



**Dentro de las tecnologías de desalinización de agua, la ósmosis inversa (OI) es actualmente la tecnología más extendida, en particular para agua de mar, debido a su menor consumo energético**

y el resto salada. La desalinización hace que sea posible usar el agua de mar para obtener agua potable, pero el proceso requiere una gran cantidad de energía y deja elevadas cantidades de residuos. Entre el 2% y el 3% de la energía que se consume en el mundo se utiliza para el bombeo y tratamiento de agua para las poblaciones urbanas y el sector industrial. Esta realidad se agrava en las zonas aisladas donde la escasez de agua y energía se dan simultáneamente, por lo que un sistema autónomo alimentado con energías renovables es, en algunos casos, la alternativa más viable para la producción de agua potable.

Dentro de las tecnologías de desalinización de agua, la ósmosis inversa (OI) es actualmente la tecnología más extendida, en particular para agua de mar, debido a su menor consumo energético. La combinación de energía renovable y ósmosis inversa en un sistema integrado ha sido a menudo estudiada; sin embargo, las configuraciones propuestas incluyen el empleo de algún dispositivo de almacenamiento de energía. En estas circunstancias, el uso de la tecnología de ósmosis inversa no difiere mucho de los sistemas de desalinización conectados a la red eléctrica que operan con suministro de potencia constante. Por el contrario, el concepto que se estudia en este proyecto es el diseño de sistemas de desalinización que puedan funcionar eficientemente con suministro de potencia variable. Primeramente se analiza el proceso de desalinización para instalaciones con energías renovables y posteriormente se desarrolla la situación actual de la investigación que se centra en los recuperadores de energía.

## DESALINIZACIÓN Y EVOLUCIÓN EN CANARIAS

La desalinización de agua es el proceso que reduce la salinidad del agua hasta un nivel deseado. Estos procesos siempre manejan tres flujos: el agua salina original, normalmente de mar o de pozos salobres a ser tratada (alimentación); el agua de baja concentración de sal (producto); y el agua salina rechazada, altamente concentrada (salmuera o concentrado).

Los procesos de desalinización se han clasificado tradicionalmente en dos grandes grupos, en función de su tecnología. Estos grupos de procesos son los de cambios de fase o evaporación (destilación) y el proceso de membranas. Los cinco procesos de uso comercial en el mundo corresponden a tres sistemas basados en cambios de fase y dos sistemas basados en membranas que son: evaporación súbita multietapa (MSF), evaporación multiefecto (ME), evaporación por compresión de vapor (CV), ósmosis inversa (OI) y electrodiálisis (ED).

En la Tabla 1 se muestra la distribución de capacidad instalada en Canarias según tecnologías.

El principio de funcionamiento de las plantas de OI es simple. Una bomba asegura la presurización de la alimentación y circulación a lo largo de la membrana. Una válvula sobre la línea de la salmuera o concentrado mantiene la presión dentro del módulo. El permeado o producto sale a una presión cercana a la presión atmosférica. La conversión es la relación entre el caudal de permeado y el caudal de alimentación a la entra-

	Capacidad de producción m <sup>3</sup> /d	Porcentaje %
Evaporación multietapa, MSF	18000	4.0
Evaporación multiefecto, ME	36600	8.6
Evaporación por compresión de vapor, CV	33075	7.4
Ósmosis Inversa, OI	296567	66.1
Electrodiálisis, ED	62350	13.9

Tabla 1. Capacidad de producción de las plantas desalinizadoras según la tecnología

da del módulo. Existen unos límites operativos establecidos por los fabricantes para cada tipo de membrana, que si se superan, se producirá un mal funcionamiento futuro de las membranas que acortará, en algunos casos muy rápidamente, su vida media operativa. Las instalaciones de membranas se realizan mediante módulos en serie y módulos en paralelo.

La desalinización es una tecnología absolutamente implantada en Canarias, donde forma parte integrante del panorama de los recursos hidráulicos. Las islas son la zona europea de mayor concentración de plantas, con presencia de todas las tecnologías comerciales, y otras en fase de ensayo o investigación. Un ejemplo son las numerosas experiencias de aplicación de energías renovables (ya sean solar térmica, fotovoltaica o eólica), para desalinización.

En 1964, la isla de Lanzarote empezó a solucionar el abasto público con la planta potabilizadora de Arrecife por evaporación multietapa (MSF) que producía 2.300 m<sup>3</sup>/día. En 1969, en Gran Canaria, entra en servicio la planta Las Palmas I con el mismo sistema anterior en cuatro evaporadores capaces de producir 20.000 m<sup>3</sup>/día, que en aquel momento constituyó una de las más grandes del mundo y diseñada para producir simultáneamente, agua y energía eléctrica (20 MW). En 1970, en Fuerteventura, con el mismo procedimiento de desalinización (MSF) mediante 5 evaporadores con capacidad de producción de 400 m<sup>3</sup>/día cada uno y un generador eléctrico de 700 kW.

