

Modelo dinámico y simulación de sistemas de ósmosis inversa

Suárez, D.^{a,*}, Ruiz, A.^a, De La Nuez, I.^a

^aDepartamento de Ingeniería Electrónica y Automática, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus de Tafira, 35017 Las Palmas, Canarias, España.

To cite this article: Suárez, D., Ruiz, A., De La Nuez, I. 2023. Dynamic Modelling and Simulation of Reverse Osmosis Systems. XLIV Jornadas de Automática, 483-488. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.483>

Resumen

La ósmosis inversa (OI) es el proceso de desalación del agua marina más avanzado y eficiente en la actualidad. Un sistema de OI trabaja en régimen permanente durante largos periodos de tiempo, aunque cabe la posibilidad de que sea forzado a trabajar fuera del punto de consigna. En este trabajo se propone un modelo dinámico que permite estimar los parámetros de salida de cada uno de los elementos de membrana, dispuestos en serie, en tubos de presión. Dicho modelo permite estimar la respuesta de sistemas híbridos de ósmosis inversa. Es decir, distintos elementos de membrana con distintas características en términos de coeficientes de permeabilidad, altura de espaciadores, superficie activa, coeficientes de transferencia de masa, etc. El modelo propuesto se ha ensayado frente a variaciones en la presión de la alimentación y en su concentración, llegándose a la conclusión de que estas perturbaciones afectan en mayor medida al caudal del permeado que a su concentración. El trabajo es de interés para el control de plantas desalinizadoras impulsadas por una fuente de energías renovables con entrega de potencia variable, como energía solar fotovoltaica o energía eólica.

Palabras clave: Ósmosis inversa, Membrana, Desalación, Modelo dinámico, Simulación.

Dynamic Model and Simulation of Reverse Osmosis Systems

Abstract

Nowadays, reverse osmosis (RO) is the most advanced and efficient process for desalinating seawater. An RO system operates continuously for long periods of time, although it may be forced to operate outside its set point. In this paper, a dynamic model that allows to estimate the output parameters of each of the membrane elements, which are arranged in series in a pressure vessel (PV), is proposed. This model allows to estimate the response of hybrid reverse osmosis systems. That is, different membrane elements with different characteristics such as permeability coefficients, spacer height, active surface area, mass transfer coefficients, etc. The proposed model has been tested against variations in feed pressure and feed concentration, reaching the conclusion that these perturbations affect the permeate flow rate more than its concentration. This work is of interest for the control of desalination plants powered by a variable renewable energy source, such as photovoltaic solar power or wind power.

Keywords: Reverse osmosis, Membrane, Desalination, Dynamic model, Simulation.

1. Introducción

La ósmosis inversa (OI) es la tecnología más extendida en desalinización tanto de agua de mar como de agua salobre a gran escala (Qasim et al., 2019). Esto se debe a que esta tecnología es más eficiente desde el punto de vista energético que otras (Voutchkov, 2018). A pesar de esto, la OI es un proceso

intensivo desde el punto de vista energético, provocando que se hagan muchos esfuerzos para reducir el consumo de energía específico de este tipo de instalaciones (Lim et al., 2021). Este consumo de energía está vinculado a la emisión de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales (Najid et al., 2021). El uso de energías renovables para alimentar plantas

*Autor para correspondencia: daniel.suarez121@alu.ulpgc.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

desalinizadoras por ósmosis inversa es una alternativa para reducir el impacto de este tipo de instalaciones sobre el cambio climático (Bundschuh et al., 2021). Este tipo de instalaciones pueden operar en régimen permanente (conectadas a red), intermitente y/o variable.

