosis inversa, cuyo caudal depende de la diferencia ( $\Delta P - \Delta\Pi$ ).

Cuando en la disolución concentrada  $\Delta P < \Delta \Pi$ , el flujo de agua será desde la disolución diluida hacia la concentrada, ósmosis directa, pero su caudal se ve disminuido o retardado por el efecto de la presión  $\Delta P$ . A este efecto se le denomina ósmosis retardada por presión (PRO).

Admitiendo que el valor más alto de la presión transmembrana,  $\Delta P$ , está aplicada a la disolución concentrada, la fuerza impulsora responsable del transporte de agua a través de la membrana viene dado por la diferencia  $(\Delta P - \Delta \Pi)$ . Su signo establece la dirección del flujo de agua y su valor determina el caudal por unidad de superficie de membrana,  $J_w$ .

Para  $(\Delta P - \Delta \Pi) > 0$ , el proceso es una ósmosis inversa

Para  $(\Delta P - \Delta \Pi) = 0$ , el proceso está en equilibrio y no se produce proceso osmótico

Para  $(\Delta P - \Delta \Pi) < 0$ , el proceso es una ósmosis retardada por presión (PRO)

En proceso PRO, la densidad de flujo de agua, o caudal específico por unidad de superficie de membrana, desde la disolución diluida hacia la concentrada viene dada por

$$J_w = A(\Delta \Pi - \Delta P)$$

donde A es un coeficiente dependiente de las características de la membrana.

La potencia energética específica, W, expresada en vatios/m<sup>2</sup>, como consecuencia del flujo de agua, viene dada por

$$W = (J_w)(\Delta P) = A(\Delta \Pi - \Delta P)(\Delta P)$$

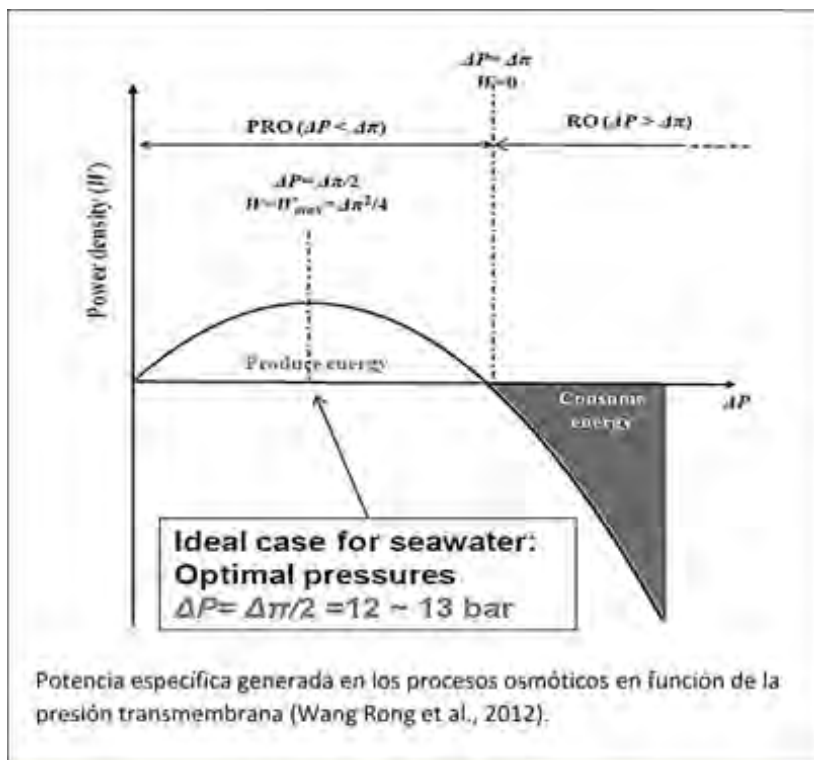


Por tanto, para una membrana y un par de disoluciones dada, la potencia energética generada en el proceso PRO es una función cuadrática de la presión transmembrana,  $\Delta P$ . La representación gráfica de la energía específica,  $W$ , en función de  $\Delta P$  corresponde a una parábola que pasa por un máximo a una  $\Delta P$  determinada.

