

Optimización de un sistema de desalinización de agua por osmosis inversa (OI) en el departamento de La Guajira, Colombia

Dario Serrano-Florez¹, Whady Felipe Florez², Farid Chejne³

¹Desarrollo de Estudios y Tecnologías Ambientales del Carbono (DESTACAR), Facultad de Ingenierías, Universidad de La Guajira, Colombia. Email: dserrano@uniguajira.edu.co

²Grupo de Energía y Termodinámica, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín, Colombia. Email: whady.florez@upb.edu.co

³Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia. Email: fchejne@unal.edu.co

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es minimizar el consumo de energía específico (SEC) para reducir la cantidad de paneles solares fotovoltaicos sin afectar la producción de agua potable en la comunidad indígena. Para este estudio, se partió de un trabajo previo donde se realizó la modelación y simulación de un sistema de desalinización por OI en la comunidad “Yuyurupana”, se obtuvo un SEC de 0.644 kWh/m³, requiriendo 152 paneles solares de 385 Wp para suplir la energía del sistema. Aplicando una optimización no lineal con restricciones, utilizando una ecuación algebraica en función de la velocidad de alimentación y la resistencia de la válvula en el canal de salmuera, se logró disminuir el SEC a 0.405 kWh/m³. Esto permitió reducir a 92 la cantidad de paneles solares necesarios, sin afectar el caudal de agua potable requerido por la comunidad.

Palabras clave: Desalinización de agua; Osmosis inversa (OI); Optimización no lineal; Consumo de energía específico (SEC).

Abstract

The main objective of this work is to minimize the specific energy consumption (SEC) to reduce the number of photovoltaic solar panels without affecting the production of drinking water in the indigenous community. This study is based on previous work where a reverse osmosis desalination system was modeled and simulated in the “Yuyurupana” community, resulting in an SEC of 0.644 kWh/m³, requiring 152 solar panels of 385 Wp to supply the system's energy. By applying a nonlinear optimization with constraints, using an algebraic equation based on feed rate and valve resistance in the brine channel, the SEC was reduced to 0.405 kWh/m³. This allowed reducing the number of solar panels needed to 92, without affecting the water flow required by the community to meet its potable water needs.

Keywords: Water desalination; Reverse osmosis (RO); Nonlinear optimization; Specific energy consumption (SEC).

1. Introducción

La escasez de agua potable es un problema global debido a la alta demanda de este recurso esencial, tanto para el consumo humano como para aplicaciones agrícolas e industriales [1]. Existen múltiples métodos para la purificación del agua, pero el más utilizado es la ósmosis inversa (OI). La OI es un proceso que elimina especies indeseables, como sales y contaminantes, de soluciones líquidas (como agua de mar, ríos o aguas residuales). En este proceso, la solución se bombea a una presión superior a la presión osmótica a través de una membrana semipermeable,

permitiendo que el solvente pase al lado diluido y dejando atrás una solución más concentrada [2], [3].

La ósmosis inversa se aplica en diversas industrias, incluyendo la textil, papelería, alimentaria, electroquímica y bioquímica, así como en el tratamiento de aguas residuales, gracias a su capacidad para separar impurezas de manera eficaz. Las unidades industriales de OI están disponibles en cuatro diseños modulares: placa y marco, tubular, de fibra hueca y enrollada en espiral [4]. Este último diseño se destaca por ofrecer tasas de permeado aceptables, baja demanda de energía, bajos niveles de ensuciamiento,

facilidad de operación, y costos reducidos tanto en la producción de agua como en la instalación, en comparación con otras tecnologías existentes. Además, la OI contribuye significativamente a la sostenibilidad del suministro de agua potable, abordando la creciente demanda y los desafíos ambientales asociados con la escasez de agua [2], [5], [6].

La optimización en la desalinización de agua mediante ósmosis inversa (OI) es crucial para disminuir el consumo de energía y, por ende, reducir el costo de producción del agua [7]. La mayor parte de las investigaciones sobre optimización se centran en minimizar el consumo energético del sistema [8], [9], [10], ya que las bombas de alta presión utilizadas en el proceso demandan mucha energía.

