

# OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE OSMOSIS INVERSA UTILIZANDO ENERGÍAS RENOVABLES

F. García

Dpto. Ingeniería Electrónica y Automática. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
Campus Universitario de Tafira. 35017 Las Palmas de Gran Canaria. España. fgarcia@diea.ulpgc.es

J. J. Quintana

Dpto. Ingeniería Electrónica y Automática. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
Campus Universitario de Tafira. 35017 Las Palmas de Gran Canaria. España. jjquintana@diea.ulpgc.es

I. Nuez

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

## Resumen

*En este trabajo se analiza el diseño de una planta de ósmosis inversa para su funcionamiento a cargas variables. El objetivo final de este estudio es analizar la viabilidad del empleo de plantas de ósmosis alimentadas directamente por sistemas de producción eléctrica renovable.*

**Palabras Clave:** Ósmosis inversa, desalación, energías renovables, control.

- Planta de ósmosis inversa-energía renovable y sistema alternativo (Diesel o almacenamiento) aportando los defectos energéticos.
- Plantas de ósmosis inversa de reducidas dimensiones que se conectan o desconectan en función de la energía disponible [2], [3].
- Planta de ósmosis inversa-energía renovable sin sistemas energéticos alternativos [4].

Dentro de este último apartado se enmarca los proyectos OPRODES (JOR3-CT98-0274) y OPRORES (PPQ2003-09681), siendo uno de sus objetivos el estudio de las membranas de ósmosis inversa sometidas a cargas variables (caudal y presión) para situarlas en plantas desalinizadoras de agua movidas por energía renovables. Este artículo comienza con la descripción de una planta de ósmosis inversa diseñada para la obtención de la información en la misma cuando se somete a fluctuaciones. Posteriormente se expone el método y objetivos que se persiguen en este trabajo, para continuar con una breve exposición de los resultados obtenidos para concluir con la definición del funcionamiento óptimo en las plantas de ósmosis inversa.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las necesidades de agua en la sociedad actual es cada vez más importante debido al incremento en su consumo y a la contaminación de los acuíferos. Inicialmente otros sistemas de desalinización se han utilizado dejando paso en la actualidad al uso extensivo de la ósmosis inversa. La flexibilidad en el dimensionamiento de las plantas de ósmosis inversa junto con un consumo energético reducido han permitido que la ósmosis inversa sea el sistema con mayores posibilidades para el futuro inmediato. Mejoras en las membranas y en los recuperadores de energía permiten en la actualidad que la ósmosis inversa sea indispensable para una desalinización más competitiva.

En otra línea, las fuentes básicas de energía han sufrido fluctuaciones importantes en las últimas décadas del siglo XX. Por ese motivo, las fuentes de energías renovables son necesarias para la obtención de agua [1]. Existen tres métodos diferentes para incorporar a una planta de ósmosis inversa sistema energético renovable:

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA

La planta de ósmosis inversa diseñada para este proyecto debe de satisfacer una serie de necesidades dentro del programa de investigación, por lo que sin dejar atrás la filosofía de una planta convencional de desalinización, incluye una serie de modificaciones importantes [5], [6]. Se pretende averiguar el comportamiento de las membranas cuando se someten a régimen variable debido a las

fluctuaciones de la energía de procedencia renovable (eólico y solar). Con este sistema se comprueba el funcionamiento de la planta en régimen variable y con paradas y arranques sucesivos, dependiendo de la disponibilidad de potencia eléctrica en el sistema.

## 2.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

El esquema general de la planta es el indicado en la figura 1, en la que podemos observar el esquema convencional de una planta de ósmosis inversa, al cual se le han hecho una serie de modificaciones, siendo las principales las siguientes:

- Tomas de pretratamiento: Con el objeto de ensayar diferentes tipos de pretratamientos, juntos o por separado, se han dejado tres tomas independientes para la adición de diferentes productos de pretratamiento.
- Tubo de presión: El tubo de presión llevara tomas de agua producto por ambas caras terminales. Este sistema permite comprobar la calidad del agua producto en las diferentes membranas, cerrando el colector de agua producto en el interior del tubo y así recoger el agua producto procedente de la primera membrana solamente, o de la primera y segunda y así sucesivamente. Con este sistema se podrá comprobar la necesidad o no en régimen variable de la utilización de *n*-membranas.
- Tanque de limpieza: Se ha colocado un tanque de limpieza automatizado, ya que es imposible prever las paradas y arranques de larga duración. La limpieza se realizará de forma automática, pudiendo ser manual en algunos casos.

