

# Caracterización de un elemento de ósmosis inversa para profundizar en el conocimiento de los fenómenos de transporte a través de membranas

N. Melián-Martel\*, B. del Rio Gamero, A. Ruiz-García  
Departamento de Ingeniería de Procesos. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

## RESUMEN

En este artículo se presenta una propuesta teórica-práctica para entender y aprender los fenómenos de transporte a través de membranas. La estrategia de aprendizaje presenta un enfoque dirigido a los estudiantes de los grados universitarios con competencias en el área de producción y tratamiento de aguas de la Escuela de Ingeniería Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Para ello se llevará a cabo un análisis comparativo de la caracterización de un módulo de ósmosis inversa atendiendo a: (1) las instrucciones de diseño del fabricante de la membrana y las ecuaciones básicas de flujo y transporte (2) los resultados de uso del programa informático de simulación para el diseño de sistemas de ósmosis inversa específico de cada fabricante y (3) los valores obtenidos en una práctica experimental llevada a cabo en una planta piloto de ósmosis inversa. La aplicación de esta propuesta teórica-práctica es de especial interés, ya que permite fomentar un aprendizaje activo y la mejora del rendimiento académico, permitiendo que el estudiante se acerque de una forma más comprensiva a los fenómenos de transporte, analizando las variables que intervienen en el diseño de los módulos de membrana de arrollamiento en espiral empleados en la desalación de agua de mar.

**Palabras clave:** fenómenos de transporte, membrana, ósmosis inversa, simulación, aprendizaje.

## 1. INTRODUCCIÓN

La desalinización de aguas se presenta como una alternativa de rápido crecimiento y una de las piedras angulares en la que descansa la planificación hídrica. De las tecnologías de desalinización más exitosas comercialmente cabe destacar la desalinización mediante la tecnología de membranas de ósmosis inversa, en adelante OI. El interés comercial de la OI ha aumentado debido a la mejora continua del proceso, que a su vez conduce a la reducción de los costes de producción del agua desalinizada. Es por ello, que las empresas del sector de aguas demandan que los nuevos estudiantes de ingeniería tengan conocimientos y habilidades en este campo. De tal forma que los proyectos docentes de las asignaturas deben perfeccionarse continuamente con el objeto de incorporar metodologías y/o estrategias de aprendizaje que ayuden a los estudiantes a desarrollar competencias en el área de tratamientos de aguas.

El presente trabajo, ha sido elaborado en base a las dificultades identificadas, en los estudiantes del Grado en Ingeniería Química y Química Industrial, en la comprensión de los fenómenos de transporte a través membranas comúnmente empleadas en la desalinización de agua de mar. Por ello, el objetivo de este trabajo es mostrar una metodología de apoyo a las clases teóricas y de potenciación del conocimiento conceptual y procedimental en referencia al estudio de los fenómenos de transporte a través de membranas. Dicha metodología, basada en el trabajo de laboratorio, favorece y promueve el aprendizaje ya que permite que el estudiante cuestione los datos teóricos y los confronte con la realidad. En este ámbito *D. Anastasio* y *J.R. McCutcheon* han publicado trabajos recientes con el objeto de satisfacer dichas necesidades tanto en el campo de la OI, como de la osmosis directa<sup>1,2</sup>. El trabajo desarrollado podría insertarse en las asignaturas de Producción y Tratamiento de Aguas del Grado de Ingeniería Química así como en la asignatura de Gestión, Diseño y Tratamiento de Residuos y Aguas del Grado de Química Industrial.

Los estudiantes emplearán las instrucciones de los fabricantes de membranas, harán uso de los software comerciales, y experimentarán con una planta piloto de OI. Dicha planta permite imitar las condiciones de operación de una membrana industrial al mismo tiempo que permite que el estudiante observe el cambio de funcionamiento del elemento de membrana frente a cambios hidrodinámicos y de flujo. De tal forma que aprenderán la compleja interacción entre el rechazo de sales, el flujo de permeado y rechazo, la concentración de polarización y la permeabilidad del elemento de membrana.

