

# Automatización y caracterización de una planta piloto de desalación de aguas por ósmosis inversa. II Parámetros operativos y caracterización de planta



A.B.Lozano Avilés<sup>1</sup>, R.P.Valerdi Pérez<sup>2</sup>, J.A.García Gamuz<sup>2</sup> y J.A. Ibáñez Mengual<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dpto. Física, Universidad de Murcia, Facultad de Química, 30071 Murcia (España).

<sup>2</sup>Dpto. Dermatología, Estomatología y Medicina Física, Universidad de Murcia, Facultad de Medicina, 30071 Murcia (España).

E-mail: jaibanez@um.es

(Recibido el 11 de Marzo de 2009; aceptado el 6 de Mayo de 2009)

## Resumen

Se realizó el estudio y determinación de los parámetros operativos de una planta piloto OI, que con un funcionamiento semiautomatizado para la disposición de los dos módulos de membrana que la integran, permite la elección de configuraciones serie/paralelo. El sistema se caracterizó con disoluciones de NaCl, cuyas concentraciones se situaron en rango 3-11 g/l. Para las diferentes configuraciones modulares, se obtuvieron los valores de los distintos parámetros en función del caudal de salmuera, constatándose como diseño óptimo para la aplicación de desalación estudiada el correspondiente a la configuración en paralelo de las membranas, para cualquier concentración del rango estudiado. Se obtuvieron también, algunas representaciones tridimensionales para las distintas configuraciones, en las que se correlacionan las variaciones del caudal de producto con la concentración en la corriente de alimentación y el caudal de rechazo.

**Palabras clave:** desalación, ósmosis inversa, índices operativos, caracterización.

## Abstract

For a RO pilot plant the study and determination of the operative parameters were accomplished. The semi-automatized work for the plant allows us the election of different modular configurations serial/parallel. The system was characterized with NaCl solutions, with concentrations between 3-11 g/l. For the different configurations, the values of the working parameters were obtained as a function of the brine flow, corresponding the optimal design to a single stage with the two modules in parallel for the concentration range studied. For all configurations, some three-dimensional graphs were drawn representing fresh water flow versus feed stream concentration and brine flow.

**Keywords:** desalination, reverse osmosis, operation indexes, characterization.

PACS: 81.20.Ym, 81.40.Jj, 87.15.rs

ISSN 1870-9095

## I. INTRODUCCIÓN

Este artículo constituye la segunda parte de otro anterior publicado en ésta revista [1] y en el mismo se detalla el estudio de una planta piloto de desalación por ósmosis inversa (OI), en cuanto a la obtención de sus parámetros operativos, caracterización y optimización.

Es conocido que en los procesos de desalación con membranas, el carácter selectivo de las mismas influye directamente en la disminución del contenido salino del agua de alimentación, obteniéndose un agua producto de salinidad adecuada para su posterior utilización [2, 3, 5]. El estudio a escala de laboratorio de pequeñas plantas OI permite por una parte, la consideración del comportamiento individualizado de sus membranas, y por otra, la

optimización de las plantas, mediante la caracterización y evaluación de sus parámetros de operación. De esta forma se puede obtener una visión preliminar de la instalación, que se puede extender a plantas OI de mayor escala [1, 5, 6, 7, 8].

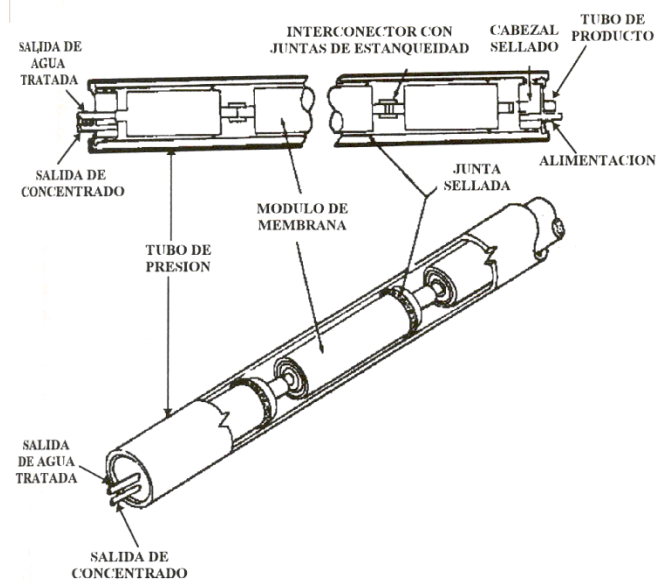
Como ocurría en la anterior entrega, el contenido del artículo puede ser interesante, tanto para estudiantes de ingeniería química e industrial como para los de física aplicada, en lo que respecta tanto a operaciones de separación, como al control e instrumentación de procesos. Por otra parte, desde un punto de vista pedagógico, el estudiante se introduce en el ensayo del funcionamiento operativo de la OI, en cuanto al manejo sencillo de las diferentes configuraciones modulares de la planta piloto.

También puede adquirir cierta destreza en el manejo de los procesos de control automatizado de sistemas.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Cualquier planta (piloto) OI se desarrolla sobre el proceso de filtración tangencial, que corresponde al principio básico operativo de diferentes tipos de módulos en los que la corriente de alimentación se divide en dos corrientes, la de concentrado y la de permeado, siendo una u otra la de producto [1].

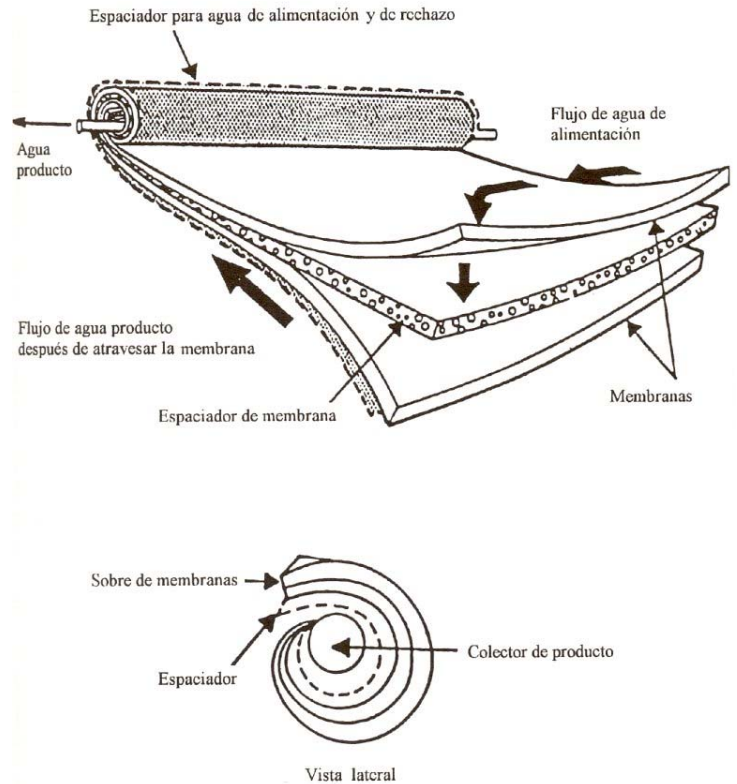
En el proceso de osmosis inversa (OI) se aplica una presión mayor que la presión osmótica a la disolución concentrada, invirtiéndose así el proceso de ósmosis y transportándose el disolvente a través de la membrana desde la disolución concentrada a la diluida. Los módulos empleados se disponen en tubos de presión (Figura 1) y son de arrollamiento en espiral (Figura 2) [5, 9, 10, 11, 12, 13], estando en éste caso, la parte de las membranas correspondiente al canal de alimentación/salmuera, constituida por un material hidrofílico (acetato de celulosa, compuestos de poliamidas aromáticas, polisulfonas,...). En la OI, cuando se trata de desalación de agua de mar, se aplican presiones en el rango de 80-100 bares mientras que si se trata de agua salobre, el rango es de 15-40 bares. En ambos casos, la presión de la corriente de permeado es próxima a la atmosférica ambiental.