La bomba de alta presión elegida para el proyecto es una bomba de desplazamiento positivo de tres émbolos buzos en acero inoxidable AISI 316 y con camisas cerámicas. El caudal máximo es de 13,62 m<sup>3</sup>/h con un rango de presiones desde 7 - 85 bar. La relación entre caudal y revoluciones de la bomba es lineal siendo un motor eléctrico trifásico el que realiza el arrastre. El acoplamiento entre la bomba y el motor se realiza mediante un sistema de poleas con una relación de transmisión 4:1. El conjunto bomba-motor queda con las características que figuran en la tabla 1:

|     | r.p.m. motor | r.p.m. bomba | Presión (bar) | Caudal (m <sup>3</sup> /h) | Potencia (kW) |
|-----|--------------|--------------|---------------|----------------------------|---------------|
| Máx | 1500         | 375          | 85            | 9,8                        | 26,43         |
| Mín | 800          | 200          | 7             | 5,2                        | 1,17          |

Tabla 1. Relación entre las r.p.m. del motor-bomba.

Estos parámetros son los máximos y mínimos absolutos que pueden obtenerse del conjunto motor-

bomba, siendo éstos superiores a los que requieren las membranas.

Un tubo de 6 metros de longitud con 6 membranas es el utilizado en este proyecto. Las membranas son fabricadas por la empresa KOCH – FLUID SYSTEMS siendo el modelo TFC 2822-SSpremium de poliamida con arrollamiento en espiral para la desalinización de agua de mar y alto rechazo de sales. Cada membrana permite un flujo de permeado de 18,9 m<sup>3</sup>/día con un rechazo de cloruros del 99,8% disponiendo cada una de un área de 27,9 m<sup>2</sup>.

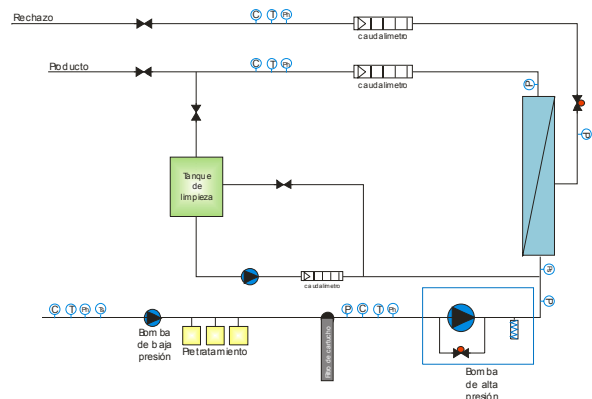


Figura 1. Esquema de la planta ósmosis inversa.



Figura 2. Fotografía de la planta.

## 2.2 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

La planta de ósmosis inversa está orientada a la investigación y para ello se construye una planta fuertemente instrumentalizada y monitorizada. Además se dispone de un sistema de control adecuado que actúa sobre la válvula de rechazo y el variador de velocidad, simulando de esta forma las condiciones de potencia variables a las que se verá sometida la planta en funcionamiento con fuentes energéticas no convencionales. Toda la instrumentación está conectada a un autómata programable.

La elección de la bomba de desplazamiento positivo lleva consigo la práctica independencia entre las variables de caudal y presión. El caudal se controlará

mediante las revoluciones en la bomba, actuando sobre la velocidad en el motor eléctrico que está accionado por el variador. De esta forma indicando una consigna de potencia en el conjunto variador-motor-bomba se consigue un caudal sobre las membranas. La presión en el circuito de agua de mar se obtiene actuando sobre la válvula que cierra el circuito incrementándose la presión. Debido a que existe una interrelación entre ambas variables (caudal y presión) es necesario añadir un regulador PI en ambos circuitos de control implementado en el automático.

### 2.3 SOFTWARE

Se ha diseñado una programación que permita operaciones de funcionamiento de la planta arbitrarias y predefinidas. El programa de control actúa sobre los dos elementos de mando (válvula de control y variador de velocidad) y simultáneamente se está almacenando la información de los diferentes instrumentos en un PC. Los ensayos se han realizado desde el año 2001 hasta la actualidad, obteniéndose una exhaustiva información para el estudio de las membranas sometidas a cargas variables.