Email: [noemi.melian@ulpgc.es](mailto:noemi.melian@ulpgc.es), [beatriz.delrio@ulpgc.es](mailto:beatriz.delrio@ulpgc.es), [alejandro.ruiz@ulpgc.es](mailto:alejandro.ruiz@ulpgc.es)

## 1.1. Teoría

La teoría de la ósmosis inversa puede ser presentada a los estudiantes mediante<sup>3</sup>. La osmosis inversa, aplicada a la desalinización de agua de mar, es un proceso industrial cuyo esquema simplificado se resume en la Figura 1.

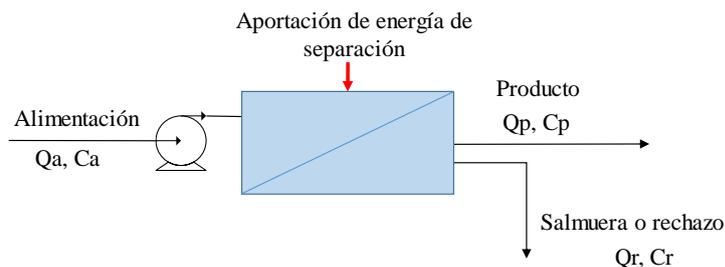


Figura 1. Representación esquema de la desalinización de agua de mar por ósmosis inversa

En esencia, el caudal de alimentación de agua de mar ( $Q_a$ ) es bombeada a alta presión hacia el sistema de OI compuesto por membranas semipermeables, dando lugar a dos flujos de agua, uno de alta concentración en sales denominado rechazo o salmuera ( $Q_r$ ) y otro de baja concentración en sales denominado agua producto o permeado ( $Q_p$ ). Los principales parámetros operativos se pueden interpretar del balance de caudales y de sales de forma que se cumplen las expresiones (1) y (2).

$$Q_a = Q_p + Q_r \quad (1)$$

$$Q_a \cdot C_a = Q_p \cdot C_p + Q_r \cdot C_r \quad (2)$$

El modelo de solución-difusión describe el transporte de agua y solutos a través de la membrana<sup>4</sup>. En membranas de OI el flujo de permeado,  $J_p$  ( $L/m^2h$ ), está directamente relacionado con la presión transmembrana efectiva,  $\Delta P_{efectiva} = [\Delta P - \Delta \pi]$ , que es la diferencia de presión entre la presión hidrostática a través de la membrana,  $\Delta P$  y el diferencial de presión osmótica  $\Delta \pi$  en ambos lados de la membrana.

$$J_p = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (3)$$

El coeficiente  $A$  es el coeficiente de permeabilidad hidráulica de la membrana y depende de varios factores como son: el espesor de la membrana, la carga iónica del agua de alimentación y la temperatura entre otros factores.

La presión osmótica,  $\pi$ , puede determinarse según la ecuación de Van't Hoff:

$$\pi = i \cdot C \cdot R \cdot T \quad (4)$$

Donde  $C$  es la concentración molar,  $R$  la constante de los gases ideales,  $T$  la temperatura e  $i$  es un coeficiente adimensional relacionado con el grado de disociación  $\alpha$  según la expresión  $i = 1 + \alpha(v-1)$ , siendo  $v$  el número de iones totales (suma de los coeficientes estequiométricos de los iones en la disociación). En el caso del cloruro sódico se tiene que  $i=2$ .

El flujo de soluto,  $J_s$ , está relacionado con el gradiente de concentración en ambos lados de la membrana,  $\Delta C_s$ , mediante el coeficiente de permeabilidad  $B$ .  $B$  es una constante única y característica de cada tipo de membrana

$$J_p = B(\Delta C_s) \quad (5)$$

La tasa o factor de conversión,  $Y$  (%), es la relación entre el caudal de permeado,  $Q_p$ , y el caudal de alimentación,  $Q_a$ .

$$Y = \frac{Q_p}{Q_a} \cdot 100 \quad (6)$$

El rechazo de soluto,  $R$ , se denota como la relación entre la concentración de solutos en el permeado ( $C_p$ ) y la alimentación ( $C_a$ ) según la ecuación 7 y es uno de los parámetros más importantes de la membrana y constituye el *know-how* de cada fabricante.