El valor máximo se alcanza para

$$\Delta P = \Delta \Pi / 2$$

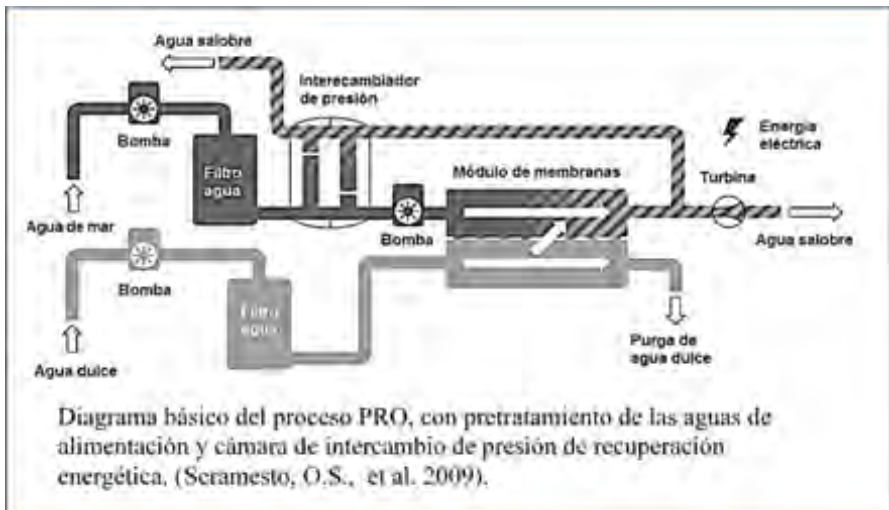
y la energía específica máxima será:  $W = W_{\max} = (\Delta \Pi)^2 / 4$



Para el caso particular de agua de mar, cuya presión osmótica es del orden de los 24-26 bares, la presión óptima de operación será de 12-13 bares (Wang Rong et al., 2012).

Los procesos prácticos incluyen sistemas de pretratamiento de las corrientes de alimentación, tales como filtros, con objeto de reducir en ensuciamiento de las membranas y prolongar su vida útil; asimismo, al igual que en los procesos de ósmosis inversa para desalinización de agua de mar, se recupera parte de la presión de la corriente mezcla no usada en la turbina como energía suplementaria para la impulsión de agua de mar.

Un esquema simplificado del proceso, que incluye los elementos citados, se presenta en la figura siguiente (Scramesto, O.S. et al., 2009).



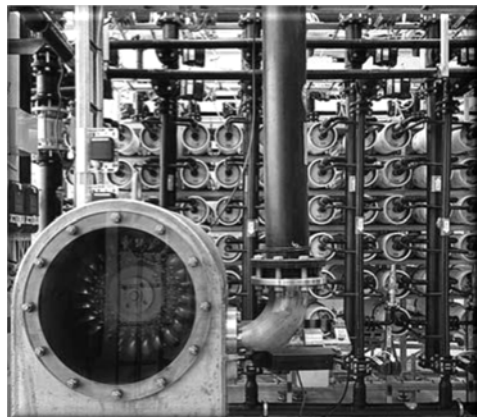
Las estimaciones sobre eficacia global del proceso PRO, basadas en datos de laboratorio y en equipos a escala piloto, indican que la mezcla resultante de agua de mar (35 g/l de ClNa equivalente) con agua de río (88 mg/l de ClNa equivalente) produciría una energía libre máxima teórica de 0,75 KWh/m<sup>3</sup>.

Sin embargo, las restricciones prácticas de la operación proporcionan una eficacia de proceso de un 60%, con lo cual la energía obtenida queda reducida a 0,45 KWh/m<sup>3</sup>; admitiendo unas pérdidas del orden del 20% y un consumo energético del pretratamiento de unos 0,15 KWh/m<sup>3</sup>, resulta que la energía final obtenida en el proceso PRO sería de 0,2 KWh/m<sup>3</sup>, esto es, casi la cuarta parte de la energía teórica prevista (M. Elimelech, 2012).

### ***Prototipo del proceso PRO***

El primer prototipo del mundo del proceso PRO fue instalado en Noruega, en el año 2009, por la empresa Statkraft, con la finalidad de verificar la viabilidad técnica y económica del proceso, con vistas a una comercialización a gran escala para el año 2015.

La planta fue diseñada para una potencia teórica de 10 KW, admitiendo que se podía alcanzar una eficacia de 5 W/m<sup>2</sup> de membrana



a lo largo de su vida operativa.

Se utilizaron inicialmente membranas convencionales de acetato de celulosa, adaptadas al proceso PRO, en módulos de 8 pulgadas y arrollamiento en espiral, con una superficie total de membranas de 2000 m<sup>2</sup>.

Alimentación continua de agua de mar, con caudal de 20 l/s, y de agua dulce, con caudal de 10 l/s, ambas sometidas a un pretratamiento de tamizado y posterior ultrafiltración para prevenir el ensuciamiento de las membranas.

La presión transmembrana establecida fue de 12 bares.