Normalmente, los sistemas de OI trabajan en régimen permanente durante largos periodos de tiempo. Los únicos factores que fuerzan a este tipo de sistemas a trabajar fuera del punto de consigna son: variaciones en los parámetros del agua de alimentación, como concentración y temperatura y el efecto del ensuciamiento sobre la superficie de las membranas lo que obliga a una regulación de la misma para mantener constante la producción (Ruiz-García and Ruiz-Saavedra, 2015). El ensuciamiento puede afectar al sistema de OI de varias formas, aumentando la caída de presión a lo largo de las etapas del sistema de OI (Ruiz-García and Nuez, 2021), disminuyendo la permeabilidad al agua de la membrana (Najid et al., 2022), lo que hace que se requiera más presión de alimentación para mantener la producción de permeado constante, y/o aumentando la permeabilidad al soluto de las membranas, lo que produce que aumente la concentración en el permeado y por lo tanto que disminuya su calidad. En general, el ensuciamiento afecta de forma relativamente lenta al rendimiento de sistemas de ósmosis inversa, esto puede ser debido a la frecuencia de limpiezas químicas para mitigar el efecto del ensuciamiento o al bajo potencial ensuciante del agua de alimentación. Normalmente, la dinámica del ensuciamiento es bastante lenta (Ruiz-García and Nuez, 2016), ignorándose su efecto en los transitorios de arranque, parada y efecto de las perturbaciones. En sistemas de OI potenciados con fuentes variables de energía renovables (FVER) (viento, sol, etc), la potencia de alimentación al sistema de OI presenta variaciones que afectan al funcionamiento y rendimiento de este tipo de sistemas (Mito et al., 2022). Cuando un sistema de OI trabaja en régimen variable debido a que es potenciado por FVER, los transitorios tienen más importancia que en sistemas de OI trabajando en régimen permanente, situación en la cual, estos transitorios de dinámica relativamente rápida suelen ignorarse.

El funcionamiento en régimen variable de sistemas de OI ha sido estudiado por muchos autores (Mito et al., 2022; Ruiz-García et al., 2023; Lai et al., 2016; Ntavou et al., 2016; Dimitriou et al., 2017; Zein et al., 2023). El análisis de este tipo de sistema requiere de un modelado dinámico que permita estudiar el comportamiento de estos sistemas frente a fluctuaciones de energía de entrada (presión y caudal) y variaciones en término de temperatura y concentración del agua de alimentación. En este trabajo se presenta un modelo dinámico de sistemas de OI que permite no solo tener en cuenta los factores anteriormente mencionados, sino también tener en cuenta el efecto del ensuciamiento sobre los elementos de membrana de forma individual, pues el ensuciamiento no afecta de igual forma al primer elemento que al último dentro del tubo de presión.

2. Materiales y Metodología

Para este estudio se ha considerado un sistema de OI para desalinizar agua de mar compuesto por una etapa de un tubo

de presión con siete elementos de membranas en serie (1). Los elementos de membrana considerados tienen configuración de arrollamiento en espiral. Las características del modelo seleccionado se muestran en la Tabla 1. Las características se muestran en términos de superficie de membranas (S_m), altura del espaciador del lado de la alimentación (h), rechazo de NaCl ($Rech$), coeficiente de permeabilidad al agua (A_w) y coeficiente de permeabilidad a la sal (B_s). La porosidad del canal de alimentación (ϵ) fue de 0.89.

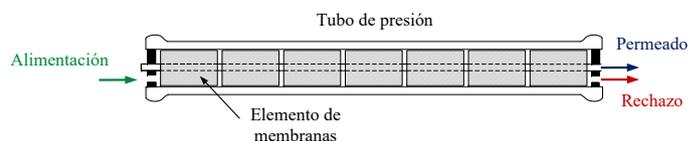


Figura 1: Diagrama de flujo de un tubo de presión con 7 elementos de membranas en serie.