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_a} \quad (7)$$

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

Los ensayos se llevaron a cabo en una versión modificada de la planta desalinizadora piloto de OI del fabricante Gunt Hamburg, modelo CE530 que se muestra en la Figura 2. El equipo al completo está formado por una unidad de alimentación y un banco de ensayos, ambos conectados entre sí, hidráulica y eléctricamente.

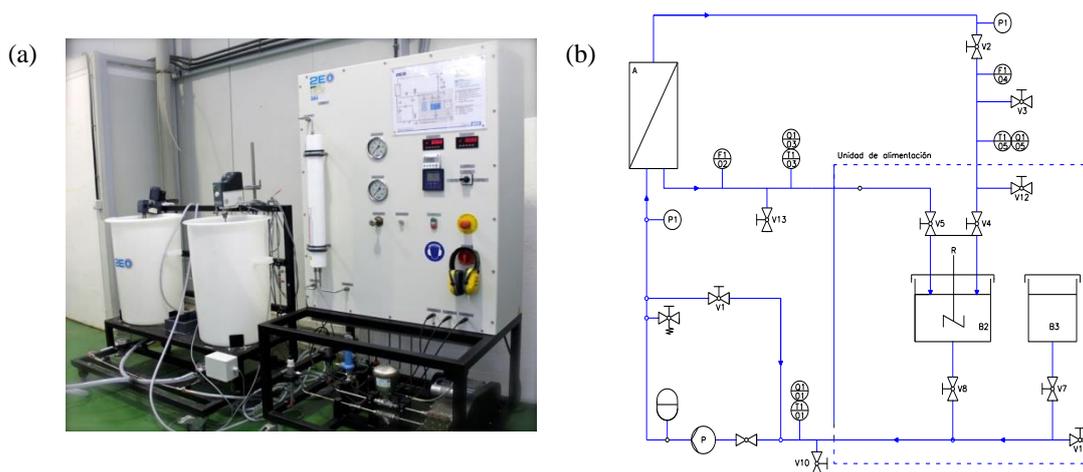


Figura 2. (a) Vista general de la planta de ósmosis inversa y (b) esquema de funcionamiento [Elaboración propia]

La planta piloto está dotada de la suficiente instrumentación para hacer un adecuado seguimiento de los principales parámetros de operación: (a) dos manómetros diferenciales con escala sectorial hasta 100 bar en las líneas de alimentación y rechazo (lo que permite conocer la presión del fluido a la entrada y a la salida del elemento de membrana), (b) caudalímetros electrónicos de molino, tipo paletas con indicador en panel con ala de 0 - 6 y 0 - 1,8 L/min para línea de rechazo y permeado respectivamente, (c) Interruptores de nivel tipo neumático, (d) tres sensores de conductividad y temperatura (WTW Tretracon 325) en la línea de alimentación, permeado y rechazo con salida de 4-20 mA y escala de 0-200 mS/cm y 0-50 °C con indicador en panel.

La planta piloto está equipada con un elemento de membrana de OI de arrollamiento en espiral de Filmtec modelo FT30 SW30-2521 (Dow® Water & Process Solutions)<sup>5</sup>. El área de la superficie activa de la membrana es 1,2 m<sup>2</sup>. Se trata de una membrana de película delgada de 3 capas: una capa ultra-delgada de 1,3 bencenodiamina (0,02 μm de espesor), una entrecapa de polisulfona microporosa y una malla de soporte de poliéster de alta resistencia. La malla no tejida proporciona el soporte estructural. Por haber utilizado un elemento de membrana del fabricante Dow® Water & Process Solutions, se debe utilizar su software comercial (ROSA), hay que mencionar que se podría haber utilizado cualquier elemento de membrana similar de otro fabricante, en tal caso, se debería utilizar el software del respectivo fabricante.

## 2.2. Cálculo de un módulo de membrana OI según el software de simulación ROSA 9.1

Los sistemas de membrana son diseñados de tal forma que cada elemento de membrana funcione dentro de un marco de condiciones de funcionamiento recomendadas por el fabricante, con el objeto de reducir al mínimo el ensuciamiento de la misma y excluir posibles fallos mecánicos.