El prototipo fue equipado con una turbina Pelton acoplada a un generador eléctrico, así como de dispositivos de recuperación de energía, semejantes a los utilizados en los procesos de ósmosis inversa para desalinización de agua de mar, pero adaptados a la baja presión de operación del proceso PRO.

Durante la primera fase de operación de la planta, los resultados obtenidos se alejaron de los previstos en el diseño, sobre todo por el comportamiento y eficacia de las membranas utilizadas, alcanzando potencias específicas del orden de 1W/m<sup>2</sup> y potencia global real de unos 2 KW, pero después de un proceso de optimización de membranas se alcanzó una eficacia 10 veces superior y abrió grandes expectativas para un nuevo proyecto internacional de una potencia de 1-2 MW, previsto poner en marcha hacia 2015.

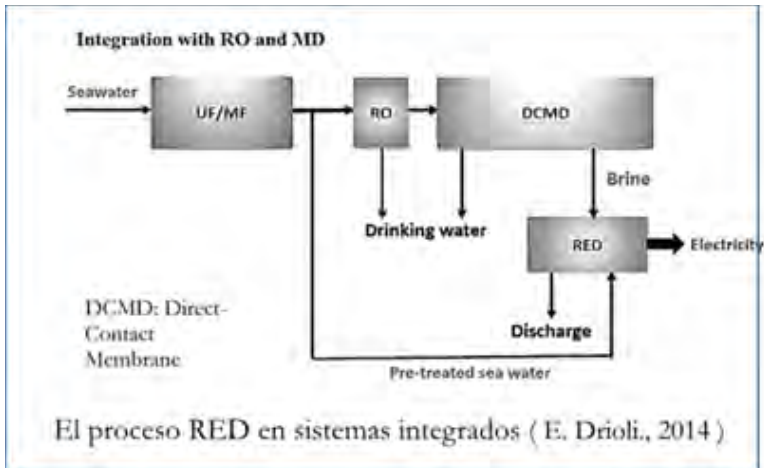
Sin embargo, el análisis económico del proceso implicó un retraso en el proyecto de ampliación a escala comercial, a la espera del desarrollo de membranas más adecuadas para hacer completamente competitivo el proceso frente a otras tecnologías existentes para la producción de energía eléctrica (S. E. Skilhagen, Statkraft AS, 2012).

### ***La energía osmótica en los sistemas integrados***

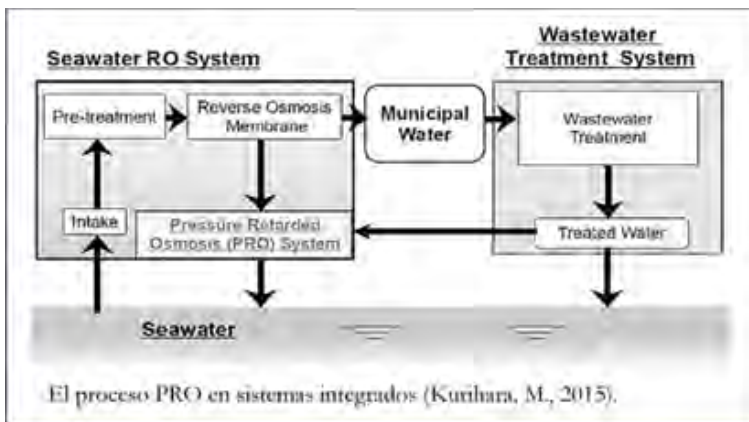
Los procesos osmóticos RED y PRO tienen también aplicación en sistemas que generan corrientes acuosas que dan lugar a un gradiente salino, como es el caso de la desalinización de agua de mar, que produce una corriente de salmuera, y una planta de regeneración de aguas residuales, que produce una corriente de agua dulce. Ambas corrientes pueden constituir la alimentación de un proceso RED o PRO para producir energía eléctrica, aprovechable en ambas plantas.

Estos sistemas integrados constituyen un potencial interesante para el aprovechamiento de corrientes residuales mediante una transformación parcial en energía, al tiempo que se reduce el impacto de las salmueras en los procesos de desalinización de agua de mar.

En las siguientes figuras se presentan los esquemas básicos de algunos sistemas integrados. En el primero, el gradiente salino lo proporciona el agua de mar y una salmuera de un proceso de ósmosis inversa concentrada mediante un proceso de destilación con membranas por contacto directo (E. Drioli., 2014).