Las investigaciones sobre la optimización para minimizar el SCE se centran en sistemas de desalinización de agua salobre, como ríos y pozos subterráneos. Esto se debe a que el contenido de sal en estas fuentes es menor y el costo es más económico en comparación con el uso de agua de mar (agua salada). Por ejemplo, Abkar et al., [11] se enfocaron en reducir el consumo específico de energía utilizando un sistema de ósmosis inversa para tratar agua salobre. En su investigación, emplearon modelos empíricos para disminuir el consumo energético y además identificaron otras variables operativas que influyen en este.

Ruiz-Garcia et al., [12] utilizaron fluctuaciones hidroquímicas del agua subterránea de pozo para evaluar diferentes ventanas de operación de dos configuraciones, así como sus puntos óptimos de operación en términos de minimizar el consumo específico de energía y maximizar la recuperación del caudal.

Por otro lado, Li [13] realizó una optimización para reducir el consumo específico de energía en un sistema de desalinización de agua salobre mediante una optimización no lineal con restricciones, logrando una reducción del 16% al optimizar las condiciones operativas dentro del rango operativo normal de la bomba.

El objetivo de esta investigación es minimizar el consumo específico de energía para reducir el número de paneles fotovoltaicos necesarios sin afectar la cantidad de agua potable requerida por la comunidad indígena 'Yuyurapana'. Para ello, se llevará a cabo una optimización no lineal utilizando un modelo matemático basado en una ecuación algebraica, resuelta mediante el método de programación secuencial de mínimos cuadrados. Con esta optimización, se encontrará el valor mínimo óptimo del consumo específico de energía en función de la

velocidad de alimentación y la resistencia de la válvula en el canal de salmuera. Los valores de entrada para la optimización se tomarán de los resultados de la simulación realizada en la comunidad en nuestro trabajo previo [14].

2. Zona de estudio

El municipio de Maicao, situado en la media Guajira al norte de Colombia, es conocido como la Vitrina Comercial de Colombia. Maicao cuenta con una demografía diversa que incluye a los pueblos indígenas Wayuu y Zenú, además de una significativa colonia de musulmanes provenientes del Oriente Medio, incluyendo libaneses. En la Figura 1 se muestra la ubicación geográfica del municipio de Maicao.

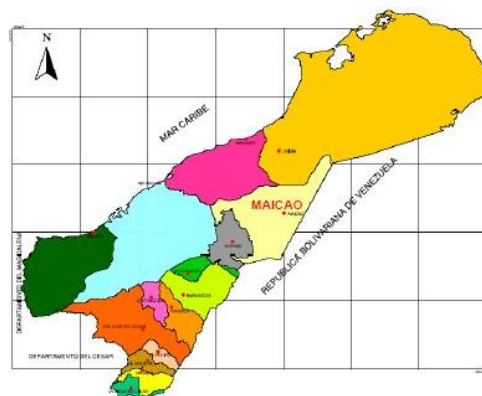


Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Maicao-Colombia.

En este municipio se encuentra la comunidad indígena 'Yuyurapana', ubicada a unos 15 kilómetros de la zona urbana de Maicao, Colombia. Esta comunidad está compuesta por aproximadamente 180 personas, distribuidas en 30 familias.

Este estudio se centra en esta comunidad debido a sus características particulares, que la hacen apta para la implementación de un sistema de desalinización de agua por OI. Estas características incluyen su ubicación en una de las Zonas No Interconectadas (ZNI) de La Guajira, la presencia de un pozo subterráneo de agua salobre y alta radiación solar [14].

3. Ecuaciones gobernantes

Para aplicar un algoritmo de optimización es importante primeramente entender el proceso de desalinización de agua por OI. En la Figura 2 se observa un modelo simple de OI donde inicia con una corriente de agua de alimentación a presión atmosférica y es presurizada por bombas de alta presión para ayudar a superar la presión osmótica.