Tabla 1: S_m , h , $Rech$ A , and B del elemento Filmtec™ SW30XLE-400

| Parameter | Value |
|---|------------------------|
| S_m (m ²) | 37.16 |
| h (m) | 7.11×10^{-4} |
| $Rech$ (%) | 99.86 |
| A_w (m Pa ⁻¹ s ⁻¹) | 6.06×10^{-12} |
| B_s (m s ⁻¹) | 1.45×10^{-8} |

El modelo dinámico desarrollado en este trabajo se aplica a cada uno de los elementos de membrana dentro de un tubo de presión, estimando la recuperación del sistema mediante un procedimiento iterativo. En trabajos anteriores, se aplica el modelo a un sistema de OI sin tenerse en cuenta las variaciones de un elemento a otro, asumiéndose que son todos iguales y que esto no afecta al rendimiento. Por último, suele suponerse la recuperación del sistema para hacer que esta sea un dato de partida, lo cual no es preciso.

2.1. Modelo dinámico de sistemas de OI

Las ecuaciones utilizadas están basadas en el fenómeno de transporte de solución-difusión, el cual es ampliamente utilizado para estimar el comportamiento de sistemas de OI debido a que los resultados que se obtienen son cercanos a la realidad (Qasim et al., 2019). Las ecuaciones fueron aplicadas considerando promedios por elemento de membrana y de forma secuencial, es decir, las salidas del primer elemento son las entradas del segundo y así hasta el séptimo elemento. Destacar que el modelo permite estimar el comportamiento de cualquier elemento de membrana si se disponen de sus características (Tabla 1), además permite simular sistemas híbridos (distintos modelos en el mismo tubo de presión). Para la resolución de las ecuaciones se requiere de un algoritmo de optimización. El algoritmo utilizado para la estimación del rendimiento del sistema de OI se puede encontrar en un estudio anterior publicado por los autores Ruiz-García and de la Nuez-Pestana (2018).

Las ecuaciones utilizadas se listan a continuación:

$$J_w = Q_p/S_m = A_w TCF(\Delta p - \Delta\pi) \quad (1)$$

Siendo J_w el flujo de agua permeada por unidad de superficie y A_w es el coeficiente de permeabilidad al agua de la membrana. TCF es el factor de corrección de la temperatura cuando esta es distinta de 25 °C, y su ecuación de cálculo se muestra más adelante.

La diferencia de presión a lo largo de la membrana, Δp se calcula con:

$$\Delta p = p_f - p_p - 0.5p_{\text{drop}} \quad (2)$$

Siendo p_f y p_p las presiones de la alimentación y el permeado, respectivamente. La caída de presión a lo largo de la membrana, p_{drop} , se puede obtener como:

$$p_{\text{drop}} = \frac{0.01}{14.8} n_e (Q_{\text{bulk}})^{1.7} \quad (3)$$

Donde Q_{bulk} es el grueso del caudal dentro del canal de concentrado y n_e es el número de elementos en serie.

Por otro lado, para calcular la diferencia de presión osmótica, $\Delta\pi$, se utiliza:

$$\Delta\pi = n_i R(T + 273) MW^{-1} (C_w - C_p) \quad (4)$$

Donde R es la constante de los gases ideales, n_i es el número de moles en una molécula de cloruro de sodio (NaCl), MW es su peso molecular, T es la temperatura del agua de alimentación (en °C), C_w es la concentración media en la pared de la membrana y C_p es la concentración del agua producto.

Los cambios de temperatura en la corriente de alimentación, que ocasionan variaciones en la permeabilidad del agua y la sal, se han tenido en cuenta, al utilizar la siguiente expresión empírica para corregir la temperatura:

$$TCF = \exp\left[\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T + 273}\right)\right] \quad (5)$$

La expresión anterior es válida para temperaturas mayores a 25 °C. En caso de temperatura inferiores a esta, se debe utilizar:

$$TCF = \exp\left[3020\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T + 273}\right)\right] \quad (6)$$

Retomando (2), la presión de la alimentación, p_f , se obtiene como:

$$p_f = \frac{1}{A_w TCF} \frac{Q_p}{S_m} + p_p + 0.5p_{\text{drop}} + \Delta\pi \quad (7)$$