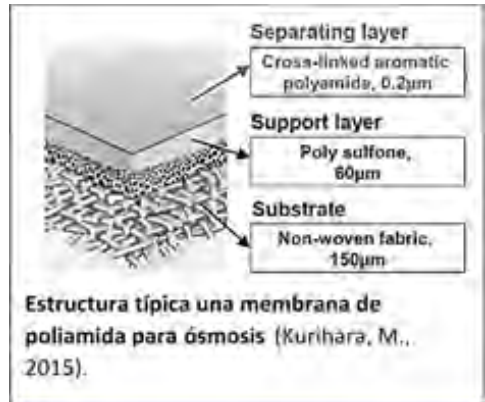
El segundo sistema integrado está formada por una planta desalinizadora de agua de mar, por ósmosis inversa, y una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas. Un proceso PRO actúa como sistema de integración entre la salmuera de la ósmosis inversa y la corriente de agua residual tratada (Kurihara, M., 2015).



## *Avances en tecnología de membranas*

Una de las grandes limitaciones actuales de la comercialización de plantas osmóticas para generar energía eléctrica radica en las membranas. Por una parte, el bajo flujo de agua que proporcionan las membranas convencionales más eficientes encarece considerablemente el coste de inversión de una planta de proceso PRO; por otra parte, el ensuciamiento de las membranas reduce de forma importante su permeabilidad, lo que hace necesario un pretratamiento de las aguas que alimentan el proceso, con la consiguiente pérdida de su eficacia global.

De forma análoga, el proceso RED también está muy limitado por la eficiencia de las membranas de intercambio iónico utilizadas en la actualidad, con potencias específicas (vatios/m<sup>2</sup>) muy bajas, y con ello poco competitivas frente a otras alternativas comerciales.



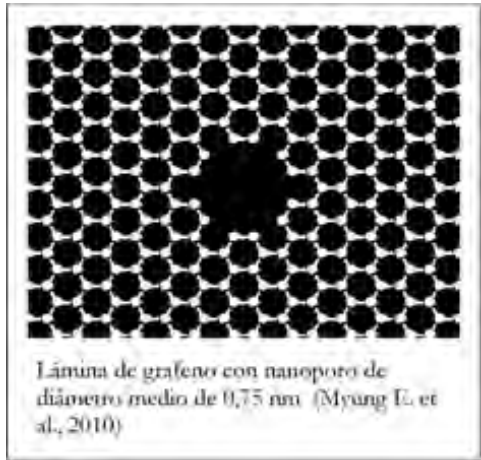
Se debe tener en cuenta que las membranas comerciales actuales, generalmente de poliamida, utilizadas para procesos de ósmosis, presentan una estructura en capas que da lugar a una resistencia importante al paso de agua (baja permeabilidad), que se traduce en una baja potencia específica (vatios/m<sup>2</sup>) para generar energía eléctrica en un proceso PRO. Por ello, en los últimos años se está haciendo un gran esfuerzo, a nivel de I+D, para encontrar y desarrollar una nueva generación de membranas selectivas capaces de

proporcionar altos flujos de agua y alta selectividad frente a componentes de una disolución.

Los estudios más prometedores sobre membranas de nueva generación se han orientado principalmente a dos líneas de trabajo:

- El uso de la nanotecnología y los nuevos materiales en la fabricación de membranas específicas.
- El estudio de las membranas celulares para fabricar membranas biomiméticas que tengan un comportamiento semejante a las naturales.

En el primer grupo figuran estudios de laboratorio con membranas a base de grafeno con nanoporos artificiales, o el uso de nanotubos de carbono o de nitruro de boro que actúan como canales iónicos. El paso de iones a través de estos nanoporos genera una corriente eléctrica aprovechando el gradiente salino de dos líquidos de distinta



salinidad separados por la membrana con nanoporos, con eficacias del orden de hasta 1000 veces superior a las membranas convencionales actuales (Myung E. et al., 2010); (F. Macedonio et al., 2012); (Sholl and Johson, 2006).

Recientemente se han aportado resultados de experimentos de laboratorio con una membrana muy delgada de disulfuro de molibdeno,



de unos tres átomos de espesor, provista de un nanoporo de dimensiones controladas, interpuesta entre dos disoluciones salinas de diferente concentración. Los datos obtenidos mostraron que este tipo de membrana es capaz de proporcionar potencias específicas muy superiores a las conseguidas con las membranas convencionales actuales. Según sus autores (Jiandong Feng, et al., Nature, 2016), de los datos de laboratorio se puede predecir que una membrana de disulfuro de molibdeno, con un 30% de su superficie cubierta de nanoporos, podría proporcionar energía osmótica con una potencia específica de 1 MW/m<sup>2</sup>.

Las membranas biomiméticas, actualmente en desarrollo, tratan de imitar el comportamiento específico de las membranas celulares. Haciendo uso de la nanociencia y nanotecnología se ha llegado a fabricar membranas que incorporan acuaporinas en su capa activa, imitando el comportamiento de esta proteína existente en las membranas celulares, como canal específico para el transporte de agua entre el exterior y el interior de las células.