Cuando el agua atraviesa por las membranas de OI se generan dos corrientes de agua, una corriente de agua limpia (permeado) y una corriente de salmuera (concentrado o retenido).

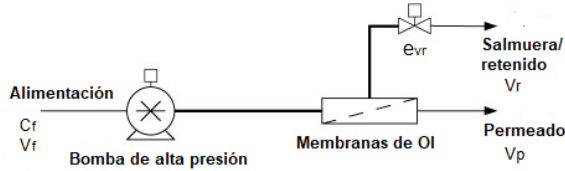


Figura 2. Sistema de desalinización de agua por Ósmosis Inversa (OI).

La idea de utilizar una válvula en la corriente de salmuera es para ajustar el caudal de retenido y sobre todo mantener constante la presión del sistema, con la finalidad de disminuir el consumo de energía.

Considerando la Figura 2, se emplean balances de masa y energía para derivar ecuaciones modelo relacionadas con la velocidad en la corriente de retenido y la presión del sistema. Al realizar estos balances, se asume que el agua es incompresible y que su densidad permanece constante. Además, se supone que todos los componentes operan en el mismo plano, por lo que se desprecia la energía potencial, como se observa en la Figura 3. De este modo, al realizar un balance de energía cinética alrededor de la válvula de retenido, se obtiene la Ecuación (1) en estado estacionario [15].

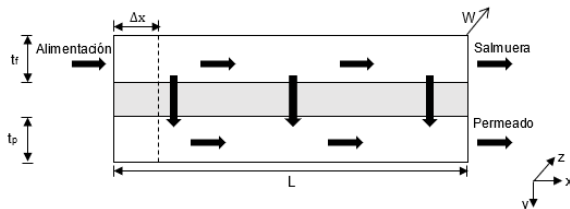


Figura 3. Geometría del módulo de ósmosis inversa enrollado espiral estudiada.

$$\frac{A_p^2}{A_m K V} (v_f - v_r) + \frac{A_p}{\rho V} \Delta\pi - \frac{1}{2} \frac{A_p e_{vr} v_r^2}{V} = 0 \quad (1)$$

donde, v_r es la velocidad en la corriente de retenido, A_p es el área de la sección de la transversal de la tubería, A_m es el área de la superficie activa de la membrana, K es el coeficiente de transferencia de masa, V es el volumen del sistema, v_f es la velocidad de la corriente de alimentación, ρ es la densidad del fluido, $\Delta\pi$ es la diferencia de presión osmótica a través de las superficies de la membrana, y e_{vr} es la resistencia de la válvula en el corriente de retenido. La expresión matemática que relaciona la presión osmótica y la

concentración de alimentación esta dada por la Ecuación (2) mostrada a continuación [16], [17], [18]:

$$\Delta\pi = f_{os} C_f \frac{\ln(1/(1-REC))}{REC} \quad (2)$$

donde, f_{os} es el coeficiente de la presión osmótica ($f_{os} = 78,7$) [15], C_f es la concentración total de solidos disueltos en la corriente de alimentación y, REC es la recuperación general del sistema, y esta dada por la Ecuación (3) [19].

$$REC = \frac{Q_p}{Q_f} = \frac{Q_p}{Q_p + Q_r} = \frac{v_p}{v_p + v_r} \quad (3)$$

donde, Q_p y v_p es el caudal y velocidad de la corriente del permeado, respectivamente. Q_r y v_r es el caudal y velocidad de la corriente del retenido, respectivamente. Por último, Q_f es el caudal en la corriente de alimentación.