Donde la presión de la salmuera, p_b , se calcula con la diferencia de:

$$p_b = p_f - p_{\text{drop}} \quad (8)$$

La concentración media de agua de mar en la pared de la membrana, mencionada en (4), se puede obtener en la expresión siguiente:

$$\frac{C_w - C_p}{C_{\text{bulk}} - C_p} = \exp(J_w/K_m) \quad (9)$$

Siendo C_{bulk} el grueso de la concentración del flujo, y K_m el coeficiente de transferencia de masa a través de la membrana, que se calcula con la *Analogía de Sherwood*:

$$Sh = \frac{K_m d_h}{D_B} = 0.2Re^{0.57} Sc^{0.4} \quad (10)$$

Donde Sh es el número de Sherwood, d_h es el diámetro hidráulico del canal de salmuera, Sc es el número de Schmidt y Re el número de Reynolds en dicho canal. Sc se calcula como:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_B} \quad (11)$$

Siendo μ la viscosidad dinámica del agua de alimentación y ρ su densidad.

En cuanto al número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho d_h v_{\text{bulk}}}{\mu} \quad (12)$$

En este caso, v_{bulk} es la velocidad del flujo a través del canal de salmuera, y se calcula como:

$$v_{\text{bulk}} = \frac{Q_{\text{bulk}}}{n_1 w_{bc} t_{bc} \varepsilon} \quad (13)$$

Donde t_{bc} es el espesor de la pared del canal, y ε es la fracción de vacío que representa la reducción del volumen vacío dentro del canal. Además, n_1 es el número de hojas de membrana y w_{bc} es el ancho del canal de salmuera.

El diámetro hidráulico, que interviene en (10) y (12), se obtiene como:

$$d_h = \frac{4\varepsilon}{2h^{-1} + (1 - \varepsilon)8h^{-1}} \quad (14)$$

Siendo h el espesor del separador en la alimentación.

Como resultado de la diferencia de concentraciones entre las corrientes de producto y salmuera, la sal se infiltra en la membrana junto con moléculas de agua. Este fenómeno de transporte de masas queda descrito en la ecuación siguiente, donde J_s es el flujo de sal transportada:

$$J_s = B_s TCF \exp(J_w/K_m) (C_{\text{bulk}} - C_p) \quad (15)$$

Las características transitorias del desempeño de los módulos de ósmosis inversa están asociadas a variaciones en la concentración de la salmuera a lo largo de la membrana. Estas variaciones afectan directamente a la respuesta en presión del sistema y al flujo de permeado a través de cambios en la resistencia osmótica. El cambio en la concentración C_{bulk} relacionado a la acumulación de sal en el canal, se obtiene como un balance de sal a lo largo de toda la membrana y a través de la capa activa utilizando la fórmula de la conservación de la concentración:

$$V_{bc} \frac{dC_{\text{bulk}}}{dt} = Q_f C_f - Q_b C_b - Q_p C_p \quad (16)$$

Siendo V_{bc} el volumen del canal de salmuera, y C_b su concentración. Ambos pueden calcularse mediante las expresiones (17) y (18):

$$V_{bc} = n_e n_1 w_{bc} t_{bc} \varepsilon \quad (17)$$

$$C_b = 2C_{\text{bulk}} - C_f \quad (18)$$

De forma similar, el cambio transitorio en la concentración del permeado se expresa como:

$$V_{pc} \frac{dC_p}{dt} = Q_p C_{p,m} - Q_p C_p \quad (19)$$

Donde $C_{p,m}$ es la concentración local del permeado en la superficie de la membrana y V_{pc} es el volumen del canal del permeado. Estos se obtienen como:

$$C_{p,m} = J_s / J_w \quad (20)$$

$$V_{pc} = n_e n_l w_{bc} l_{bc} \varepsilon \quad (21)$$

Este conjunto de ecuaciones describen las características de las corrientes de salida para un tubo de presión, pero también pueden emplearse para un elemento de membrana en su interior. Encadenándose para varios elementos en serie, se tendría que:

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^N C_{p,i} Q_{p,i}}{Q_p} \quad (22)$$

Para estudiar las respuesta del sistema frente a variaciones en p_f y C_f se han introducido como señales de entrada escalones de -5 y $+10$ bar y de -2 y $+5$ kg/m³ respectivamente. Las variaciones en términos de concentración son perturbaciones del sistemas pues la salinidad del agua de alimentación no se puede manipular mientras que los cambios en p_f pueden ser debidos a la disponibilidad de energía o al ensuciamiento de elementos de la planta.

3. Resultados y Discusión

La Figura 2 muestra las variaciones de Q_p y C_p frente a un decremento de 5 bar en el segundo 1 y a un incremento de 10 bar en el segundo 2 en p_f . Se observa que a decrementos de p_f disminuyen tanto Q_p como C_p , mientras que a incrementos de p_f aumenta Q_p y C_p se estabiliza en valores similares a los observados para $p_f = 50$ bar (el valor inicial). Además, han de destacarse las sobreoscilaciones que tienen lugar en los segundos 1 y 2, justo cuando ocurre el cambio del valor de p_f . Se observa que la sobreoscilación es mayor conforme a la magnitud del incremento o decremento en la presión de entrada. Así, Q_p mostró ser más sensible a cambios de p_f que C_p .

Los valores en régimen permanente de Q_p fueron 3.59, 3.14 y 3.94 m³/h para las variaciones de p_f mencionadas anteriormente. Esta respuesta va a depender de las características del elemento utilizado, pudiéndose producirse otros valores para elementos con más S_m o distintos valores de coeficientes de permeabilidad, etc. Hay que destacar que la dinámica de p_f dependerá de la dinámica de la bomba de alta presión, factor que no se ha considerado en este trabajo.

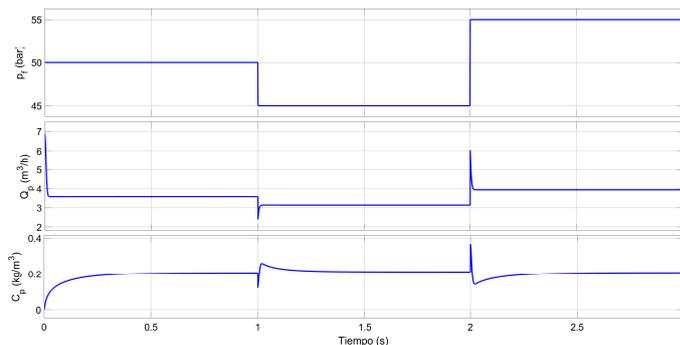


Figura 2: Variación de Q_p y C_p frente a variaciones de p_f .

La Figura 3 muestra las variaciones de Q_p y C_p frente a un decremento de 2 kg/m³ en el segundo 1 y a un incremento de 5 kg/m³ en el segundo 2 en C_f . Los aumentos de C_f producen un incremento en la presión osmótica a vencer, lo que producen decrementos de Q_p e incrementos de C_p , ya que a más concentración a la entrada de los elementos mayor concentración en el permeado. En este caso, las sobreoscilaciones desaparecen para el caudal, y en la concentración del permeado no son tan pronunciadas.

El decremento de 2 kg/m³ en C_f produjo un incremento en régimen permanente de 0.22 m³/h en Q_p y un decremento de 0.02 kg/m³ en C_p . Por otro lado, el incremento de 5 kg/m³ produjo un decremento de 0.56 m³/h en Q_p y un decremento de 0.04 kg/m³ en C_p . Se debe remarcar que las variaciones de Q_p corresponden a un tubo de presión, en caso de una planta desalinizadora con varios tubos de presión, estas variaciones sería considerables y afectarían al rendimiento de la planta.