## 3 METODOLOGÍA DE FUNCIONAMIENTO

Se ha sometido a la planta a todas las posiciones admisibles de presión y caudal que el fabricante de membranas especifica. A su vez, se han realizado saltos de potencia (variación brusca de caudal y/o presión). Se han conseguido diferentes períodos de muestreo para obtener la información más relevante en el proceso de ósmosis inversa. Para la toma de datos estáticos se han elegido períodos de 15 segundos o superiores. Para los estudios transitorios (paradas y arranques) se han utilizado períodos de hasta 1 segundo. La potencia eléctrica obtenida por el sistema eólico o solar se suministra a la planta de ósmosis inversa mediante la utilización de un variador de velocidad que permita la programación continua de la energía que va a consumir la bomba de alta presión en un sistema de ósmosis inversa. Al motor que arrastra la bomba se le programa las revoluciones que se desea en el mismo, obteniéndose en la bomba un caudal variable aunque no lineal. Los diferentes objetivos que se están abordando son:

- Estudio del comportamiento de las membranas de ósmosis inversa sometidas a cargas variables.
- Estudio energético óptimo de una planta de ósmosis inversa.
- Estudio de los recuperadores de energía sometidos a cargas variables.

- Proceso de envejecimiento en plantas de ósmosis inversa.
- Estudio de la planta de ósmosis inversa cuando se somete a pulsos energéticos.

Algunos autores han tratado algunos de estos puntos, pero siempre sobre instalaciones de laboratorio o de tamaño reducido [7]. Todos estos objetivos son los que se están desarrollando y forman parte de la línea de investigación del grupo [8].

## 4 RESULTADOS

Se muestran un conjunto de datos obtenidos de la planta previamente descrita. Se han elegido los datos generados cuando el motor eléctrico está a 1500 r.p.m. como se muestran en la tabla 2. Los datos han sido generados durante una hora (cada 6 minutos) para tres valores de la presión en la entrada del tubo de 40-50-60 bar respectivamente.

| P <sub>B</sub> | P <sub>S</sub> | I <sub>L</sub> | T  | F <sub>B</sub> | C <sub>B</sub> | F <sub>S</sub> | C <sub>S</sub> | F <sub>P</sub> | C <sub>P</sub> | recovery |
|----------------|----------------|----------------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|
| 39             | 37             | 14             | 15 | 9.489          | 45689          | 7.616          | 56820          | 1.873          | 429            | 19.74%   |
| 39             | 37             | 14             | 15 | 9.489          | 44822          | 7.616          | 55740          | 1.873          | 429            | 19.74%   |
| 39             | 37             | 13.44          | 15 | 9.489          | 45368          | 7.616          | 56420          | 1.873          | 429            | 19.74%   |
| 39             | 37             | 13.44          | 15 | 9.489          | 45095          | 7.616          | 56080          | 1.873          | 429            | 19.74%   |
| 39             | 37             | 13.44          | 15 | 9.489          | 45047          | 7.616          | 56020          | 1.873          | 428            | 19.74%   |
| 39             | 37             | 13.44          | 15 | 9.489          | 45207          | 7.616          | 56220          | 1.873          | 427            | 19.74%   |
| 39             | 37             | 14             | 15 | 9.489          | 44934          | 7.616          | 55880          | 1.873          | 426            | 19.74%   |
| 39             | 37             | 14             | 15 | 9.489          | 45094          | 7.616          | 56080          | 1.873          | 425            | 19.74%   |
| 39             | 37             | 14             | 15 | 9.489          | 45367          | 7.616          | 56420          | 1.873          | 425            | 19.74%   |
|                |                |                |    |                |                |                |                |                |                |          |
| P <sub>B</sub> | P <sub>S</sub> | I <sub>L</sub> | T  | F <sub>B</sub> | C <sub>B</sub> | F <sub>S</sub> | C <sub>S</sub> | F <sub>P</sub> | C <sub>P</sub> | recovery |
| 49             | 48             | 17.36          | 16 | 9.449          | 43648          | 6.486          | 63440          | 2.963          | 324            | 31.36%   |
| 49             | 48             | 17.36          | 16 | 9.449          | 44251          | 6.486          | 64320          | 2.963          | 320            | 31.36%   |
| 49             | 48             | 17.36          | 16 | 9.449          | 43921          | 6.486          | 63840          | 2.963          | 317            | 31.36%   |
| 49             | 47             | 17.36          | 16 | 9.263          | 43541          | 6.358          | 63300          | 2.905          | 297            | 31.36%   |
| 49             | 47             | 16.8           | 16 | 9.284          | 43208          | 6.372          | 62820          | 2.912          | 293            | 31.37%   |
| 49             | 47             | 17.36          | 16 | 9.274          | 43633          | 6.365          | 63440          | 2.909          | 296            | 31.37%   |
| 49             | 47             | 17.36          | 16 | 9.274          | 43399          | 6.365          | 63100          | 2.909          | 293            | 31.37%   |
| 49             | 47             | 17.36          | 16 | 9.293          | 43262          | 6.378          | 62900          | 2.915          | 294            | 31.37%   |
| 49             | 47             | 17.36          | 16 | 9.293          | 43399          | 6.378          | 63100          | 2.915          | 294            | 31.37%   |
| 49             | 47             | 17.36          | 16 | 9.293          | 43632          | 6.378          | 63440          | 2.915          | 292            | 31.37%   |
|                |                |                |    |                |                |                |                |                |                |          |
| P <sub>B</sub> | P <sub>S</sub> | I <sub>L</sub> | T  | F <sub>B</sub> | C <sub>B</sub> | F <sub>S</sub> | C <sub>S</sub> | F <sub>P</sub> | C <sub>P</sub> | recovery |
| 60             | 59             | 21.28          | 16 | 9.089          | 44545          | 5.455          | 74020          | 3.634          | 301            | 39.98%   |
| 60             | 59             | 21.28          | 16 | 9.095          | 44709          | 5.458          | 74300          | 3.637          | 303            | 39.99%   |
| 60             | 59             | 20.72          | 16 | 9.112          | 44334          | 5.468          | 73680          | 3.644          | 298            | 39.99%   |
| 60             | 59             | 20.72          | 16 | 9.129          | 44709          | 5.478          | 74300          | 3.651          | 310            | 39.99%   |
| 60             | 59             | 21.28          | 16 | 9.129          | 44622          | 5.478          | 74160          | 3.651          | 302            | 39.99%   |
| 60             | 58             | 20.72          | 16 | 9.136          | 44776          | 5.482          | 74420          | 3.654          | 301            | 40.00%   |
| 60             | 59             | 20.72          | 16 | 9.136          | 44450          | 5.482          | 73880          | 3.654          | 298            | 40.00%   |
| 60             | 58             | 20.72          | 16 | 9.136          | 44413          | 5.482          | 73820          | 3.654          | 294            | 40.00%   |
| 60             | 59             | 20.72          | 16 | 9.118          | 44896          | 5.471          | 74620          | 3.647          | 307            | 40.00%   |
| 60             | 59             | 20.72          | 16 | 9.118          | 44653          | 5.471          | 74220          | 3.647          | 299            | 40.00%   |