**FIGURA 1.** Disposición en serie de los módulos de membrana en el interior de un tubo de presión.

Nuestra planta piloto OI, con una capacidad de tratamiento de 750 l/día, es reconfigurable según diferentes disposiciones serie/paralelo y su esquema se recoge en la Figura 3. Consta de los elementos básicos de cualquier planta [1, 2, 3, 5]: 1) Equipo de pretratamiento del agua de alimentación para evitar el ensuciamiento de las membranas por material particulado (elemento (4) de la

Figura 2) Bomba de alta presión (elemento (6) de la Figura 3) Dispositivo de membranas, con dos módulos de arrollamiento en espiral albergados, en sendos tubos de presión (elemento (10) de la Figura). En nuestro caso, el postratamiento consiste fundamentalmente en la estabilización del agua tratada y la preparación para su distribución. Tanto el agua de rechazo como el agua producto se recogen en sendos depósitos de PVC independientes, lo que posteriormente nos permitía mediante su mezclado, regenerar el agua de alimentación para su posterior reutilización por tiempo indefinido, para los ensayos con nuevas configuraciones modulares de planta.

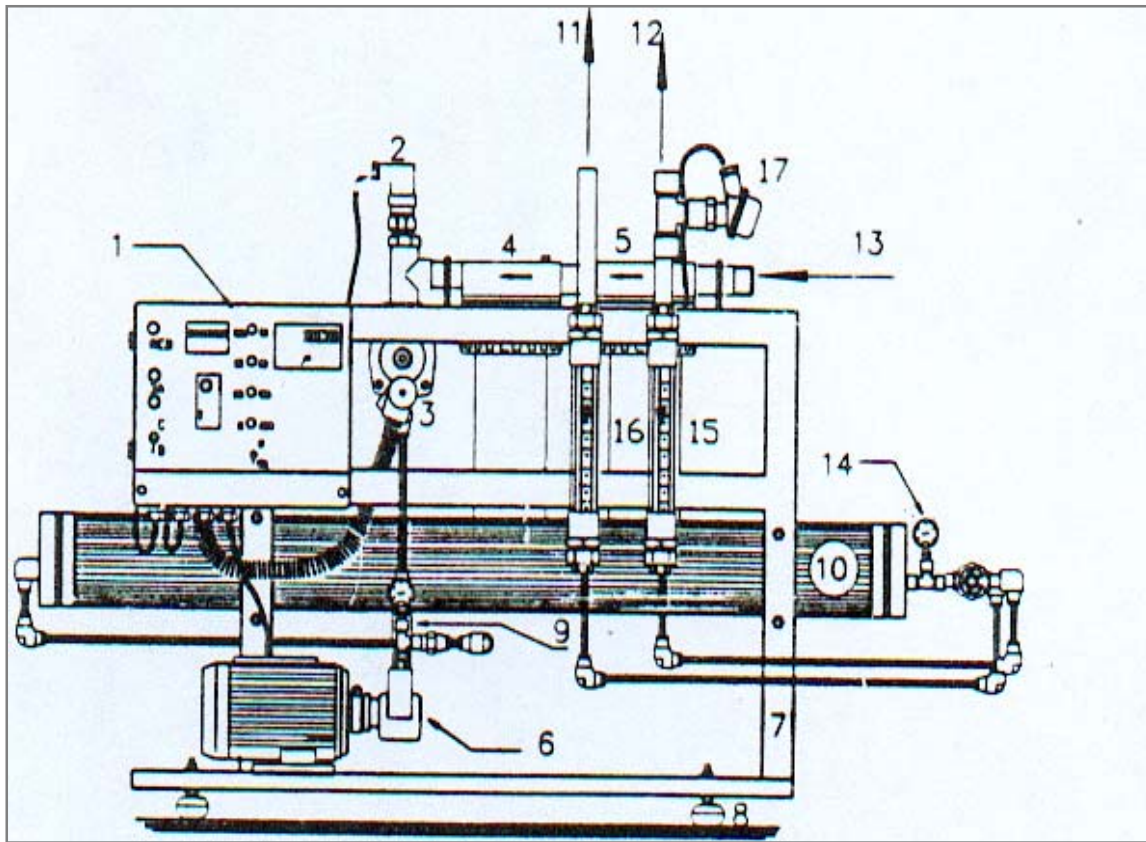


**FIGURA 2.** Módulo de filtración de arrollamiento en espiral.

La Figura 4, recoge una imagen real de la planta, en la que se introdujeron en su momento mejoras para conseguir un funcionamiento semiautomatizado y la ampliación de su rango operativo, tanto en lo que se refiere a salinidad como a caudal de alimentación. Para ello, se incorporó un sistema de electroválvulas que permite las necesarias conmutaciones del sistema, y se cambiaron los sensores de conductividad y presión, dotándose al equipo de un sensor de pH para la salmuera, con alarma, para prevenir posibles problemas de ensuciamiento y contrarrestar el mismo mediante la oportuna adición dosificada de ácido y otros productos químicos necesarios.

Los nuevos elementos de medida y control se gobiernan desde un autómata programable [4] *Siemens Serie S7-200* con *CPU 224* y módulos de ampliación (E/S analógicos y digitales), consiguiéndose el funcionamiento automatizado de la planta en diferentes configuraciones

serie/paralelo (Figura 5) y para diferentes tipos de agua de alimentación que se visualizan mediante un programa



**FIGURA 3.** Equipo experimental. 1.- Cuadro eléctrico de control y maniobra. 2.- Presostato. 3.- Electroválvula. 4.- Filtro de polipropileno. 5.- Filtro de afinado de 5 micras. 6.- Bomba del sistema. 7.- Bastidor. 8.- Antivibradores. 9.- Válvula antirretorno. 10.- Portamembranas y membranas. 11.- Salida de agua osmotizada. 12.- Salida de agua de rechazo. 13.- Entrada de agua de aporte. 14.- Manómetros. 15.- Rotámetro de rechazo. 16.- Rotámetro de agua tratada. 17.- Conductivímetro.

### III. RESULTADOS

En nuestro anterior artículo [1] para cada módulo y para la caracterización de la planta en sus diferentes configuraciones, se empleó disoluciones acuosas de cloruro sódico, con concentraciones entre 3 y 11 g/litro. Para cada módulo, se procedió a ajustes numéricos de las medidas con relación a las ecuaciones que dan el caudal de producto  $Q_p$ , y el flujo salino  $J_s$  en cada uno:

$$Q_p = L_p A [(\Delta P - \sigma \Delta \Pi)], \quad (1)$$

$$J_s = (\bar{C}_s)(1 - \sigma) J_p + \omega \Delta \Pi, \quad (2)$$

con  $J_p = Q_p / A$  flujo de permeado y  $J_s = (\bar{C}_s) Q_p / A$  flujo salino, siendo  $(\bar{C}_s)$  la concentración media de la membrana en el canal de salmuera y  $A$  su área de ataque,  $\Delta P$  e  $\Delta \Pi$  representan la diferencia de presión aplicada y la diferencia de presión osmótica entre las disoluciones a uno y otro lado de la membrana.  $L_p$  es la permeabilidad

hidráulica de la membrana,  $\sigma$  el llamado coeficiente de reflexión, que indica el grado de semipermeabilidad de la misma y  $\omega$  un coeficiente de difusión.



**FIGURA 4.** Planta piloto OI.

De la ecuación (1) se obtuvieron los valores de,  $L_p$  y  $\sigma$  mediante la representación del valor de  $(Q_p/A)$ , frente al incremento de presión osmótica  $\Delta\Pi$ , a la que se ajusta a una función lineal, resultando el primero de la ordenada en el origen y el segundo de la pendiente, respectivamente. El parámetro  $\omega$  se obtiene al sustituir el valor del flujo de soluto  $J_s$ , en la ecuación (2), conocidos los valores del resto de parámetros. Durante el desarrollo experimental se mantuvo el valor de la presión de aporte  $\Delta P$  constante, igual a 9,684 atm

y una temperatura de 25° C, siendo el área de la membrana de 0,76 m<sup>2</sup> [14] (información del fabricante). Se obtuvieron los valores de caudal de producto  $Q_p$ , caudal de salmuera  $Q_s$ , conductividad del agua alimentación  $\Omega_a$  y conductividad del agua producto  $\Omega_p$  por lectura directa de los rotámetros y conductivímetros respectivamente [1].