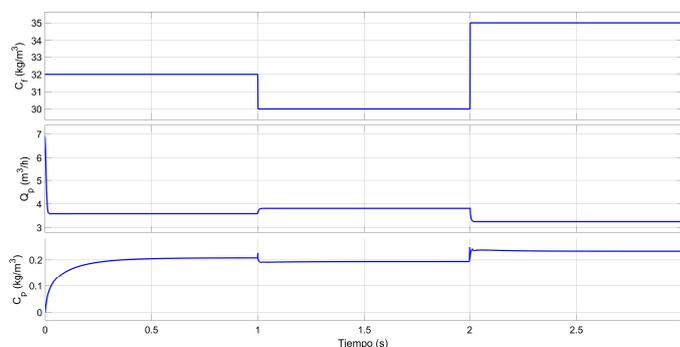


Figura 3: Variación de Q_p y C_p frente a variaciones de C_f .

4. Conclusiones

Tal y como se ha mencionado anteriormente, resulta de gran interés estudiar el comportamiento de los sistemas de ósmosis inversa cuando tienen lugar fluctuaciones en la energía de entrada, o cambios en la concentración del agua de alimentación. En este trabajo, además, se incluye el efecto del ensuciamiento sobre los elementos de membrana de forma individual. El modelo desarrollado está compuesto por un tubo de presión con siete elementos de membrana en serie, cuyas características son conocidas (Tabla 1). Sin embargo, el modelo permite estudiar cada elemento de forma independiente, bien porque tuviesen

características distintas o bien porque fuese un sistema híbrido.

Finalmente y tras las pruebas realizadas, se destaca que el caudal del permeado es la variable que responde de manera más sensible frente a fluctuaciones de energía (cambios de presión), así como por variaciones de la concentración del agua de alimentación. Además, un aumento en la presión de alimentación aumenta la presión del permeado, pero sin llegar a deteriorar la calidad de este. En líneas futuras, sería interesante acoplar este modelo dinámico a una fuente de energías renovables con potencia variable, que bien podría ser un sistema de energía solar fotovoltaica o energía eólica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Programa de Cooperación Interreg MAC 2014-2020. Proyecto ACLIEMAC (MAC2/3.5b/380).