Tabla 2: Resultados obtenidos a 1.500 r.p.m.

Las presiones a la entrada y salida del tubo corresponden a la primera y segunda columna de la tabla. Obsérvese que la pérdida de presión es menor cuanto mayor sea la presión de funcionamiento. El

consumo en amperios es la tercera columna, donde se observa un incremento en función de la presión siendo el caudal aproximadamente el mismo (columna 5). La temperatura del agua de entrada está en °C representada en la cuarta columna. La conductividad del agua de mar está representada en la columna 6. Hay que indicar que se han utilizado las dos expresiones de la conservación para completar la tabla y son:

$$F_s = F_B + F_p \quad ; \quad C_s \cdot F_s = C_B \cdot F_B + C_p \cdot F_p$$

donde F son caudales y C son conductividades.

A continuación y en la misma tabla se muestran los pares de valores caudales y conductividad para la entrada en la membrana de agua de mar y para la salida producto y salida de salmuera. Obsérvese que normalmente la conductividad para este tipo de membranas es inferior a 500 mS. En la columna 11 se muestra el factor de recuperación en cada una de las situaciones que varía desde un 19,74% hasta un 40,00%.

El caudal, que es función de las r.p.m., permanece casi constante, sin embargo cuando se aumenta la presión, aumenta el caudal producto y la conductividad en la salmuera. Un estudio energético se representa en la figura 3, donde se observa la disminución del consumo cuando aumenta el factor de recuperación. Se pasa de un consumo de 5,4 kW/m<sup>3</sup> cuando el rechazo es del 20% a un consumo de 4,2 kW/m<sup>3</sup> cuando el rechazo es del 40%.