Entre 1977 y 1995, la desalinización de agua de mar por ósmosis inversa experimentó un gran crecimiento en capacidades de producción, ahorro energético y expansión de las instalaciones, sobre todo el área de Oriente Medio, seguido de otras regiones secas como Canarias.

En 1990 se pone en marcha la planta Las Palmas III (36.000 m<sup>3</sup>/día) mediante OI, con la particularidad de experimentar con éxito, por primera vez a escala mundial, las membranas espirales de gran capacidad de producción y equipos recuperadores de energía.

Uno de los mayores problemas de la desalinización es el coste energético. Aunque en 30 años se ha reducido a la quinta parte, y seguirá el descenso, pues se avanza en experiencias con energías renovables y sistemas de recuperación de energía, generados en el mismo proceso de desalación. En 2001, los planes recogidos en las Directrices de Ordenación General de Territorio calculan para 2010 que el abastecimiento energético en las desalinizadoras Canarias debería proceder de la energía eólica casi en su totalidad.

**INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES CON LA DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA**

La utilización de las energías renovables para desalinización de aguas es un deseo que se ha puesto de manifiesto en numerosas ocasiones. Esto se debe, por una parte, al hecho de que en una misma zona geográ-

**La desalinización es una tecnología absolutamente implantada en Canarias, donde forma parte integrante del panorama de los recursos hidráulicos**

**Los planes recogidos en las Directrices de Ordenación General de Territorio calculan para 2010 que el abastecimiento energético en las desalinizadoras canarias debería proceder de la energía eólica casi en su totalidad**

	Lanzarote	Fuerteventura	Gran Canaria	Tenerife	La Gomera	El Hierro	La Palma
Nº total de desaladoras	49	66	129	46	0	2	1
Volumen total agua desalada (hm <sup>3</sup> /a)	16,9	11,9	77,1	18,0	0,0	0,5	0,1
% del volumen total agua consumido en la isla	99%	86%	52%	9%	0%	19%	0%

Tabla 2. Producción de agua mediante desalinizadoras en Canarias (Año 2002)

**La desalinización, al ser muy intensiva en energía, puede beneficiarse de energías consideradas baratas como las renovables**

fica suelen coincidir la escasez de agua y la existencia, incluso la abundancia, de recursos energéticos renovables. Por otro lado, cualquier avance en el sentido de disponer de energía a bajo coste, es beneficioso para reducir el coste final del agua.

Uno de los factores críticos que limitan una mayor implementación de la energía renovable en sistemas de desalinización es la discontinuidad y variabilidad de las fuentes, lo cual lleva aparejado dos problemas principales. El primero es que la mayoría de las tecnologías de desalinización no son adecuadas para operar a potencia variable, y el segundo es que la carencia de continuidad en el suministro de energía, o incluso la limitada disponibilidad de potencia a lo largo de periodos de tiempo variables, puede causar que la demanda no se satisfaga.

**Los recuperadores de energía existentes están diseñados para trabajar en unas determinadas condiciones de funcionamiento, dentro de las cuales, estos sistemas garantizan un porcentaje de recuperación de la energía consumida**

La desalinización, al ser muy intensiva en energía, puede beneficiarse de energías consideradas baratas como las renovables. Por un lado, los sistemas de conversión de las fuentes renovables tienen una explotación de bajo coste y requieren considerables inversiones de capital para su instalación. Por otro lado, las energías renovables son difusas por su propia naturaleza, de forma que normalmente se necesitan grandes superficies captadoras para obtener una determinada cantidad de energía de forma útil, con lo que ello implica en zonas geográficas limitadas.

Al hablar del uso de energías renovables en desalinización, hay que distinguir desde el principio dos formas diferentes:

- Indirecta. La energía renovable se convierte en otra forma energética, normalmente electricidad, que se inyecta en la red eléctrica, Figura 1. La desalinizadora se nutre de energía de esa red general, pero no hay una utilización directa de la energía captada y convertida en la instalación de renovables.

- Directa. La energía captada por los dispositivos eólicos, solares, u otros se aplica directamente a la unidad desalinizadora sin pasar por ninguna fase intermedia. No hay volcado de energía a una red eléctrica, sino que se opera de forma aislada. Estas circunstancias han contribuido a que hasta ahora las aplicaciones directas de las renovables para desalinización se hayan limitado a reducidas instalaciones.