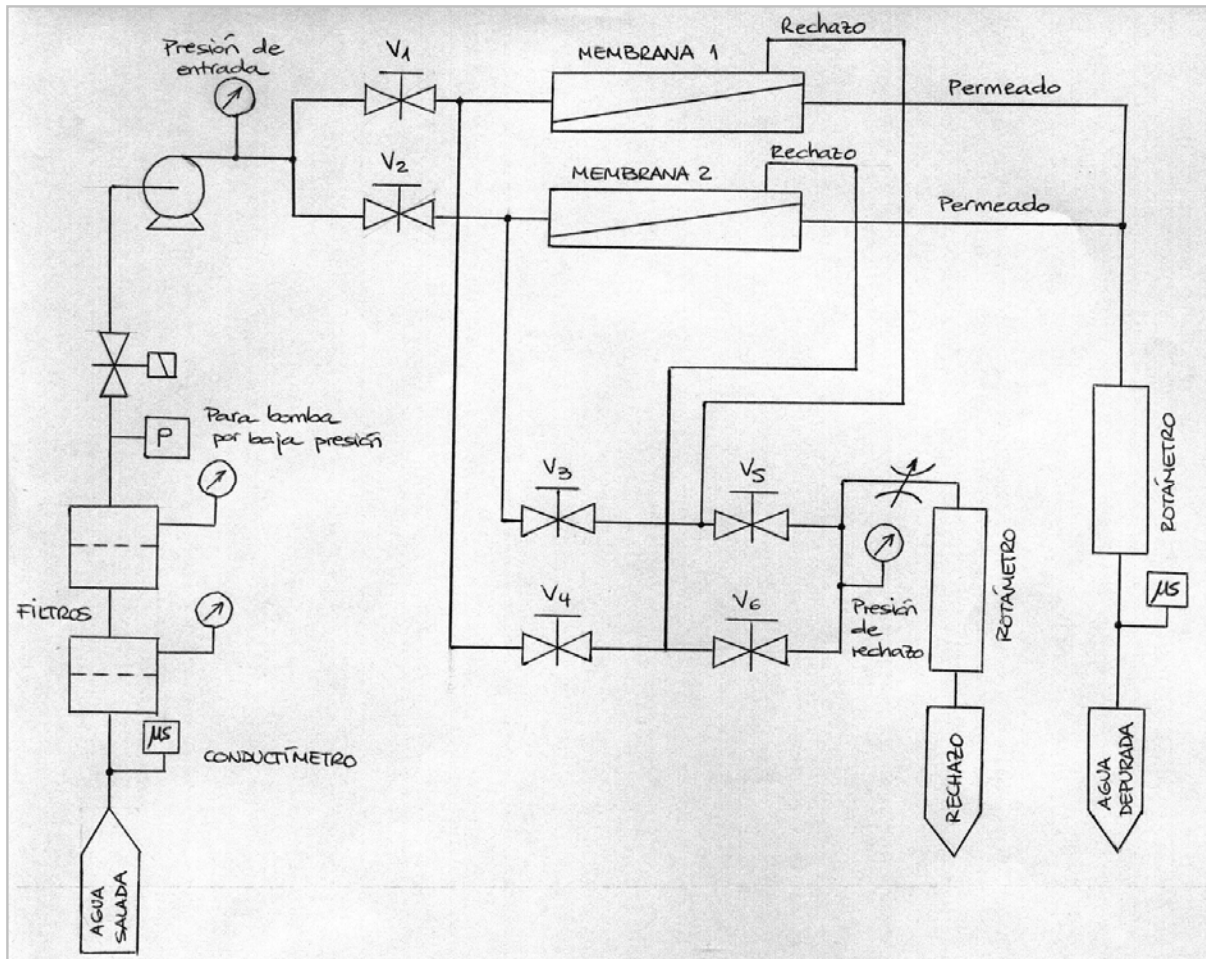


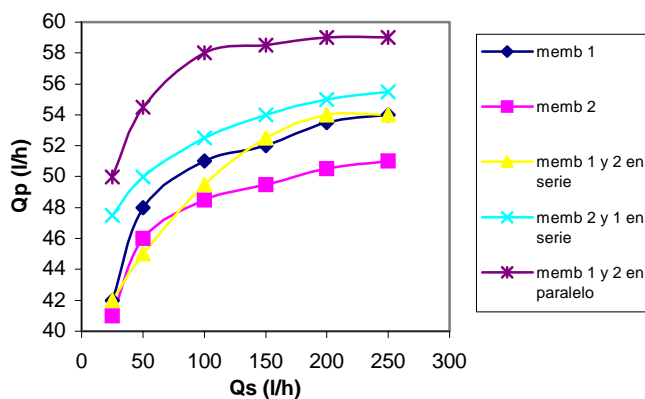
FIGURA 5. Diagrama de funcionamiento de la planta.

### A. Optimización

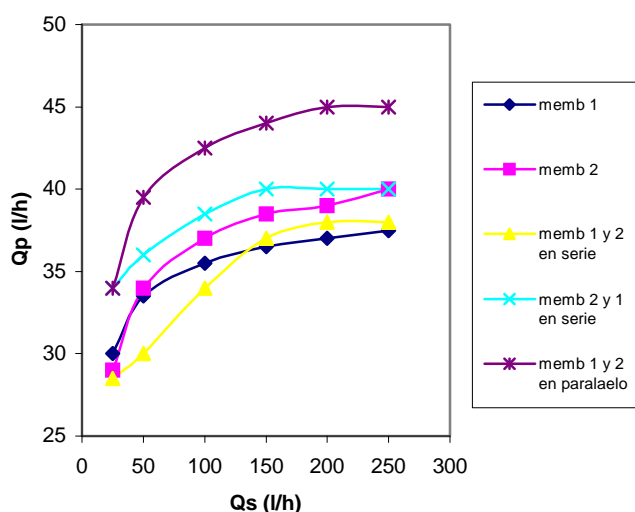
Se basa en conseguir el máximo caudal de producto con la mínima concentración en sales posible.  $Q_s$  se cambia abriendo o cerrando la válvula de vertido de salmuera ubicada en el esquema de la Figura 3 junto y a la derecha del manómetro (14) y puede verse en primer término de la fotografía de la Figura 4, junto a sendos rotámetros de flotador.

A la hora de hacer el estudio comparativo de las distintas configuraciones modulares, de las nueve concentraciones de alimentación ensayadas [1], se tomaron las concentraciones  $5,27 \cdot 10^{-2}$  mol/l,  $9,57 \cdot 10^{-2}$  mol/l y  $18,04 \cdot 10^{-2}$  mol/l, correspondientes a la concentración más baja, media y alta de las empleadas respectivamente, con el objetivo de sacar

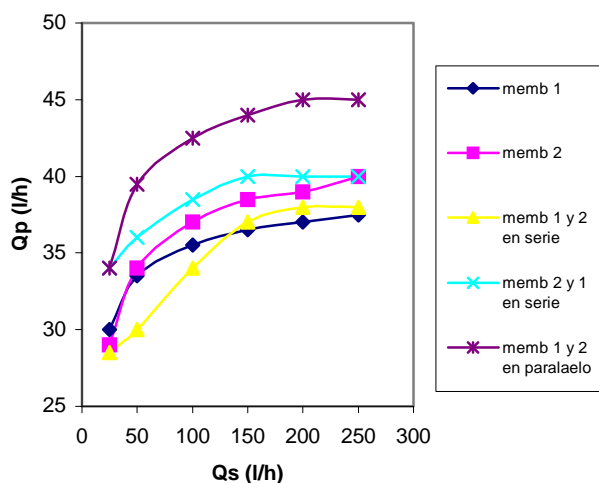
conclusiones y facilitar, tanto el manejo de datos, como el entendimiento de los resultados obtenidos (Figuras 6, 7 y 8).



**FIGURA 6.** Valores de los caudales de producto  $Q_p$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=5,27 \cdot 10^{-2}$  mol/l.  $Q_a=Q_p+Q_s$



**FIGURA 7.** Valores de los caudales de producto  $Q_p$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=6,48 \cdot 10^{-2}$  mol/l.



**FIGURA 8.** Valores de los caudales de producto  $Q_p$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=18,04 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

Para la configuración modular en que las membranas 1 y 2 actúan en paralelo, se obtienen caudales de producto mas elevados que para el resto de las configuraciones ensayadas, en todo el rango de concentraciones. Esta configuración viene seguida por la correspondiente a la membrana 2 en serie con la membrana 1 y a la de la membrana 2 individualmente. Esta primera configuración de membranas en serie proporcionaría a concentraciones bajas e intermedias valores considerables de  $Q_p$ , pero a concentraciones elevadas perdería su eficacia y se tendría una mejor actuación de la membrana 2 individualmente, resultados siempre menores que para la configuración en paralelo.

Durante el desarrollo experimental, el caudal de alimentación no permaneció constante sino que fue variando en función del caudal de salmuera seleccionado. Con lo cual para tratar caudales variables de agua alimentación a planta y no requerir de una calidad de agua muy exigente, la configuración de las membranas en paralelo parece la mejor a adoptar.