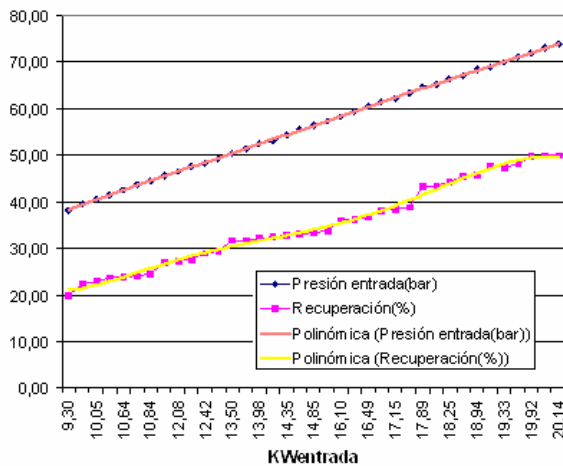


Figura 3: Estudio energético de la planta

En las figuras 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos en un día de funcionamiento a 1500 r.p.m.. Se muestran las variaciones de los caudales cuando se ha variado la presión en las membranas. Obsérvese que cuando la presión es pequeña el comportamiento es irregular debido a que no existe osmosis. En todo momento la intensidad consumida va aumentando en

esta situación. En la figura 5 se muestran las variaciones de la conductividad en la misma situación que la conseguida en la figura 4.

Partiendo que el consumo energético disminuye cuando aumenta el factor de recuperación se puede elaborar una tabla que consiga asignar una presión y caudal en la planta por cada valor de potencia instantánea. Los fabricantes de membranas a su vez, limitan el factor de recuperación, siendo el objetivo del sistema de control el trabajar en torno al 40%-43%. Un incremento del factor de recuperación implica mayor energía y a su vez se puede aumentar la curva caudal-presión y por lo contrario, una disminución del factor implica una disminución de la curva caudal-presión.

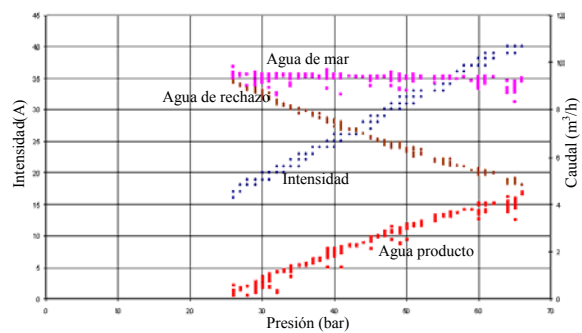


Figura 4: Energía consumida por la planta

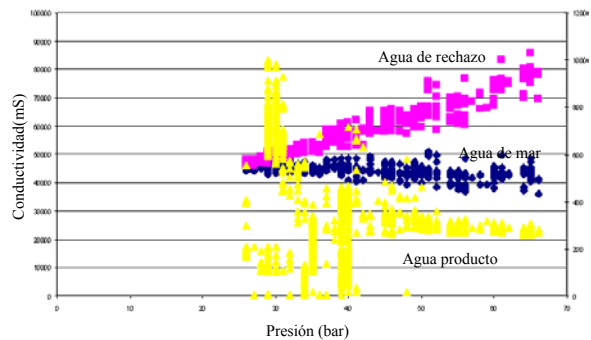


Figura 5: Conductividad obtenida

## 5 CONCLUSIONES

Se muestra en este trabajo el diseño de una planta de ósmosis inversa para su funcionamiento a cargas variables. El funcionamiento de la planta ha superado las 7000 horas, generándose un histórico para analizar el comportamiento de la misma. Las membranas permiten el funcionamiento variable sin deteriorarse aunque se precisa de información adicional para estudiar el envejecimiento de la misma. Los datos obtenidos revelan el diseño del control óptimo para reducir el consumo energético en este tipo de instalaciones, que consiste en tener a las membranas en un factor de recuperación adecuado (40%-43%). El sistema de control deberá situar a la

planta dependiendo de la potencia disponible realizándose mediante un sencillo programa.

### Referencias

- [1] A. Hanafi, Desalination using renewable energy sources, *Desalination* 97 (1994) 339-352.
- [2] D. Herold, A. Neskakis, A small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria, *Desalination* 137 (2001) 285-292.
- [3] M. S. Miranda, D. Infield, A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries, *Desalination* 153 (2002) 9-16.
- [4] C.K. Liu, J-W. Park, R. Migita, G. Qin, Experiments of a prototype wind-driven reverse osmosis desalination system with feedback control, *Desalination* 150 (2002) 277-287.
- [5] G. Al-Enezi, N. Fawzi, Design considerationj of ósmosis inversa units: case studies, *Desalination* 153 (2002) 281-286.
- [6] A. J. Dababneh, M.A. Al-Nimr, A reverse osmosis desalination unit, *Desalination* 153 (2002) 265-272.
- [7] M. Thomson, M. S. Miranda, D. Infiel, A small-scale seawater reverse-osmosis system with excellent energy efficiency over a wide operating range, *Desalination* 153 (2002) 229-236.
- [8] I. Nuez, F. García, C. Argudo, A. Gómez. " Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies. Part I. Wind energy. *Desalination* 160 (2004) pp. 293-299.