Otra importante variable del sistema, que guarda relación con la diferencia de la presión osmótica, es la ecuación algebraica de la presión del sistema, que es encontrada a través de un balance de masa del sistema y puede observar en la Ecuación (4).

$$P_{sys} = \frac{\rho A_p}{A_m K} v_p + \Delta\pi \quad (4)$$

En el proceso de desalinización de agua por ósmosis inversa (OI), una variable esencial que define la cantidad de energía para producir un metro cubico de agua es el consumo específico de energía (SEC). El SEC se calcula mediante la Ecuación (5) que se presenta a continuación [15]:

$$SEC = \frac{\Delta P}{REC} = \frac{P_{sys}}{REC} = \frac{P_{sys} Q_f}{Q_p} \quad (5)$$

donde, ΔP es la presión generada por la bomba de alta presión, donde se supone igual a P_{sys} .

Entrando al proceso de optimización de un sistema de desalinización de agua por OI, una variable esencial a optimizar es el SEC. Por esa razón, el objetivo de este trabajo es minimizar el SEC sin afectar la demanda de agua a satisfacer en la comunidad. Para eso, se reemplaza la Ecuación (1) en la Ecuación (5), quedando la función objetivo como se muestra en la Ecuación (6) [15].

$$\min_{v_f, e_{vr}} SEC = \min_{v_f, e_{vr}} \frac{\rho e_{vr} (v_f - v_p)^2 v_f}{2 v_p} \quad (6)$$

Dado que se trata de una optimización no lineal, es necesario establecer una serie de restricciones para encontrar los valores óptimos. Estas restricciones se presentan en las ecuaciones (7) - (11) [15].

$$v_f > 0 \quad (7)$$

$$e_{vr} > 0 \quad (8)$$

$$SEC \geq 0 \quad (9)$$

$$P_{sys} \geq \frac{\pi_0}{1-REC} \quad (10)$$

$$0 = \frac{P_{sys}}{\rho} - \frac{1}{2} e_{vr} (v_f - v_p)^2 \quad (11)$$

La optimización propuesta está en función de la velocidad de la corriente de alimentación (v_f) y la resistencia de la válvula (e_{vr}). Existe una correlación algorítmica para la conversión de la posición de la válvula a partir de la resistencia de la válvula. La corrección se encuentra en la Ecuación (12) y los parámetros en la Tabla 1 [15].

$$e_{vr} = \alpha \ln O_p + \beta \quad (12)$$

Tabla 1. Parámetros para la correlación logarítmica

Posición	α	β
0 – 0,7%	-512,287	-167,284
0,7 – 1,4%	-12,425	11,043
1,4 – 7%	-2052	7434
7 – 49%	-1436	6092
49 – 70%	-265	1554

Como se puede observar en la Ecuación (6), que se utilizará para optimizar el SEC, las variables de entrada importantes para el modelo son la densidad del agua (ρ), la concentración de alimentación (C_{feed}), el volumen del sistema (V), el área de la tubería (A_p), el área de la membrana (A_m), el coeficiente de transferencia de masa (K) y el caudal de permeado (Q_p). Varias de estas variables son específicas del tipo de membrana utilizado, como se muestra en la Tabla 2, mientras que otras se derivan de los resultados obtenidos a partir de los modelos matemáticos dinámicos, los cuales se resumen a continuación y se pueden consultar en nuestro trabajo previo [14].

Tabla 2. Datos de entrada, características del módulo de membrana y parámetro de transporte.

Parámetros	Valores
Fabricante	DuPont-Filmtec
Tipo	Agua salobre
Especificación	BW30LE-440
Configuración del módulo	Enrollado en espiral
Espesor del canal de alimentación (t_f)	$8,6 \times 10^{-4}$ m
Espesor del canal de permeado (t_p)	$5,5 \times 10^{-4}$ m
Longitud del módulo (L)	1,016 m
Ancho del módulo (W)	40,16 m
Área del módulo (A)	$40,8 \text{ m}^2$