A medida que aumenta el caudal de salmuera, mayor es el caudal de alimentación que entra a planta y mayor es la cantidad de producto obtenido. La membrana por su parte, deja pasar una cierta cantidad de sales fija independiente de la presión efectiva que se tenga, por lo que a mayores caudales de producto obtenido, la dilución que se tiene es mayor y el valor de concentración de producto resultante es menor. Por otra parte, a concentraciones mayores de la alimentación, los caudales de producto obtenidos disminuyen al aumentar los valores de presión osmótica y disminuir la presión efectiva resultante (Figura 8), a lo que se une además que el agua alimentación contiene una mayor cantidad de sales, disminuyendo por tanto la permeabilidad hidráulica y por tanto el grado de semipermeabilidad de la membrana, aumentando así la difusividad del soluto a través de la misma (ecuaciones (1) y (2)).

Altas salinidades en la alimentación requerirán altas presiones de operación para producir un determinado caudal de agua producto. Por tanto la salinidad del agua producto es proporcional a la salinidad media del conjunto alimentación - rechazo en la superficie de las membranas, por lo que un incremento en la salinidad de la alimentación producirá un incremento proporcional en la salinidad del agua producto, disminuyendo su calidad. En la comparativa entre los resultados obtenidos para las 5 configuraciones, se utilizan los mismos valores de concentración de alimentación, obtenidos anteriormente, y se construyen las gráficas  $C_p$  vs  $Q_s$  correspondientes (Figuras 9, 10 y 11).

Para concentraciones medias y bajas de agua alimentación, no hay duda sobre cual es la mejor configuración a adoptar: la actuación en paralelo de las membranas, proporciona menor concentración y mayor caudal para el producto obtenido. También, la configuración modular de actuación de la membrana 2 en serie con la 1 da valores de concentración en sales bajos para caudales bajos de salmuera. Para concentraciones altas del agua de alimentación a planta (Figura 11), la configuración en paralelo no sería adecuada puesto que con ella se obtiene valores de concentración del agua producto elevados. Los valores más bajos se tienen para la configuración en serie de la membrana 1 con la membrana 2, aunque esta configuración no proporciona caudales altos de producto. En

esta ocasión se tiene que ver lo que interesa más, el caudal obtenido o la calidad del mismo, o elegir una configuración que nos proporcione valores intermedios de ambas variables a optimizar. A tal efecto, la actuación individual de la membrana 2, proporciona valores de concentración y caudal intermedios.

Con los datos obtenidos (ver Tablas I y II de [1]), se han efectuado diversas representaciones tridimensionales para la  $Q_p$  frente a  $C_a$  y  $Q_s$  (Figuras 12 a 16) y para  $C_p$  frente a  $C_a$  y  $Q_s$  (Figuras 17 a 21). En ellas se observa claramente la tendencia seguida por el caudal de producto y la concentración del mismo en las condiciones de ensayo, pero no se han encontrado puntos de máximo caudal y puntos de mínima concentración, indicativos de la existencia de unas condiciones netamente favorables, para el transcurso del proceso de OI.

Una representación tridimensional de los datos, en el caso de la existencia detectada de un máximo o un mínimo, habría proporcionado los valores exactos de los puntos críticos, que se corresponderían con las condiciones de operación óptimas, además de una mejor visualización de los mismos.

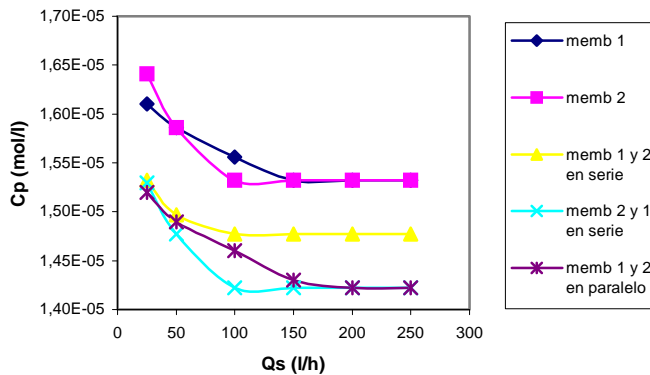


FIGURA 9. Valores de las concentraciones de producto  $C_p$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=5,27 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

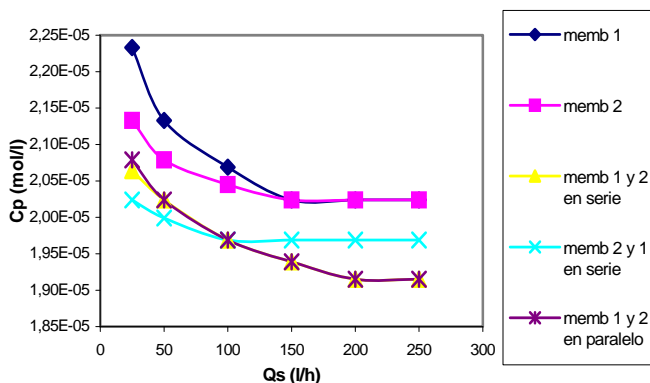


FIGURA 10. Valores de las concentraciones de producto  $C_p$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=6,48 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

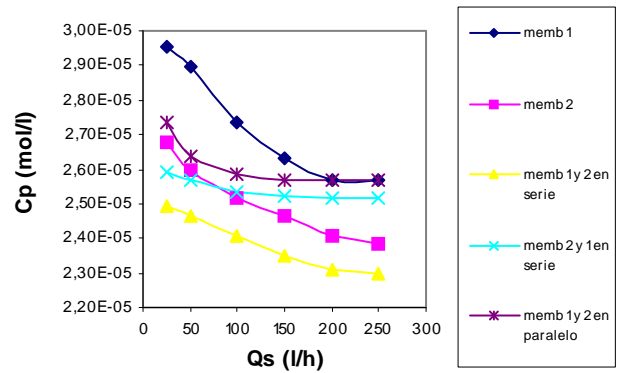
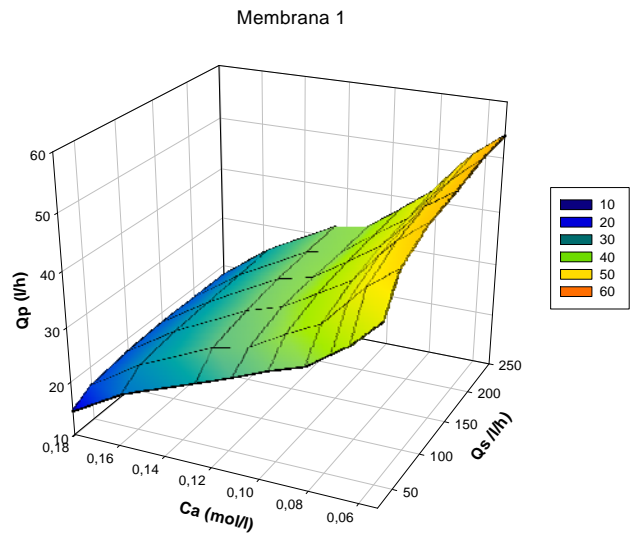


FIGURA 11. Valores de las concentraciones de producto  $C_p$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=18,04 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

Las representaciones efectuadas, no muestran claramente ningún valor máximo de  $Q_p$  ni mínimo de  $C_p$ , dentro del rango de concentraciones de alimentación ensayados y en las condiciones de operación, constituyendo los propios extremos los máximos y mínimos, de manera que a concentraciones bajas de alimentación y caudales altos de salmuera se obtienen los mayores caudales de producto y viceversa. Sin embargo, se puede observar como la tendencia seguida por los datos obtenidos con la membrana 1 (Figura 12) es muy similar a la de la membrana 2 (Figura 13), cuando operan individualmente, mostrando una ligera tendencia a un mínimo, lo que ocurre para concentraciones del orden de  $11,03 \cdot 10^{-2}$  mol/l, pero a concentraciones de  $12,56 \cdot 10^{-2}$  mol/l la tendencia se invierte, para seguir de nuevo una bajada



continua de  $Q_p$  con  $C_a$ .

FIGURA 12.