Para conseguir un régimen de operación a potencia variable caben citar el proyecto europeo OPRODES y el proyecto nacional OPRORES realizados en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

La primera fase de esta línea de investigación consistió en desarrollar una planta de OI que pueda trabajar a potencia variable. En la actualidad y como segunda fase, se realiza el estudio del comportamiento de los sistemas de recuperación de la energía hidráulica del caudal de rechazo en una planta de desalación por ósmosis inversa en condiciones de funcionamiento de régimen variable.

Los recuperadores de energía existentes están diseñados para trabajar en unas determinadas condiciones de funcionamiento, dentro de las cuales, estos sistemas garantizan un porcentaje de recuperación de la energía consumida. En el proyecto de investigación que se presenta se quiere estudiar el comportamiento de otro sistema de recuperación de energía, tipo PX, bajo las condiciones variables de energía a las que opera la planta, de esta manera se podrá profundizar en el comportamiento de estos sistemas para analizar la adaptación a las condiciones específicas de trabajo.

Actualmente, el grupo donde se llevará a cabo la investigación ha desarrollado un paquete de programas que permitirá conocer el comportamiento de una membrana de ósmo-



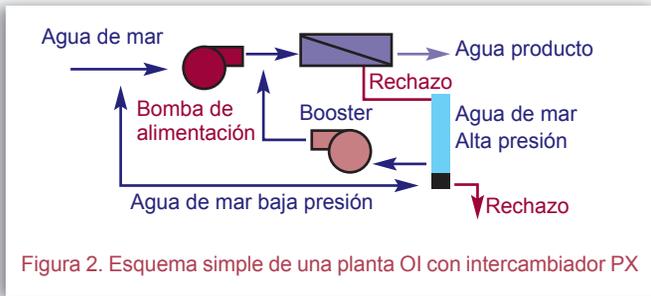


Figura 2. Esquema simple de una planta OI con intercambiador PX

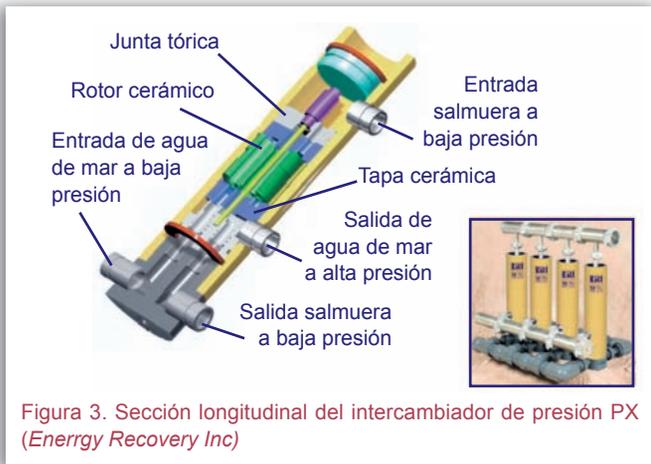


Figura 3. Sección longitudinal del intercambiador de presión PX (Energy Recovery Inc)

para proporcionar la presión necesaria, como se muestra en la figura 2.

El modelo ERI-PX es el que actualmente está más evolucionado y se está incorporando en instalaciones de pequeña y media capacidad. La figura 4 muestra una sección longitudinal del dispositivo. Se observa que el sistema PX sólo tiene una parte móvil, un rotor cilíndrico y cerámico, que efectúa el intercambio de presión de la salmuera al agua de mar.

El agua de rechazo de las membranas de ósmosis inversa pasa a la unidad PX, donde su presión energética es transferida directamente a parte del agua de alimentación con una eficiencia que puede llegar a superar el 95%. Se trata de un dispositivo que permite obtener un consumo energético global por debajo de 2,4 kWh/m<sup>3</sup> de agua producto y equipos.

**COMPARACIÓN ENERGÉTICA ENTRE LOS RECUPERADORES DE ENERGÍA**

La instalación de sistemas de recuperación de energía (SRE) en plan-

tas convencionales de desalación de agua de mar se ha convertido en algo normal, en estas instalaciones se alcanzan recuperaciones inferiores al 50% lo que proporciona un potencial de energía muy importante que recuperar en el rechazo. Además de los ahorros en el consumo de energía (entre el 30-35%), existe una reducción en la inversión, ya que se requieren motores y bombas de menor potencia. La reducción del consumo de kWh por m<sup>3</sup> de agua producida para plantas de ósmosis inversa de una sola etapa se puede observar en la Figura 4.