Las condiciones de funcionamiento de un elemento de membrana están limitadas por: la conversión máxima, el flujo mínimo de rechazo, el máximo flujo de alimentación y la máxima velocidad de flujo. De tal forma que antes de empezar con los ensayos se estableció el caudal permeado (L/min) y la conversión de trabajo con la que se iban a realizar los ensayos, teniendo en cuenta como parámetro principal el flujo de permeado (L/m<sup>2</sup>h). Estos valores se establecieron teniendo en cuenta:

- 1) Las instrucciones de diseño del fabricante de los elementos de membrana comerciales (Form No. 609-02054-0812)<sup>6</sup>.
- 2) Los resultados de realizar una simulación con el software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) versión 9.1<sup>7</sup>.

En la tabla 1 se resumen las pautas recomendadas para el diseño de sistemas de OI con elementos Filmtec 2,5 pulgadas.

Tabla 1. Pautas para el diseño de elementos Filmtec en pequeñas aplicaciones de agua de mar<sup>6</sup>.

Parámetros	Fuente de alimentación	
	Pozo o MF	Toma abierta
Índice de densidad de sedimentos	SDI<3	SDI<5
Flujo (L/m <sup>2</sup> h)	22	19
Conversión máxima por elemento (%)	15	13
Caudal máximo de permeado (m <sup>3</sup> /día)	2,6	2,3
Caudal mínimo de rechazo (m <sup>3</sup> /h)	0,2	0,2

Hay que indicar que los valores dados en la tabla 1 son valores típicos para la mayoría de los sistemas de OI con membranas de 2,5 pulgadas, pero no están destinados a ser valores límites. En nuestro caso trabajaremos con un agua de mar preparada con cloruro sódico a partir de agua de abasto, con lo que consideraremos un SDI<3.

En cuanto a las simulaciones realizadas con el software ROSA 9.1, la membrana empleada en los ensayos no está disponible en la base de datos del software, no obstante, el propio fabricante permite efectuar una proyección con otra membrana del mismo diámetro. La relación entre las áreas activas de ambos elementos de membrana nos permitirá realizar la proyección para nuestra membrana.

En nuestro caso se quiere simular el elemento de membrana SW30-2521 con la SW30-2540, ambas con un diámetro de 2,5 pulgadas y con un área activa de 1,2 y 2,6 m<sup>2</sup> respectivamente. De esta forma se obtiene que la relación entre áreas activas de los elementos es de 0,462. De tal forma que el caudal de permeado simulado habrá que multiplicarlo por esa relación de áreas. El resto de parámetros como la presión de operación, conversión, rechazo, pueden usarse directamente desde la simulación.

Teniendo en cuenta esto, la determinación del caudal de permeado con la que se trabajará se realizó de forma iterativa, introduciendo los datos de forma manual en cada una de las cinco pestañas que aparecen en el software ROSA y posteriormente se calcularon, nuevamente, los caudales teniendo en cuenta la relación entre áreas activas.

**Pestaña 1) Project Information.** En esta ventana se introdujeron los datos generales del proyecto a estudiar y se seleccionaron las unidades de medida a emplear (m<sup>3</sup>/h, bar, °C)

**Pestaña 2) Feed Data.** En esta pestaña se seleccionó el tipo de agua, que en este caso es «Agua de mar con una filtración de membrana genérica, SDI<3». También se introdujeron el pH, la temperatura y las concentraciones de los iones del agua de alimentación (32 g/L de NaCl) que se corresponde con los datos del agua de alimentación de un día normal de trabajo. Un ejemplo de la pantalla en cuestión se observa en la Figura 3a. Una vez introducidos los resultados del análisis del agua

de mar sintética, el programa ajustó de forma automática algunos iones de ciertas sales resultando la composición iónica del agua de mar.