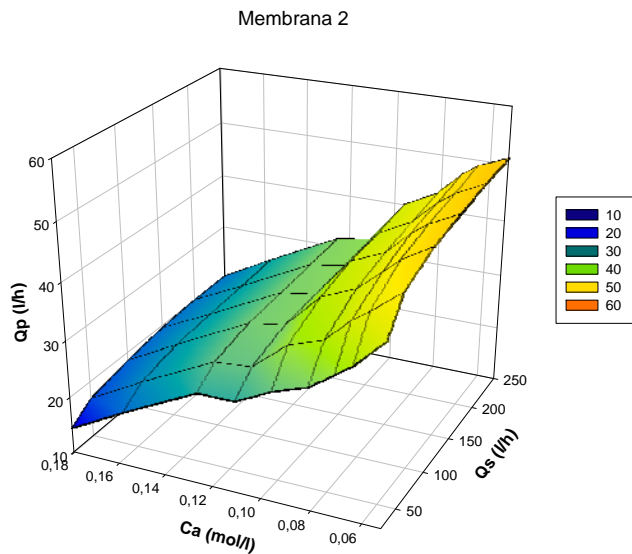


FIGURA 13.

Para las configuraciones en serie (Figuras 14 y 15) se tiene algo distinto. En estos casos, existen varias disminuciones que darían la sensación de tendencia a un mínimo de  $Q_p$ , lo que se ve más claramente para la configuración de las membranas 2 y 1 en serie (Figura 15), y ocurre a valores de  $C_a$  de  $7,16 \cdot 10^{-2}$  mol/l y  $11,03 \cdot 10^{-2}$  mol/l respectivamente, pero de nuevo aumenta el valor de  $Q_p$  y disminuye progresivamente a medida que  $C_a$  aumenta.

Para la configuración de las dos membranas en paralelo (Figura 16) no se ha encontrado ningún descenso de valores de  $Q_p$ , sino un leve incremento a concentraciones de  $7,16 \cdot 10^{-2}$  mol/l, observándose a partir de la siguiente concentración ensayada,  $8,16 \cdot 10^{-2}$  mol/l, una disminución progresiva de los mismos.

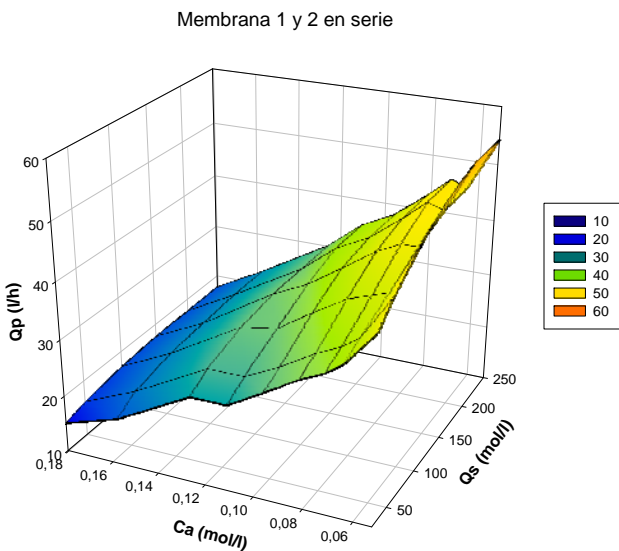


FIGURA 14.

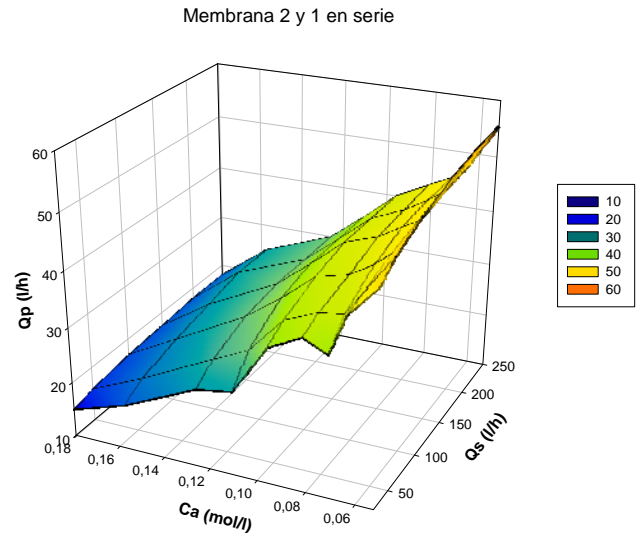


FIGURA 15.

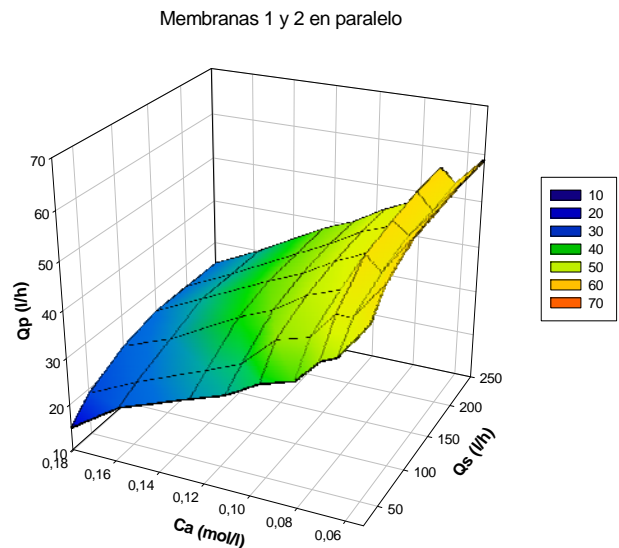
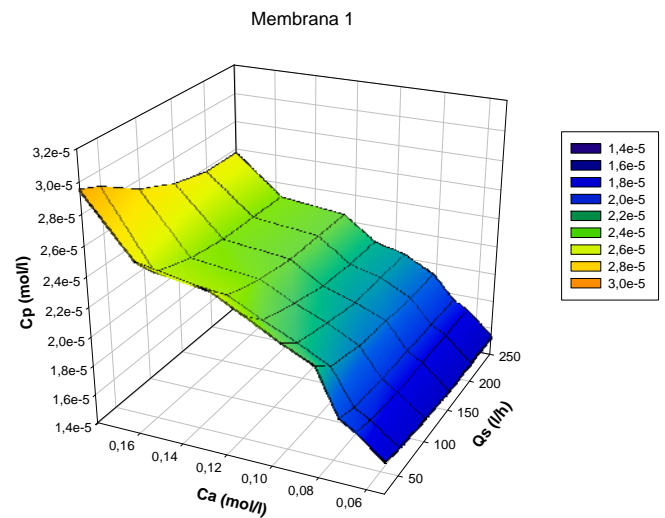


FIGURA 16.

La misma pauta de actuación se siguió para las concentraciones de producto, obteniéndose las correspondientes gráficas en tres dimensiones para cada configuración, mostradas en las Figuras 17 a 21.

FIGURA 17.



Para el caudal de producto, no se ha conseguido localizar ningún punto crítico claro en el rango de operación, que muestre un aumento o disminución de la calidad del agua obtenida. De nuevo, se observa una tendencia hacia un máximo relativo a concentraciones de  $8,16 \cdot 10^{-2}$  mol/l, y en algunas configuraciones, como las de la membrana 1 y 2 individuales (Figuras 17 y 18) y la de la membrana 2 en serie con la 1 (Figura 20), el máximo relativo se desplaza para concentraciones de alimentación más elevadas. Pero el máximo y el mínimo de concentración de sales en el caudal de producto se obtiene nuevamente para los valores extremos de  $C_a$ . Solamente, se puede visualizar una tendencia clara, de manera que al aumentar la concentración de la alimentación, la calidad del producto obtenido es menor.

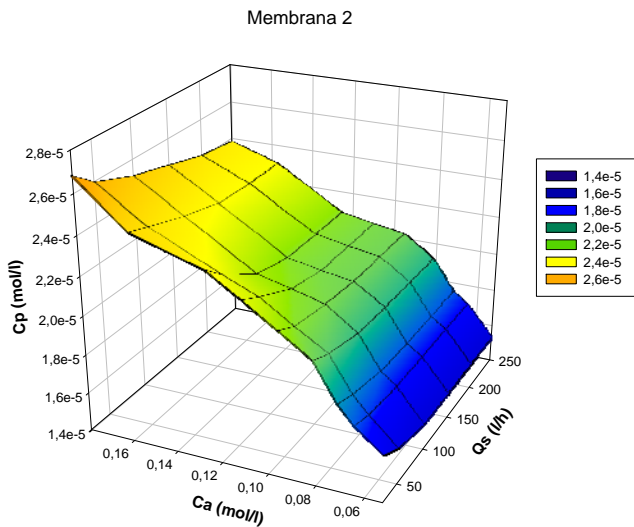


FIGURA 18.