Los flujos de agua que se pueden alcanzar con esta nueva generación de membranas puede ser unas 1000 veces superior al que consigue con las membranas convencionales actuales (J. Gunderson, 2014).



## *Futuro de la energía osmótica*

Las perspectivas de futuro de la energía osmótica son muy optimistas, pero están condicionadas al desarrollo de nuevas membranas de alta eficacia en cuanto a permeabilidad y selectividad para el agua y alta resistencia al ensuciamiento, objetivo que puede alcanzarse en los próximos años dado el avance en el desarrollo de nuevos materiales aplicables a la fabricación de membranas de nueva generación.

En el horizonte de 2020, la previsión del coste de la energía osmótica le sitúa en unos 50-100 euros/MWh, que corresponde a la franja media del resto de las energías renovables (S. E. Skilhagen, 2012).

## *Conclusiones*

- Se ha despertado el interés internacional por las plantas osmóticas para generar electricidad limpia.
- Existen altas expectativas de incrementar la potencia eléctrica generada con nuevas membranas.
- Se están realizando grandes esfuerzos en I+D para fabricar membranas altamente eficaces para estos procesos.
- Las membranas de nueva generación, tales como las de nanotubos de nitruro de boro, las de disulfuro de molibdeno con nanoporos controlados, o las biomiméticas que incorporan acuaporinas, podrían ser el gran avance esperado para el desarrollo comercial de este tipo de plantas.

## REFERENCIAS

- United Nations, Energy Projections. ITASA/WEC.
- EIA, International Energy Outlook 2016.
- UN, World Urbanization Prospects, 2011.
- BP Energy Outlook, 2017.
- Política energética de los Estados Unidos, 2105.
- Informe de la situación mundial energías renovables, 2016.
- K. Nijmeijer and S. Metz, “Salinity Gradient Energy,” in Sustainability, Science and Engineering, Twente, Elsevier, 2010.
- OCEANS 2003, Proceedings, Vol 4.
- M. Elimelech, The 3rd Osmosis Membrane Summit, Barcelona, Spain, April 26-27, 2012.
- M. Elimelech et al. Environmental Science & Technology, 2012.
- L. Alsvik. Norwegian University of Science and Technology (www.ntnu.no)).
- J.W. Post. Ph D thesis, Wageningen University, Netherland, 2009.
- E. Drioli. KACST, February 2014.
- M. Tedesco, et al., J. Membrane Science 500 (2016) 33–45.
- J.W. Post, et al, Desalin. Water Treat. 16 (2010) 182–193.
- Wang Rong et al. 3rd Osmosis Membrane Summit, Barcelona, 2012.
- Scramesto, O.S., et al. Waterpower XVI, Spokane, WA, USA, 27-30, July 2009.
- Stein Erik Skilhagen. Head of Osmotic Power, Statkraft AS (2012).

- Kurihara, M. “Mega-ton Water System Project”. DESALTECH, August 2015.
- Myung E. Suk and N. R. Aluru. J. Phys. Chem. Lett. 2010.
- F. Macedonio et al. Chem. Eng. & Processing, 2012.
- Sholl and Johson, Science, 2006.
- Jiandong Feng, et al., Nature, 536, August 2016.
- Jeff Gunderson. Industrial Water World Articles (22-7-2014)