**Pestaña 3) Scaling Information.** En esta pestaña se muestra la temperatura asignada en la Pestaña 2 y se especifica la conversión. Una muestra de la ventana se presenta en la Figura 3b. En esta pestaña se ha seleccionado la opción de «No adición de productos químicos».

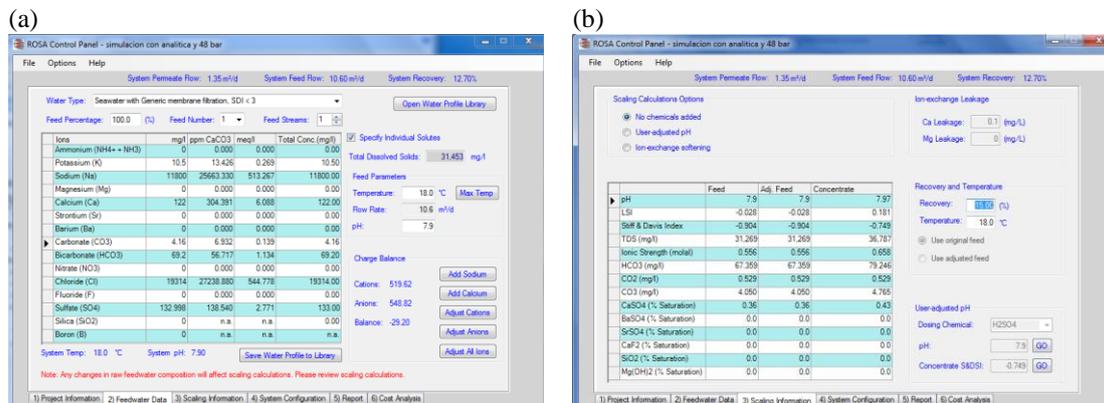


Figura 3. (a) Pestaña 2) Feed Data y (b) Pestaña 3) Scaling Information [Elaboración propia a partir de ROSA 9.1]

**Pestaña 4) System Configuration.** Esta pestaña contiene la mayoría de las variables del proceso y permite crear la configuración completa del sistema. En nuestro caso se trata una configuración de un solo elemento de membrana. Se introdujeron los valores invariables como son el modelo de la membrana, una única caja de presión y un único elemento de membrana. Se introdujeron el caudal de entrada (*Feed Flow*), la conversión (*Recovery*), la temperatura de operación y, por último, el “*Flow Factor*”. Una muestra de esta pantalla se observa en la Figura 4a.

La determinación del caudal de permeado se realiza por tanteo y de forma iterativa, introduciendo los datos de forma manual en el software ROSA 9.1. En primera instancia se introdujo un valor al azar de caudal de permeado teniendo en cuenta las instrucciones de diseño del fabricante de la membrana. Así, posteriormente, se recalcularon los datos obtenidos de caudal de permeado, rechazo y alimentación teniendo en cuenta la relación entre las áreas activas de ambos elementos. Por último, se analizaron los resultados del programa con las instrucciones de diseño del fabricante teniendo especialmente en cuenta el flujo de permeado,  $J$  (L/m<sup>2</sup>h). Si el caudal de rechazo es inferior o bien el flujo de permeado no cumple con las recomendaciones, entonces se aumenta el caudal de permeado y/o conversión.