En las plantas de desalación de agua de mar convencionales, entendiéndose éstas como plantas que trabajan con suministro constante de potencia, la recuperación energética que puede llegar a obtenerse depende de varios factores, entre ellos, la capacidad de producción de la planta y su punto de funcionamiento (presión de trabajo, recuperación). Según un reciente estudio en el que se comparan cuatro sistemas recuperadores de energía en varias plantas de distintos tamaños, se obtuvo el coste energético del m<sup>3</sup> de agua producida. El estudio arroja los siguientes resultados que se muestran en la tabla 3.

La principal ventaja de los recuperadores ERI-PX es su elevado rendimiento, que ofrece la transferencia directa de presión entre fluidos en torno al 95% dentro de su rango de operación. Sin embargo, puede plantear limitaciones por su estrecho rango de funcionamiento.

**RESULTADOS**

Los resultados que se muestran han sido obtenidos de forma experimental para la planta de OI sin recuperación (caso 0), y con un sistema de recuperación basado en la turbina Pelton (caso 1). Para el funcionamiento de la planta con un recuperador basado en ERI-PX (caso 2), los datos se han obtenido a través del



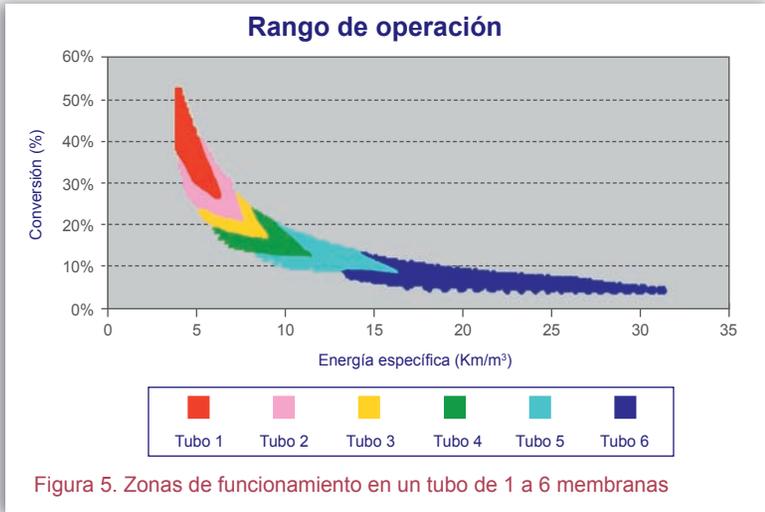


Figura 5. Zonas de funcionamiento en un tubo de 1 a 6 membranas

Los resultados de estos seis ensayos se muestran en la figura 5, donde se representan los puntos de funcionamiento en régimen variable de las distintas configuraciones. En la figura 6 se puede observar el modelo de PX-ERI apropiado en la zona de funcionamiento.

La configuración óptima, tal y como se puede observar en la figura 5, es la correspondiente a la del tubo con seis membranas, ya que se obtienen las mejores conversiones con las relaciones kWh/m<sup>3</sup>. Cuando el módulo opera con una conversión baja, el recuperador trabajará con mayores caudales de rechazo obteniéndose un rendimiento menor.

Por otra parte, en la gráfica de la figura 6 se representan todas las parejas de puntos de las presiones y caudales de rechazo correspondi-