**COLECCIÓN:**  
**DISCURSOS ACADÉMICOS**

Coordinación: **Dominga Trujillo Jacinto del Castillo**

1. *La Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote en el contexto histórico del movimiento académico.* (Académico de Número). **Francisco González de Posada**. 20 de mayo de 2003. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
2. *D. Blas Cabrera Topham y sus hijos.* (Académico de Número). **José E. Cabrera Ramírez**. 21 de mayo de 2003. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
3. *Buscando la materia oscura del Universo en forma de partículas elementales débiles.* (Académico de Honor). **Blas Cabrera Navarro**. 7 de julio de 2003. Amigos de la Cultura Científica.
4. *El sistema de posicionamiento global (GPS): en torno a la Navegación.* (Académico de Número). **Abelardo Bethencourt Fernández**. 16 de julio de 2003. Amigos de la Cultura Científica.
5. *Cálculos y conceptos en la historia del hormigón armado.* (Académico de Honor). **José Calavera Ruiz**. 18 de julio de 2003. INTEMAC.
6. *Un modelo para la delimitación teórica, estructuración histórica y organización docente de las disciplinas científicas: el caso de la matemática.* (Académico de Número). **Francisco A. González Redondo**. 23 de julio de 2003. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
7. *Sistemas de información centrados en red.* (Académico de Número). **Silvano Corujo Rodríguez**. 24 de julio de 2003. Ayuntamiento de San Bartolomé.
8. *El exilio de Blas Cabrera.* (Académica de Número). **Dominga Trujillo Jacinto del Castillo**. 18 de noviembre de 2003. Departamento de Física Fundamental y Experimental, Electrónica y Sistemas. Universidad de La Laguna.
9. *Tres productos históricos en la economía de Lanzarote: la orchilla, la barrilla y la cochinilla.* (Académico Correspondiente). **Agustín Pallarés Padilla**. 20 de mayo de 2004. Amigos de la Cultura Científica.
10. *En torno a la nutrición: gordos y flacos en la pintura.* (Académico de Honor). **Amador Schüller Pérez**. 5 de julio de 2004. Real Academia Nacional de Medicina.
11. *La etnografía de Lanzarote: "El Museo Tanit".* (Académico Correspondiente). **José Ferrer Perdomo**. 15 de julio de 2004. Museo Etnográfico Tanit.
12. *Mis pequeños dinosaurios. (Memorias de un joven naturalista).* (Académico Correspondiente). **Rafael Arozarena Doblado**. 17 diciembre 2004. Amigos de la Cultura Científica.
13. *Laudatio de D. Ramón Pérez Hernández y otros documentos relativos al Dr. José Molina Orosa.* (Académico de Honor a título póstumo). 7 de marzo de 2005. Amigos de la Cultura Científica.

14. *Blas Cabrera y Albert Einstein*. (Acto de Nombramiento como Académico de Honor a título póstumo del Excmo. Sr. D. **Blas Cabrera Felipe**). **Francisco González de Posada**. 20 de mayo de 2005. Amigos de la Cultura Científica.
15. *La flora vascular de la isla de Lanzarote. Algunos problemas por resolver*. (Académico Correspondiente). **Jorge Alfredo Reyes Betancort**. 5 de julio de 2005. Jardín de Aclimatación de La Orotava.
16. *El ecosistema agrario lanzaroteño*. (Académico Correspondiente). **Carlos Lahora Arán**. 7 de julio de 2005. Dirección Insular del Gobierno en Lanzarote.
17. *Lanzarote: características geoestratégicas*. (Académico Correspondiente). **Juan Antonio Carrasco Juan**. 11 de julio de 2005. Amigos de la Cultura Científica.
18. *En torno a lo fundamental: Naturaleza, Dios, Hombre*. (Académico Correspondiente). **Javier Cabrera Pinto**. 22 de marzo de 2006. Amigos de la Cultura Científica.
19. *Materiales, colores y elementos arquitectónicos de la obra de César Manrique*. (Acto de Nombramiento como Académico de Honor a título póstumo de **César Manrique**). **José Manuel Pérez Luzardo**. 24 de abril de 2006. Amigos de la Cultura Científica.
20. *La Medición del Tiempo y los Relojes de Sol*. (Académico Correspondiente). **Juan Vicente Pérez Ortiz**. 7 de julio de 2006. Caja de Ahorros del Mediterráneo.
21. *Las estructuras de hormigón. Debilidades y fortalezas*. (Académico Correspondiente). **Enrique González Valle**. 13 de julio de 2006. INTEMAC.
22. *Nuevas aportaciones al conocimiento de la erupción de Timanfaya (Lanzarote)*. (Académico de Número). **Agustín Pallarés Padilla**. 27 de junio de 2007. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
23. *El agua potable en Lanzarote*. (Académico Correspondiente). **Manuel Díaz Rijo**. 20 de julio de 2007. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
24. *Anestesiología: Una especialidad desconocida*. (Académico Correspondiente). **Carlos García Zerpa**. 14 de diciembre de 2007. Hospital General de Lanzarote.
25. *Semblanza de Juan Oliveros. Carpintero – imaginero*. (Académico de Número). **José Ferrer Perdomo**. 8 de julio de 2008. Museo Etnográfico Tanit.
26. *Estado actual de la Astronomía: Reflexiones de un aficionado*. (Académico Correspondiente). **César Piret Ceballos**. 11 de julio de 2008. Iltre. Ayuntamiento de Tías.
27. *Entre aulagas, matos y tabaibas*. (Académico de Número). **Jorge Alfredo Reyes Betancort**. 15 de julio de 2008. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
28. *Lanzarote y el vino*. (Académico de Número). **Manuel Díaz Rijo**. 24 de julio de 2008. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.