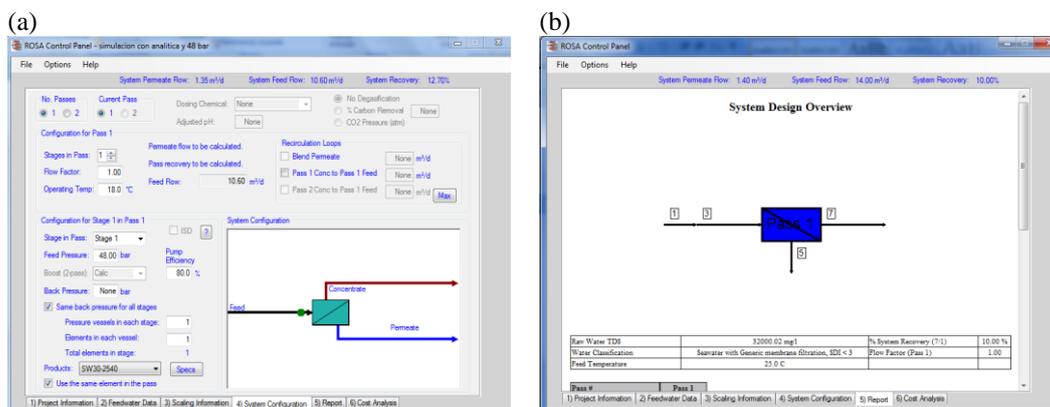


Figura 4. (a) Pestaña 4) System Configuration y (b) Pestaña 5) Report [Elaboración propia a partir de ROSA 9.1]

**Pestaña 5) Report.** Por último, seleccionando esta pestaña se despliega una ventana con toda la información inicial y la resultante de los cálculos (ver Figura 4 b).

## 2.2. Caracterización de un módulo de membrana de OI en planta piloto. Diseño de los ensayos

El diagrama esquemático de la planta desalinizadora empleada en los ensayos se muestra en la figura 2b.

La primera parte de los ensayos consiste en la preparación del agua de alimentación al sistema de OI, cuyos requerimientos serán los siguientes:

- El agua de alimentación será agua de abasto salinizada con unos 32 g/L de cloruro sódico mediante la adición de NaCl al 99,4% en peso de riqueza.
- El pH será ajustado a  $8 \pm 0,2$  mediante la adición de HCl o NaOH, valor que representa la alcalinidad típica de las aguas naturales.
- Eliminación del cloro libre hasta niveles inferiores a 0,1 mg/L (para no dañar la membrana por oxidación) mediante la adición de bisulfito sódico.

La duración del ensayo será de 2 h de las cuales 30 min estarán destinados a establecer el rendimiento estable de la membrana a las condiciones de presión aplicada y salinidad del agua de alimentación. Durante este periodo se procede a controlar y registrar los principales parámetros de operación: (1) presión a la entrada y la salida, (2) caudales de permeado y rechazo, (3) temperaturas de las corrientes de alimentación, permeado y rechazo y (4) conductividades de las corrientes de alimentación, permeado y rechazo.

En cuanto a las condiciones hidrodinámicas se especificarán los siguientes requisitos:

- Presión de alimentación constante a la entrada de la membrana a 48 bar. Su ajuste se lleva a cabo con las válvulas V-1 (Válvula bypass) y V-2 (Válvula rechazo).
- El caudal de permeado será ajustado a 0,43 L/min, según los datos teóricos extraídos de la simulación aportada por el software empleado, lo cual se consigue rectificando con las válvulas V-1 y V-2.

Una vez determinado el flujo de permeado a la presión indicada, el proceso se repite a distintas presiones. Usando dichos datos se pedirá que el estudiante analice el comportamiento de la membrana y determine el coeficiente de permeabilidad hidráulico de la membrana ( $A$ ) mediante el cálculo de la pendiente que resulta de representar el flujo de permeado vs presión aplicada, según ecuación 3. De esta forma el estudiante adquiere experiencia en la evolución de las características claves del desempeño de un elemento de membrana como es el flujo de permeado y rechazo. En la sección de resultados se muestra la determinación el coeficiente  $A$  en un punto de funcionamiento.

La experiencia de laboratorio también está diseñada para hacer cambios en las condiciones hidrodinámicas, carga iónica del agua de alimentación, temperatura, entre otros factores, así como para reforzar la teoría básica de la capa límite de transferencia de masa mediante un examen de la concentración por polarización.

En la tabla 2 se muestra el estadillo de datos que los estudiantes deberán de ir tomando.