Referencias

- Bundschuh, J., Kaczmarczyk, M., Ghaffour, N., Tomaszewska, B., 2021. State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects. *Desalination* 508, 115035. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916421001065> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115035>
- Dimitriou, E., Boutikos, P., Mohamed, E. S., Koziel, S., Papadakis, G., 2017. Theoretical performance prediction of a reverse osmosis desalination membrane element under variable operating conditions. *Desalination* 419, 70–78. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916416318847> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.06.001>
- Lai, W., Ma, Q., Lu, H., Weng, S., Fan, J., Fang, H., 2016. Effects of wind intermittence and fluctuation on reverse osmosis desalination process and solution strategies. *Desalination* 395, 17–27. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916416304209> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.019>
- Lim, Y. J., Goh, K., Kurihara, M., Wang, R., 2021. Seawater desalination by reverse osmosis: Current development and future challenges in membrane fabrication - A review. *J. Membr. Sci.* 629, 119292. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738821002416> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119292>
- Mito, M. T., Ma, X., Albuflasa, H., Davies, P. A., 2022. Variable operation of a renewable energy-driven reverse osmosis system using model predictive control and variable recovery: Towards large-scale implementation. *Desalination* 532, 115715. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916422001709> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115715>
- Najid, N., Fellaou, S., Kouzbou, S., Gourich, B., Ruiz-García, A., 2021. Energy and environmental issues of seawater reverse osmosis desalination considering boron rejection: A comprehensive review and a case study of exergy analysis. *Process Saf. Environ. Prot.* 156, 373–390. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582021005358> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.014>
- Najid, N., Hakizimana, J. N., Kouzbou, S., Gourich, B., Ruiz-García, A., Vial, C., Stiriba, Y., Semiat, R., 2022. Fouling control and modeling in reverse osmosis for seawater desalination: A review. *Comput. Chem. Eng.* 162, 107794. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135422001351> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107794>
- Ntavou, E., Kosmadakis, G., Manolakos, D., Papadakis, G., Papanonis, D., 2016. Experimental evaluation of a multi-skid reverse osmosis unit operating at fluctuating power input. *Desalination* 398, 77–86. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916416308451> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.07.014>
- Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., Hilal, N., 2019. Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination* 459, 59–104. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916418325037> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008>
- Ruiz-García, A., de la Nuez-Pestana, I., 2018. A computational tool for designing bwro systems with spiral wound modules. *Desalination* 426, 69–77. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916417310950> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.040>
- Ruiz-García, A., Nuez, I., 2016. Long-term performance decline in a brackish water reverse osmosis desalination plant. predictive model for the water permeability coefficient. *Desalination* 397, 101–107. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916416307093> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.06.027>
- Ruiz-García, A., Nuez, I., 2021. A time-dependent model of pressure drop in reverse osmosis spiral wound membrane modules. *IFAC-PapersOnLine* 54 (3), 158–163, 16th IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes ADCHEM 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896321010065> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.235>
- Ruiz-García, A., Nuez, I., Khayet, M., 2023. Performance assessment and modeling of an swro pilot plant with an energy recovery device under variable operating conditions. *Desalination* 555, 116523. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916423001558> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116523>
- Ruiz-García, A., Ruiz-Saavedra, E., 2015. 80,000h operational experience and performance analysis of a brackish water reverse osmosis desalination plant. assessment of membrane replacement cost. *Desalination* 375, 81–88. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916415300308> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.022>
- Voutchkov, N., 2018. Energy use for membrane seawater desalination – current status and trends. *Desalination* 431, 2–14, "Desalination, energy and the environment in honor of Professor Raphael Semiat. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916417321057> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.033>
- Zein, A., Karaki, S., Al-Hindi, M., 2023. Analysis of variable reverse osmosis operation powered by solar energy. *Renew. Energy* 208, 385–398. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148123002872> DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.001>

Nomenclatura

| | |
|----------|---|
| A_w | Water permeability coefficient ($\text{m Pa}^{-1} \text{s}^{-1}$) |
| B_s | Ion permeability coefficient (m s^{-1}) |
| C | Concentration (g L^{-1}) |
| D_B | Diffusivity ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) |
| d_h | Hydraulic diameter (m) |
| h | Feed spacer height |
| J | Flow per unit area ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) |
| K_m | Mass transfer coefficient |
| l_{bc} | Length of the spiral wound membrane module (m) |
| MW | Molecular weight |
| n_e | Number of elements in series |
| n_l | Number of membrane leaves |
| PV | Pressure vessel |
| p | Pressure (Pa) |
| Q | Flow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) |
| Re | Reynolds number |
| $Rech$ | Rejection (%) |
| RO | Reverse osmosis |
| S_m | Membrane surface (m^2) |
| Sc | Schmidt number |
| Sh | Sherwood number |
| SWMM | Spiral wound membrane module |
| T | Temperature ($^{\circ}\text{C}$) |
| TCF | Temperature correction factor |
| V | Volume (m^3) |
| w_{bc} | Width of the Brine channel (m) |

Greek letters

| | |
|---------------|--|
| ε | Porosity of the cross-sectional area in the feed channel |
| μ | Dynamic viscosity ($\text{kg m}^{-1} \text{s}$) |
| ν | Velocity (m s^{-1}) |
| π | Osmotic pressure (Pa) |
| ρ | Density (kg m^{-3}) |
| Δp | Pressure gradient (Pa) |
| $\Delta \pi$ | Osmotic pressure gradient (Pa) |

Subscripts

| | |
|-----|------------------------------------|
| f | Feed |
| i | Position of the SWMM within the PV |
| m | Membrane |
| p | Permeate |
| b | Brine |
| bc | Brine channel |
| pc | Permeate channel |
| s | Solute |