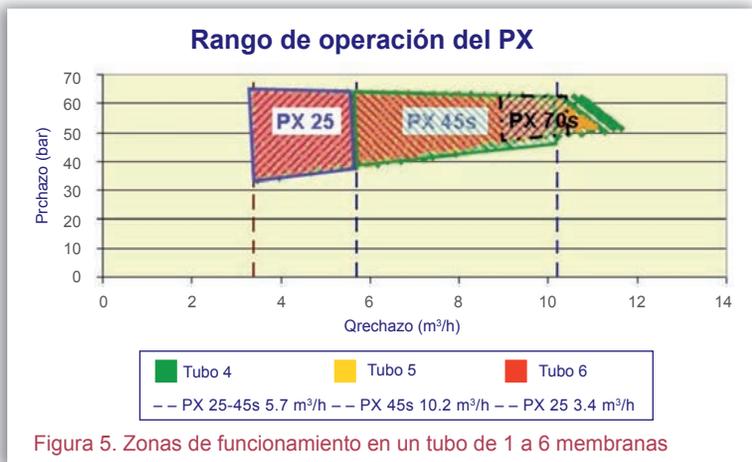


Figura 5. Zonas de funcionamiento en un tubo de 1 a 6 membranas

entes a los puntos de funcionamiento resultado del ensayo 6 de simulación (Tubo 6). Dicha gráfica equivale al rango de funcionamiento del módulo de membranas de la planta en estudio respecto a las condiciones de caudal y presión del concentrado. En la figura 6 se pueden observar los rangos de funcionamiento de los equipos PX que serían admisibles para determinados intervalos dentro de operación de la planta. En la figura 6 se han sombreado las zonas dentro del rango de funcionamiento de la planta, en la que su diseño admitiría un determinado modelo comercial de PX tipo ERI. Claramente se puede observar que el modelo PX 25 es el más indicado para que nuestra planta pueda trabajar dentro de las mejores condiciones de conversión para caudales de alimentación inferiores a los que nos permitiría operar el modelo superior PX 45s, elegir entre instalar uno u otro modelo significa limitar el rango a la zona donde se puede garantizar el correcto funcionamiento del intercambiador de presión respecto a los caudales de estos dispositivos.

### DISCUSIÓN

El sistema basado en el intercambio de presión del tipo PX posee un mejor rendimiento debido a la inexistencia de la transformación de la energía hidráulica en la salmuera hacia el agua procedente de la alimentación. En las turbinas Pelton existen transformaciones de hidráulica a mecánica y posteriormente de mecánica a hidráulica. Sin embargo, cuando se requiere de un amplio rango de funcionamiento en los recuperadores, se observa que la decisión entre los dos sistemas no es inmediata. Para el funcionamiento en régimen variable, a la hora de tomar la decisión de elegir entre uno u otro tipo de recuperador, habrán de considerarse otros aspectos como la flexibilidad en el rango de funcionamiento, la complejidad del sistema en el control para el recuperador elegido, el rendimiento de la recupera-



analysis of stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics”, *Desalination*, n.º.164, pp. 87-89.

Nuez, I., García, F., Argudo, C. Gómez, A. (2004): “Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies. Part I. Wind energies”, *Desalination*, n.º. 160, pp. 293-299.

OPRODES (JOR3-CT98-0274): Informe Final 2001.

OPRORES (PPQ2003-09681): Informe Parcial 2005.

Schneider, B. (2005): “Selection, operation and control of work exchanger energy recovery system based on the singapore project”, *Desalination*, n.º.184, pp. 197-210.

Segura, L., Nuez, I., Gómez, A. (2006): “Experimentation with a reverse osmosis plant powered by renewable energies”, *IASTED, AETF –Lanzarote*.

Segura, L., Nuez, I., Gómez, A., (2006): “Direct integration of renewable energy into a reverse osmosis process.” *EWEA, Atenas*.

Shumway, S. (1999): “The Work Exchanger for SWRO energy Recovery”, *International Desalination Water Reuse Quarterly*, n.º. 8.

Stover, R.L. (2004): “Development of a fourth generation energy recovery device A “CTO’s Notevook”, *Desalination*, n.º. 165, pp. 313-321.

Villa, O. L. (2005): “Operating experience of the Dhekelia seawater desalination plant using an innovative energy recovery system”, *Desalination*, n.º.173, pp. 91-102.

## BIOGRAFÍAS

### LIDIA E. SEGURA ACOSTA

En 2004, obtuvo el título de Ingeniero Industrial por la ULPGC.

En 2005, obtuvo una Beca Innova para el proyecto: *Estudio del comportamiento de un sistema de recuperación de energía en una planta de ósmosis inversa en condiciones de funcionamiento de régimen variable, fundamentado en el empleo de un sistema PX*.

En 2006, obtuvo la suficiencia investigadora en el programa de Doctorado “Ingeniería ambiental y desalinización” y ha colaborado en el proyecto de investigación: “Optimización de la ósmosis inversa con recuperación energética a partir de energías renovables, de la Sección de Medio Ambiente de la ULPGC”.

Dpto. Ingeniería de Procesos Sección de Medio Ambiente Industrial. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Campus Universitario de Tafira. 35017 Las Palmas de Gran Canaria. España.

lsegura.proyinves@ulpgc.es

### IGNACIO AGUSTÍN DE LA NUEZ PESTANA – Coautor

Doctor Ingeniero Industrial por la ULPGC en 1994, profesor de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria desde 1990.

Ha participado en los últimos 5 años en varios proyectos de investigación financiados relacionados con el área de la desalinización y las energías renovables, por ejemplo: “Optimization of RO Desalination Systems Powered by renewable energies (OPRODES). 1998-2001” y “Optimización de la ósmosis inversa con recuperación energética a partir de energías renovables. 2003-2006”.

Dpto. Ingeniería Electrónica y Automática. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Campus Universitario de Tafira. 35017 Las Palmas de Gran Canaria. España. inuez@diea.ulpgc.es

Patrocinador de esta investigación:

**UNELCO ENDESA**