Tabla 2. Estadillo de datos

<b>P</b> <b>(bar)</b>	<b>T</b> <b>(°C)</b>	<b>Q<sub>p</sub></b> <b>(L/min)</b>	<b>C<sub>p</sub></b> <b>(μS/cm)</b>	<b>Q<sub>r</sub></b> <b>(L/min)</b>	<b>C<sub>r</sub></b> <b>(mS/cm)</b>	<b>Q<sub>a</sub></b> <b>(L/min)</b>	<b>Q<sub>a</sub></b> <b>(mS/cm)</b>	<b>J<sub>p</sub></b> <b>(L/m<sup>2</sup>h)<sup>1</sup></b>	<b>J<sub>p</sub> (L/m<sup>2</sup>h)</b> <b>a 25°C<sup>2</sup></b>

<sup>1</sup> Determinar el flujo específico (obtenido a la temperatura de operación) a partir del caudal  $Q$  (L/min) y el área activa del elemento de membrana de ( $A= 1,2 \text{ m}^2$ )

<sup>2</sup> Determinar el flujo específico normalizado a 25°C según el procedimiento de normalización de flujo ASTM<sup>8</sup>

### 3. RESULTADOS

En la Figura 5a se muestra la evolución temporal del flujo de permeado típico que los estudiantes realizarán en el ensayo inicial de caracterización de la membrana. Para ello se ha empleado una disolución base, con una carga iónica de 32 g/L de NaCl y operando en las condiciones de operación fijadas. Puede apreciarse un ligero descenso del flujo que se corresponde con la fase de adaptación de la membrana a las nuevas condiciones de presión y salinidad que se estabiliza posteriormente.

Los caudales de permeado obtenidos en el ensayo de caracterización de la membrana, una vez superado el periodo de adaptación, estuvieron entorno a los 20,5 L/m<sup>2</sup>h. Este valor difiere en un 5,5% al resultado esperado en comparación con las condiciones teóricas dadas por el fabricante de la membrana, donde el flujo de permeado esperado es de unos 21,7 L/m<sup>2</sup>h (ver tabla 3). Hay que destacar que el propio fabricante de la membrana da un error de un  $\pm 20\%$  en los flujos de permeado para los elementos de membrana individuales<sup>4</sup>.

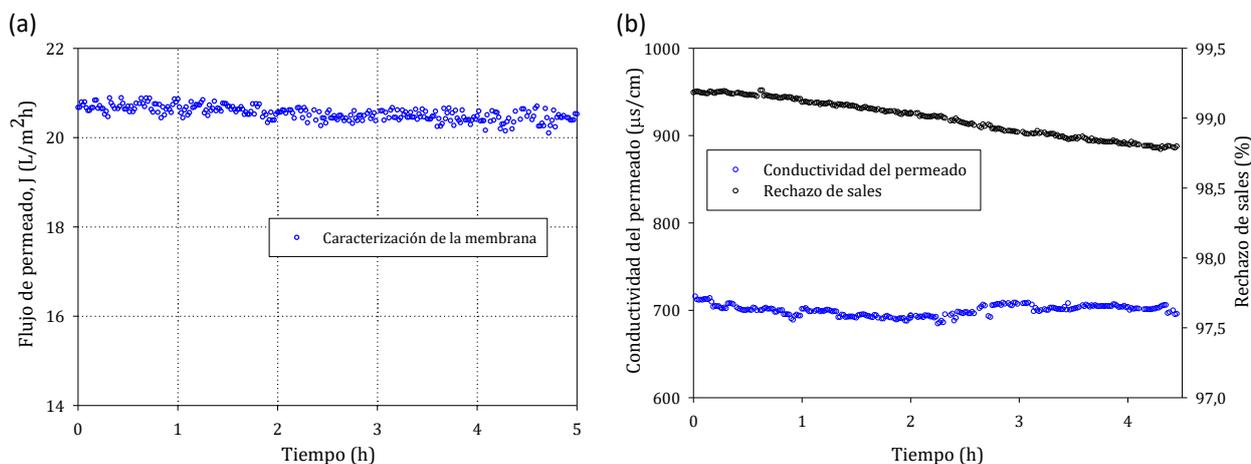


Figura 5. (a) Evolución temporal típica del flujo de permeado en los ensayos de caracterización de la membrana (b) Evolución de la conductividad del permeado y del rechazo salino. Condiciones de operación: STD del agua de alimentación ~32000 mg/L, presión de operación: 48 bar y pH 8 [Elaboración propia].