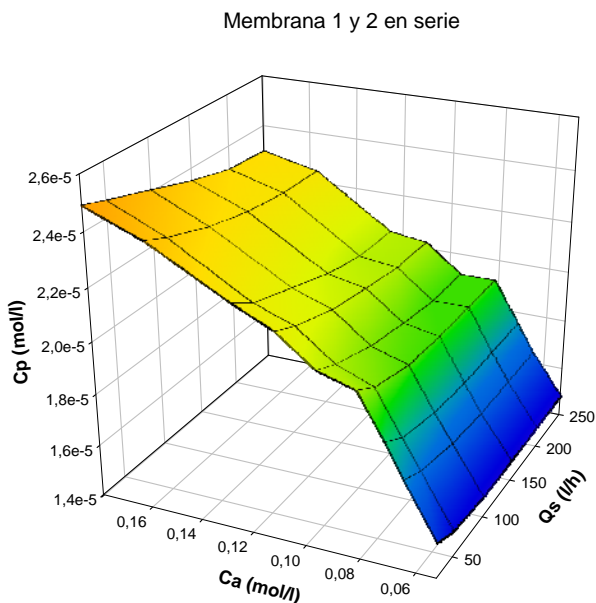


FIGURA 19.

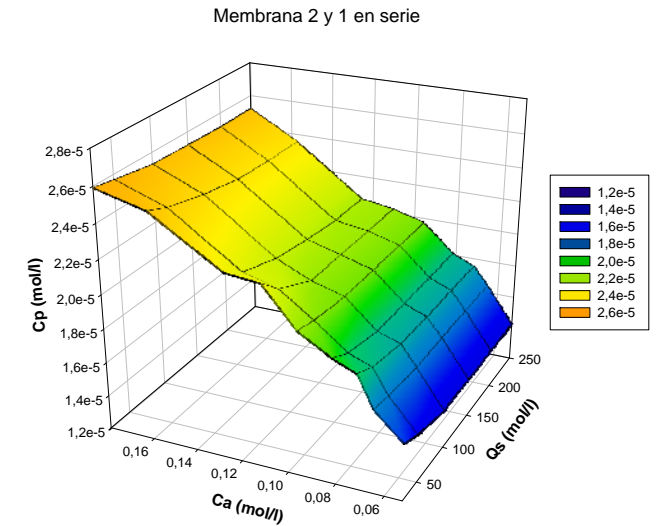


FIGURA 20.

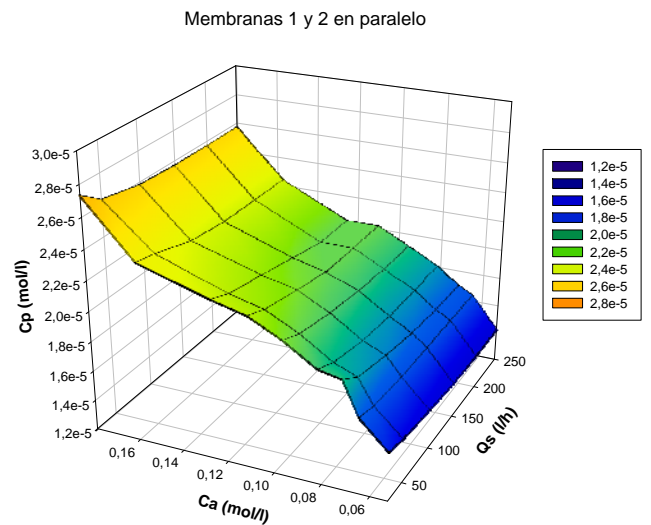


FIGURA 21.

## B Cálculo de los índices operativos

Se define el recobro ( $R$ ), también denominado reducción de volumen, expresado comúnmente en tanto por ciento, como el cociente entre el caudal de agua producto  $Q_p$  obtenido a partir de un determinado caudal de agua a tratar  $Q_a$ :

$$R(\%) = \left( Q_p / Q_a \right) \times 100 \quad (3)$$

El paso de sales ( $SP$ ), se define como el cociente entre la concentración de sales en el permeado ( $C_p$ ) y la concentración de sales en la alimentación ( $C_a$ ):

$$SP = C_p / C_a \quad (4)$$

que se relaciona con el rechazo de sales  $S$ , en la forma

$$S = (1 - SP) \times 100 = \left( 1 - (C_p / C_a) \right) \times 100 \quad (5)$$

Por último, el llamado factor de concentración  $C_F$ , se define como  $CF = C_s / C_{FR}$  siendo  $C_s$  la concentración en el salmuera



y  $C_{FR}$  la concentración promedio en el canal de alimentación/rechazo ( $\bar{C}_s$ ), que según proceda [5], viene dado por las expresiones:

$$\begin{aligned} \text{para agua salobre: } CF &= -\left[\ln(1-R)/R\right] \\ \text{para agua de mar: } CF &= 0,5 \times \left(1 + \left(1/(1+R)\right)\right) \end{aligned} \quad (6)$$

Los valores del recobro  $R$ , paso de sales  $SP$ , factor de concentración  $CF$  y rechazo de sales  $S$  obtenidos se emplean para comparar las distintas configuraciones, al objeto de hacer una estimación de la calidad del agua y completar la definición de un sistema efectivo para la consecución de la operación de desalación.

Todos los componentes presentes en el agua de alimentación se concentran a su paso por los diferentes módulos OI de la planta, viniendo determinado el grado de concentración para el rechazo, por el factor de concentración  $CF$ , que indica el grado en el incremento de la concentración de un componente en un proceso de membrana.

Para estudiar la variación de los distintos índices operativos y a modo de ejemplo, la Tabla I recoge los resultados para la membrana 1, en la que se puede ver como el valor del recobro  $R$ , afecta al paso de sales  $SP$  y al flujo de producto  $Q_p$ , de modo que a medida que  $R$  aumenta, la concentración salina sobre la superficie de ataque de la membrana  $C_s$ , crece, provocando un incremento de la cantidad de sal transportada a través de la membrana y como consecuencia, un aumento del valor de  $SP$ . Por otra parte, esta mayor concentración sobre la membrana da lugar a un aumento de la presión osmótica  $\Delta\pi$  frente a  $\Delta P$ , por lo que el flujo de producto  $Q_s$ , disminuye.

Por otra parte,  $SP$  aumenta al disminuir la presión efectiva, lo que es debido a la disminución del flujo de agua a través de la membrana, aunque esta disminución transcurre de forma menos acusada que el aumento de  $SP$ .

El coeficiente de rechazo  $S$ , en cuanto indicativo de la eficacia de la separación, da cuenta de la capacidad de la membrana para rechazar la sal de la disolución de alimentación. Para una membrana semipermeable ideal  $C_p=0$ , por lo que  $S=100\%$ , mientras que para una membrana no selectiva  $C_p=C_a$  de modo que  $S=0$ . Si el flujo salino se mantiene invariable,  $C_p$  disminuye con  $(\Delta P-\Delta\pi)$ , por lo que  $S$  aumenta.

**TABLA I.** Índices operativos para la membrana 1:  $Q_p$  caudal de agua producto,  $Q_s$  caudal de salmuera,  $C_s$  concentración de salmuera,  $R$  recobro,  $SP$  paso de sales,  $CF$  factor de concentración,  $S$  rechazo de sales.

$Q_p$ (l/h)	$Q_s$ (l/h)	$C_s$ (mol/l)	R (%)	SP	CF	S
MEMBRANA 1						
Concentración alimentación = 5,27E-02mol/l						
54	250	0,0641	17,76	0,0291	1,216	99,971
53,5	200	0,0668	21,10	0,0291	1,267	99,971
52	150	0,0710	25,74	0,0291	1,347	99,971
51	100	0,0796	33,77	0,0295	1,510	99,970
48	50	0,1033	48,98	0,0301	1,960	99,970
42	25	0,1412	62,69	0,0306	2,679	99,969

Concentración alimentación = 9,57E-02mol/l						
37,5	250	0,1101	13,04	0,0211	1,150	99,979
37	200	0,1134	15,61	0,0211	1,185	99,979
36,5	150	0,1190	19,57	0,0211	1,243	99,979
35,5	100	0,1297	26,20	0,0216	1,355	99,978
33,5	50	0,1598	40,12	0,0223	1,670	99,978
30	25	0,2105	54,55	0,0233	2,200	99,977
Concentración alimentación = 18,04E-02mol/l						
18	250	0,1934	6,72	0,0143	1,072	99,986
18	200	0,1966	8,26	0,0143	1,090	99,986
18	150	0,2020	10,71	0,0146	1,120	99,985
17,5	100	0,2120	14,89	0,0152	1,175	99,985
16,5	50	0,2399	24,81	0,0161	1,330	99,984
14,5	25	0,2850	36,71	0,0164	1,580	99,984

La variación de cada uno de los índices ilustrados en la Tabla I para cada una de las configuraciones, se muestra en las Figuras 22 a 30, para las tres concentraciones tipo ensayadas.