29. *Cronobiografía del Dr. D. José Molina Orosa y cronología de acontecimientos conmemorativos.* (Académico de Número). **Javier Cabrera Pinto**. 15 de diciembre de 2008. Gerencia de Servicios Sanitarios. Área de Salud de Lanzarote.
30. *Territorio Lanzarote 1402. Majos, sucesores y antecesores.* (Académico Correspondiente). **Luis Díaz Fera**. 28 de abril de 2009. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
31. *Presente y futuro de la reutilización de aguas en Canarias.* (Académico Correspondiente). **Sebastián Delgado Díaz**. 6 de julio de 2009. Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información.
32. *El análisis del tráfico telefónico: una herramienta estratégica de la empresa.* (Académico Correspondiente). **Enrique de Ferra Fantín**. 9 de julio de 2009. Excmo. Cabildo de Fuerteventura.
33. *La investigación sobre el fondo cósmico de microondas en el Instituto de Astrofísica de Canarias.* (Académico Correspondiente). **Rafael Reboló López**. 11 de julio de 2009. Instituto de Astrofísica de Canarias.
34. *Centro de Proceso de Datos, el Cerebro de Nuestra Sociedad.* (Académico Correspondiente). **José Damián Ferrer Quintana**. 21 de septiembre de 2009. Museo Etnográfico Tanit.
35. Solemne Sesión Académica Necrológica de Homenaje al Excmo. Sr. D. Rafael Arozarena Doblado, Académico Correspondiente en Tenerife. *Laudatio Académica* por **Francisco González de Posada** y otras *Loas*. 24 de noviembre de 2009. Ilte. Ayuntamiento de Yaiza.
36. *La Cesárea. Una perspectiva bioética.* (Académico Correspondiente). **Fernando Conde Fernández**. 14 de diciembre de 2009. Gerencia de Servicios Sanitarios. Área de Salud de Lanzarote.
37. *La “Escuela Luján Pérez”: Integración del pasado en la modernidad cultural de Canarias.* (Académico Correspondiente). **Cristóbal García del Rosario**. 21 de enero de 2010. Fundación Canaria “Luján Pérez”.
38. *Luz en la Arquitectura de César Manrique.* (Académico Correspondiente). **José Manuel Pérez Luzardo**. 22 de abril de 2010. Excmo. Ayuntamiento de Arrecife.
39. *César Manrique y Alemania.* (Académico Correspondiente). **Bettina Bork**. 23 de abril de 2010. Ilte. Ayuntamiento de Haría.
40. *La Química Orgánica en Canarias: la herencia del profesor D. Antonio González.* (Académico Correspondiente). **Ángel Gutiérrez Ravelo**. 21 de mayo de 2010. Instituto Universitario de Bio-Organica “Antonio González”.
41. *Visión en torno al lenguaje popular canario.* (Académico Correspondiente). **Gregorio Barreto Viñoly**. 17 de junio de 2010. Ilte. Ayuntamiento de Haría.

42. La otra Arquitectura barroca: las *perspectivas falsas*. (Académico Correspondiente). **Fernando Vidal-Ostos**. 15 de julio de 2010. Amigos de Écija.
43. *Prado Rey, empresa emblemática. Memoria vitivinícola de un empresario ingeniero agrónomo*. (Académico Correspondiente). **Javier Cremades de Adaro**. 16 de julio de 2010. Real Sitio de Ventosilla, S. A.
44. *El empleo del Análisis Dimensional en el proyecto de sistemas pasivos de acondicionamiento térmico*. (Académico Correspondiente). **Miguel Ángel Gálvez Huerta**. 26 de julio de 2010. Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid.
45. *El anciano y sus necesidades sociales*. (Académico Correspondiente). **Aristides Hernández Morán**. 17 de diciembre de 2010. Excmo. Cabildo de Fuerteventura.
46. *La sociedad como factor impulsor de los trasplantes de órganos abdominales*. (Académico de Honor). **Enrique Moreno González**. 12 de julio de 2011. Amigos de la Cultura Científica.
47. *El Tabaco: de producto deseado a producto maldito*. (Académico Correspondiente). **José Ramón Calvo Fernández**. 27 de julio de 2011. Dpto. Didácticas Espaciales. ULPGC.
48. *La influencia de la ciencia en el pensamiento político y social*. (Académico Correspondiente). **Manuel Medina Ortega**. 28 de julio de 2011. Grupo Municipal PSOE. Ayuntamiento de Arrecife.
49. *Parteras, comadres, matronas. Evolución de la profesión desde el saber popular al conocimiento científico*. (Académico Numerario). **Fernando Conde Fernández**. 13 de diciembre de 2011. Italfármaco y Pfizer.
50. *En torno al problema del movimiento perpetuo. Una visión histórica*. (Académico Correspondiente). **Domingo Díaz Tejera**. 31 de enero de 2012. Ayuntamiento de San Bartolomé
51. *Don José Ramírez Cerdá, político ejemplar: sanidad, educación, arquitectura, desarrollo sostenible, ingeniería de obras públicas viarias y de captación y distribución de agua*. (Académico Correspondiente). **Álvaro García González**. 23 de abril de 2012. Excmo. Cabildo de Fuerteventura.
52. *Perfil biográfico de César Manrique Cabrera, con especial referencia al Municipio de Haría*. (Académico Numerario). **Gregorio Barreto Viñoly**. 25 de abril de 2013. Ilte. Ayuntamiento de Haría.
53. *Tecnología e impacto social. Una mirada desde el pasado hacia el futuro*. (Académico Correspondiente). **Roque Calero Pérez**. 26 de abril de 2013. Mancomunidad del Sureste de Gran Canaria.
54. *Historia del Rotary Club Internacional: Implantación y desarrollo en Canarias*. (Académico Correspondiente). **Pedro Gopar González**. 19 de julio de 2013. Construcciones Lava Volcánica, S.L.