En la Figura 5b se representa la evolución temporal de la conductividad del permeado y el rechazo salino. Se puede observar como al disminuir el rechazo de sales aumenta la conductividad del permeado.

Respecto a la evolución de la conductividad del permeado, ésta oscila entre 676,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 716,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un valor medio de 699,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se puede apreciar también que la evolución de la conductividad una vez superado el periodo de adaptación tiende a estabilizarse. Respecto al rechazo de sales, éste presenta un valor máximo y mínimo de 98,8% y 99,2%, respectivamente, con un valor medio de 98,9%.

En cuanto a las características del agua producto, tras el periodo de adaptación de la membrana a las nuevas condiciones de operación, se produce una estabilización tanto de la conductividad del permeado como del rechazo salino, como puede observarse en la Figura 5b debido a que los procesos de separación y rechazo de la membrana son independientes de la conversión del sistema.

Según los resultados el factor de rechazo medio es de un 98,9%. Sin embargo, el rechazo de sales teórico suministrado por el fabricante de la membrana es del 99,4%. La diferencia entre los datos experimentales y los teóricos se debe principalmente a que el dato teórico suministrado por el fabricante está referido a otras condiciones de operación (32 g/L, presión aplicada: 55 bar y una tasa de conversión del 4%). Aparte de lo comentado, el rechazo salino puede ser algo menor, también, debido a la propia compactación de la membrana.

Tabla 3. Comparativa de resultados

	<b>Fabricante<sup>5</sup></b>	<b>Programa simulación<sup>1</sup></b>	<b>Experimental<sup>1</sup></b>
Jp (L/m <sup>2</sup> h)	20-22	21,7	20,5
FC (%)	<15	12,7	11,1
RS (%)	99,4	99,4	98,9
A (L/m <sup>2</sup> ·h·bar)	--	1,05	0,99

<sup>1</sup>Condiciones de operación: STD del agua de alimentación ~32000 mg/L, presión de operación: 48 bar y pH 8

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito el diseño e implementación de una práctica de laboratorio destinada a los estudiantes del Grado de Ingeniería Química como del Grado de Química Industrial. El desarrollo de la misma es sencillo y ofrece la oportunidad de profundizar en el conocimiento de los fenómenos de transporte a través de membranas ya que favorece el análisis de los resultados. Los estudiantes aprenderán a caracterizar un elemento de membrana de arrollamiento en espiral, atendiendo no solo, a las instrucciones del fabricante de las membranas y al software de simulación, sino también, a través de un ensayo con un elemento de membrana industrial. Así mismo, observarán los cambios que se producen cuando las condiciones hidrodinámicas, la carga iónica del agua de alimentación, la temperatura, así como otras variables del proceso cambian.

## REFERENCIAS

- [1] Anastasio, D., Mccutcheon J., “Teaching mass transport and fluid mechanics using reverse osmosis”. Chemical Engineering Education 46(1) (2012).
- [2] Anastasio D., y Mccutcheon J.R., “Using forward osmosis to teach mass transfer fundamentals to undergraduate chemical engineering students”. Desalination 312 (2013) 10–18.
- [3] J.A. Medina San Juan. [Desalación de aguas salobres y de mar. Osmosis Inversa], Ediciones Mundi-Prensa, Madrid (2000).
- [4] Wijmans, J. G., & Baker, R. W. “The solution-diffusion model: a review”. Journal of membrane science, 107 (1-2), (1995) 1-21.
- [5] Dow Water & Process Solutions. Dow Filmtec Seawater RO Elements for Marine Systems. Form No. 609-00377-0811.
- [6] Dow Water & Process Solutions. Tech Manual Expert. System Design: Membrane System Design Guidelines for Commercial Elements. Form No. 609-02054-0812.
- [7] Dow Water & Process Solutions. Rosa System Design Software, consultada el 22 de septiembre de 2017, [www.dowwaterandprocess.com/en/resources/osa\\_system\\_design\\_software](http://www.dowwaterandprocess.com/en/resources/osa_system_design_software).
- [8] ASTM D 4516 – 00 Standard Practice for Standardizing Reverse Osmosis Performance Data.