### 1. Recobro

Si se observa las representaciones gráficas de las Figuras 22, 23 y 24, se concluye que la distribución de valores de recobro  $R$  para cada uno de los caudales de salmuera  $Q_s$  obtenidos, es similar para los tres valores de concentración ensayados, únicamente que a bajas concentraciones de sales en la alimentación, se consigue mayores valores de recobro (Figura 22), con una cuantía entre 15-65% superior al de la concentración de alimentación media (Figura 23), es decir, se pueden forzar las condiciones de operación de tal forma que se obtenga para un caudal de alimentación dado mayor cantidad de producto. De la misma forma, al aumentar el valor del caudal de salmuera obtenido en el proceso, menor es el valor del recobro, pues para un volumen de alimentación dado, más agua se va incorporando al caudal de rechazo frente al de producto.

Los valores de recobro son similares para las distintas configuraciones, pero si hubiera que decantarse por una de ellas, sería por la configuración de membranas en paralelo, para cuyo caso se tienen los valores más elevados para todas las concentraciones de alimentación ensayadas.

### 2. Factor de concentración

La tendencia seguida por  $CF$  es a disminuir, a medida que aumenta  $Q_s$ , lo que se debe a que la membrana, en función de sus características, rechaza una cantidad fija de sales que se concentra en la salmuera, por tanto, cuanto menor sea el caudal del rechazo más concentrado será éste, es decir  $C_s$  será mayor y por tanto  $CF$  crece a medida que  $Q_s$  disminuye (Figuras 25 a 27).

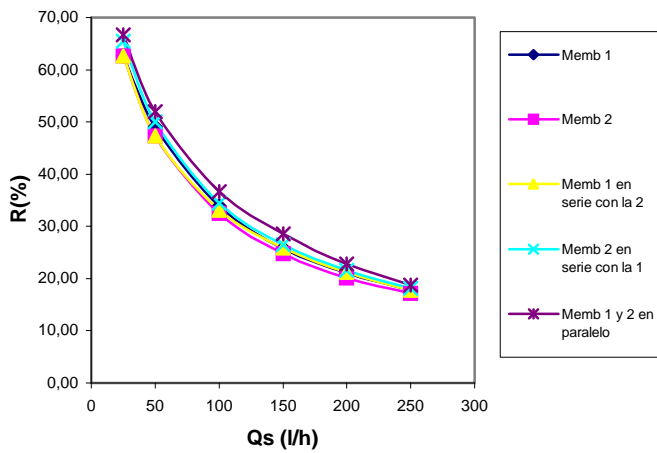


FIGURA 22. Valores del recobro  $R$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=5,27 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

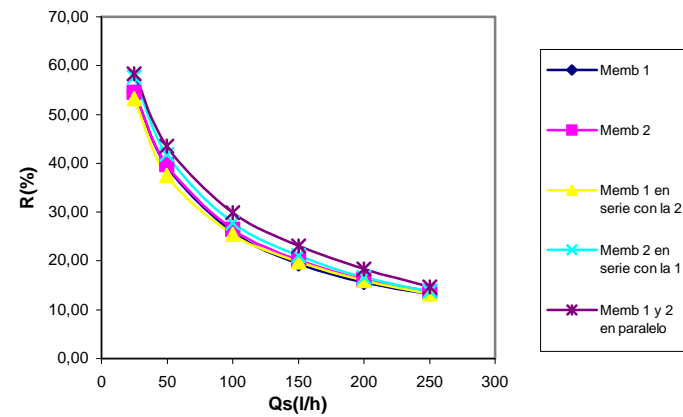


FIGURA 23. Valores del recobro  $R$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=9,57 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

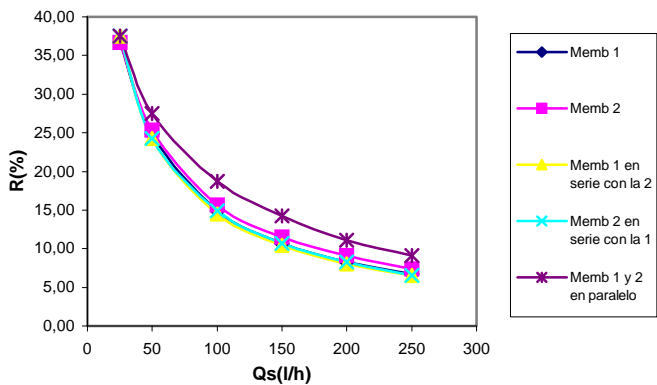


FIGURA 24. Valores del recobro  $R$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=18,04 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

La variación de  $CF$  con la concentración de la alimentación  $C_a$ , no muestra cambios significativos en los valores obtenidos en  $CF$  a concentraciones bajas y medias (Figuras 25 y 26), lo que denota que el aumento producido en  $C_s$  a medida que aumenta  $C_a$  es proporcional al sufrido por la concentración de la

alimentación; sólo a concentraciones elevadas (Figura 27), se da una mayor variación en los valores de  $CF$  con relación a  $C_a$ .

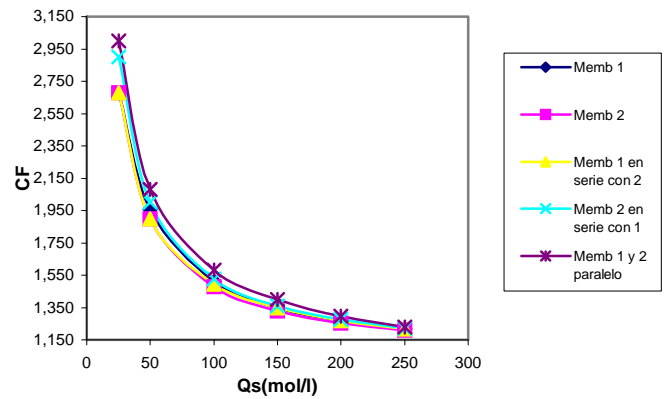


FIGURA 25. Valores del factor de concentración  $CF$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=5,27 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

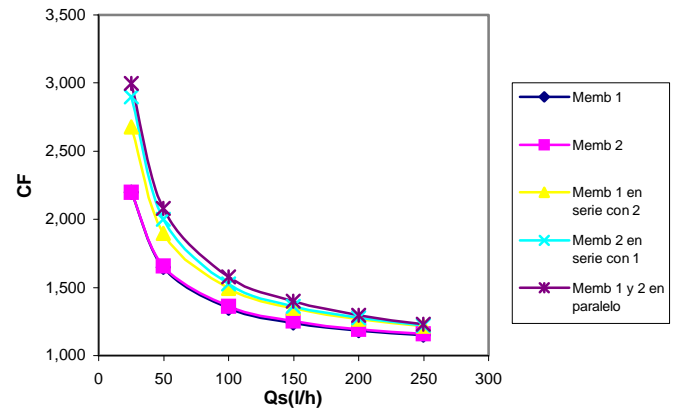


FIGURA 26. Valores del factor de concentración  $CF$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=9,57 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

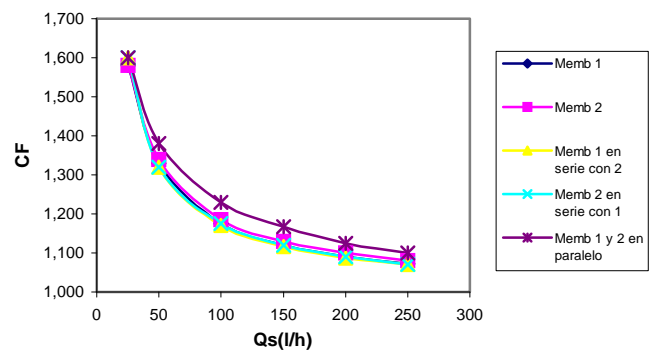


FIGURA 27. Valores del factor de concentración  $CF$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=18,04 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

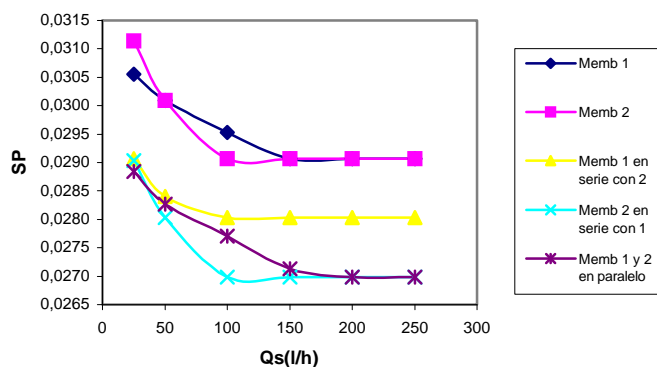
### 3) Paso de sales.