55. *Ensayos en vuelo: Fundamento de la historia, desarrollo, investigación, certificación y calificación aeronáuticas*. (Académico Correspondiente). **Antonio Javier Mesa Fortún**. 31 de enero de 2014. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
56. *El cielo nocturno de Fuerteventura: Recurso para la Ciencia y oportunidad para el Turismo*. (Académico Numerario). **Enrique de Ferra Fantín**. 20 de mayo de 2015.
57. *La Unión Europea ante las crisis internacionales*. (Académico Numerario). **Manuel Medina Ortega**. 24 de julio de 2015.
58. *Seguridad alimentaria y disruptores endocrinos hoy*. (Académico Correspondiente). **Antonio Burgos Ojeda**. 14 de diciembre de 2015.
59. *El Dr. Tomás Mena y Mesa: Médico filántropo majorero*. (Académico Numerario). **Aristides Hernández Morán**. 15 de diciembre de 2015.
60. *Callejero histórico de Puerto de Cabras - Puerto del Rosario*. (Académico Numerario). **Álvaro García González**. 20 de abril de 2016.
61. *El moderno concepto de Probabilidad y su aplicación al caso de los Seguros/Il moderno concetto di Probabilità e il suo rapporto con l'Assicurazione*. (Académico Correspondiente en Italia). **Claudio de Ferra**. 25 de julio de 2016.
62. *Comentarios históricos sobre la obra de Boccaccio. "De Canaria y de las otras islas nuevamente halladas en el océano allende España"*. (Académico Numerario). **Cristóbal García del Rosario**. 25 de julio de 2016.
63. «*"Literatura Viva"*, Una iniciativa en Lanzarote para fomentar la práctica de la *Lectura en Voz Alta*». (Académico Correspondiente). **Manuel Martín-Arroyo Flores**. 26 de julio de 2016.
64. *La herencia centenaria de un soñador. Huella y legado de Manuel Velázquez Cabrera (1863-1916)*. (Académico Correspondiente). **Felipe Bermúdez Suárez**. 17 de octubre de 2016.
65. *Propuesta para la provincialización de las islas menores del archipiélago canario*. (Académico Correspondiente). **Fernando Rodríguez López-Lannes**. 18 de octubre de 2016.
66. *Cambio Climático y Tabaco: El negocio está en la duda*. (Académico Numerario). **José Ramón Calvo Fernández**. 12 de diciembre de 2016.
67. *Los RPAS, un eslabón más en la evolución tecnológica*. (Académico Numerario). **Juan Antonio Carrasco Juan**. 30 de enero de 2017.
68. *La Seguridad de los Medicamentos*. (Académico Numerario). **José Nicolás Boada Juárez**. 31 de enero de 2017.
69. *Teoría de Arrecife*. (Académico Numerario). **Luis Díaz Feria**. 26 de abril de 2017.
70. *Sistemas críticos en aeronaves no tripuladas: Un ejemplo de optimización y trabajo en equipo*. (Académico Numerario). **Antonio Javier Mesa Fortún**. 28 de abril de 2017.

71. *1878 – 1945: La Arquitectura en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria en tiempos de Blas Cabrera Felipe.* (Académico Numerario). **José Manuel Pérez Luzardo.** 17 de mayo de 2017.
72. *Energía osmótica: una renovable prometedora en desarrollo.* (Académico Numerario). **Sebastián N. Delgado Díaz.** 20 de julio de 2017.



**HOTEL LANCELOT PLAYA  
ARRECIFE (LANZAROTE)**