El flujo de sales es independiente de la presión efectiva, tal como muestra la ecuación (2), de modo que al disminuir ésta, disminuye el caudal de agua que atraviesa la membrana

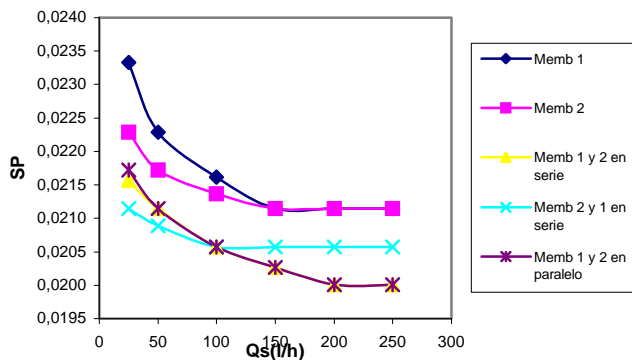
(véase ecuación (1)), con lo que aumenta la concentración de sales en el permeado y consecuentemente, el paso de sales  $SP$ . Ello también ocurre al disminuir el caudal  $Q_s$ , de modo que en estas condiciones, también aumenta  $SP$ .

En teoría, esto se acentúa para concentraciones de alimentación mayores, pero igual que ocurría con  $CF$ , el hecho de que  $Q_a$  no se mantenga constante durante todo el ensayo, sino que el volumen que se capta del depósito es dependiente de  $Q_s$ , no tanto de  $C_a$ , proporciona valores de  $Q_p$  mayores cuanto mayores son  $Q_a$  y  $Q_s$ , haciendo que el aumento de  $C_s$  y  $C_p$  no supere al aumento de  $C_a$  entre ensayos, por lo que el cociente disminuye en lugar de aumentar, como sería lo esperado.

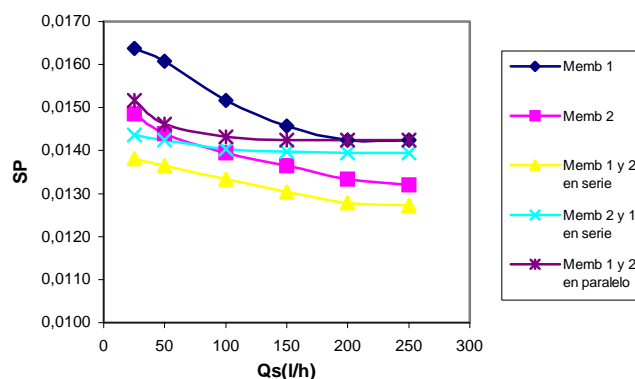
Los valores más elevados de  $SP$  se obtienen para las configuraciones de actuación de la membrana 1 y 2 individualmente, a concentración de alimentación baja y media (Figuras 28 y 29). Para concentraciones elevadas, la configuración en paralelo también tiene valores de paso de sales altos, pero a concentraciones baja e intermedias, en el rango  $5,27 \cdot 10^{-2} - 9,57 \cdot 10^{-2}$ , proporciona los valores más bajos, lo que podría deberse a que con esta configuración se tratan mayores caudales de alimentación y por consiguiente, se obtienen los mayores caudales de producto, mayor dilución de sales que atraviesan la membrana, para dar concentraciones en producto menores y un valor de  $SP$  por consiguiente menor (Figura 30).



**FIGURA 28.** Valores del paso de sales  $SP$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=5,27 \cdot 10^{-2}$  mol/l.



**FIGURA 29.** Valores del paso de sales  $SP$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=9,57 \cdot 10^{-2}$  mol/l.



**FIGURA 30.** Valores del paso de sales  $SP$  a distintos caudales de salmuera  $Q_s$ , para las distintas configuraciones modulares y  $C_a=18,04 \cdot 10^{-2}$  mol/l.

#### IV. CONCLUSIONES

Para una planta piloto con una capacidad de bombeo determinada (que genera la presión requerida en la entrada de planta), como es nuestro caso, y un equipo concreto de membranas, los parámetros de funcionamiento determinantes para la obtención de resultados, son el caudal de rechazo (controlable operativamente y determinante del caudal de producto, frente a un caudal de alimentación que depende en exclusiva del equipo de bombeo) y la concentración del agua de alimentación.

El análisis del funcionamiento de la planta piloto OI, se ha efectuado en base al estudio de diferentes configuraciones modulares serie/paralelo para la misma, además de contemplar la actuación por separado de cada uno de los dos módulos de membrana que la forman, con relación a los parámetros característicos del agua producto, a saber, su concentración salina y el valor de su caudal, el primero de los cuales interesa minimizar, mientras que se maximiza el segundo, dentro del rango permitido por el funcionamiento de la propia planta. En cualquier caso, se ha encontrado que la asociación en paralelo de los módulos de membrana es la que mejores resultados aporta, constituyendo la disposición óptima para la aplicación estudiada, ya que proporciona los mejores resultados de recuperación y calidad de permeado, para cualquier valor de la concentración en la alimentación en el rango considerado.

También, la caracterización de la planta en su conjunto, requiere la determinación de varios índices operativos (recobro, factor de concentración y paso de sales), los cuales han sido evaluados para las diferentes configuraciones.

Por otra parte, los requerimientos energéticos del proceso de planta están condicionados por la presión osmótica, los caudales de alimentación y producto, la calidad de producto requerida y el valor del recobro, por lo que actuando sobre estos parámetros operativos se puede conseguir ajustar las condiciones de operación, para conseguir un menor costo del producto. De ahí el interés del análisis de los mismos, tal como se ha hecho en el presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Lozano, A .B., Valerdi, R P., García, J. A. y Ibáñez, J. A., *Automatización y caracterización de una planta piloto de desalación de aguas por OI. I Caracterización de las membranas*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **3**, 167-176 (2009).
- [2] Fariñas, M., *Ósmosis inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones*, (Ed. McGraw Hill. Madrid, 1999).
- [3] Fariñas, M., Crovetto J. M., *Desalación de aguas por ósmosis inversa I*, Ingeniería Química, Junio 33-40 (1983).
- [4] Gómez Medina, P., *Automatización, implementación de funciones y autómatas programables*, (DM Ed. Murcia, 2000).
- [5] Ibáñez, J. A., Berná, L. M. y Valerdi, R. P., *Desalación por Membranas*, (DM Ed., Murcia, 1997).
- [6] American Water Works Association Research Foundation, *Tratamiento de aguas por procesos de membranas. Principios, procesos y aplicaciones*, (McGraw-Hill. Madrid, 1998).
- [7] Buros, O. K., *The ABCs of Desalting*, Inst. Desalination Ass., (2000).
- [8] Nalco, *Manual del Agua*, (McGraw-Hill, México, 1989).
- [9] Rautenbach, R., Albrecht, R., *Membrane Prozesse*. (J. Wiley&Sons, New York, 1989).
- [10] Mulder, M., *Basic Principles of Membrane Technology*, (Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, 1981).
- [11] King, S. H., Lee, S. N., Young, J. S., Moon, S. Y., Young, C. H., *Pilot Plant Demonstration of Energy Reduction for RO Seawater Desalination Through a Recovery Increase*, Desalination **203**, 153-159 (2007).
- [12] Wilf, M., *The Guidebook to Membrane Desalination Technology*, (Balabam Desal. Pub. L'Aquila, 2007).
- [13] Marquardt, K., *Reverse Osmosis for Treating Fresh Water and Waste Water in Saline Water Processing*, edited by Heitmann, H. G. (VCH Pub., New York. 1990).
- [14] *Filmtec Technical Manual*, (Dow Chemical Co., USA 1985).