Coeficiente de fricción (b)	16697,997 (atm s/m ⁴)
Constante de permeabilidad del agua (A_w)	$1,312 \times 10^{-6}$ (m/atm s)
Parámetro de transporte de soluto (B_s)	$1,80 \times 10^{-7}$ (m/s)

$$\frac{\partial C_r}{\partial t} = -\frac{C_r}{t_f W} \frac{\partial v_r}{\partial x} - \frac{v_r}{t_f W} \frac{\partial C_r}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_r \frac{\partial C_r}{\partial x} \right] - \frac{J_s}{t_f} \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} = -\frac{C_p}{t_p W} \frac{\partial v_p}{\partial x} - \frac{v_p}{t_p W} \frac{\partial C_p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_p \frac{\partial C_p}{\partial x} \right] + \frac{J_s}{t_f} \quad (14)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} = \left\{ \left[-W \left(A_w \left((P_r - P_p) - RT_r \exp \left(\frac{J_w}{K} \right) (C_r - C_p) \right) \right) \right] - \frac{\partial v_r}{\partial x} \right\} \left(\frac{v_r}{t_f W} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial P_r}{\partial t} = \left[-b v_r - \frac{\partial P_r}{\partial x} \right] \left(\frac{v_r}{t_f W} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial J_w}{\partial t} = \left[\left(A_w \left((P_r - P_p) RT_r (C_w - C_p) \right) \right) - J_w \right] \left(\frac{v_r}{t_f W \Delta x} \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial J_s}{\partial t} = \left[\left(B_s \exp \left(\frac{J_w}{K} \right) (C_r - C_p) \right) - J_s \right] \left(\frac{v_r}{t_f W \Delta x} \right) \quad (18)$$

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \left[\left(C_p + \exp \left(\frac{J_w}{K} \right) (C_r - C_p) \right) - C_w \right] \left(\frac{v_r}{t_f W \Delta x} \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial T_r}{\partial t} = \left[\frac{v_r (T_{r,0} - T_r)}{t_f W \Delta x} \right] - \left[\frac{J_w (T_r - T_p)}{t_f} \right] \quad (20)$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \left[\frac{J_w (T_r - T_p)}{t_f} \right] \quad (21)$$

donde, C_r , C_p y C_w son las concentraciones en la corriente de retenido, en la corriente de permeado y en la pared de la membrana, respectivamente. J_s y J_w son el flujo molar de soluto a través de la membrana y flujo de agua, respectivamente. P_r y P_p son la presión de la corriente de retenido y permeado, respectivamente. T_r , $T_{r,0}$ y T_p es la temperatura en la corriente del retenido, es la temperatura en la corriente del retenido para $x=0$ y la temperatura en la corriente del permeado, respectivamente. Por último, b y R es el parámetro de fricción de los canales de alimentación y permeado, y la constante de gas ideal ($R = 0,082 \text{ atm}^3/\text{°K mol}$). D_r y D_p son la difusividad en el canal de retenido y permeado, respectivamente, y son encontradas a través de las correlaciones matemáticas mostradas en la Ecuaciones (22) y (23).

$$D_r = 6,725 \times 10^{-6} \exp \left(0,1546 \times 10^{-3} C_r \right) 18,01253 - \frac{2513}{T_r + 273,15} \quad (22)$$

$$D_p = 6,725 \times 10^{-6} \exp \left(0,1546 \times 10^{-3} C_p 18,01253 - \frac{2513}{T_p + 273,15} \right) \quad (23)$$

Otras propiedades físicas del agua que se pueden calcular del sistema se encuentran en las Ecuaciones (24) – (29). La viscosidad en el canal de salmuera y permeada está dada por las siguientes ecuaciones [20], [21]:

$$\mu_r = 1,234 \times 10^{-6} \exp \left(0,0212 \times 10^{-3} C_r 18,01253 - \frac{1965}{T_r + 273,15} \right) \quad (24)$$

$$\mu_p = 1,234 \times 10^{-6} \exp \left(0,0212 \times 10^{-3} C_p 18,01253 - \frac{1965}{T_p + 273,15} \right) \quad (25)$$

La densidad en canal de salmuera y del permeado esta dada por las ecuaciones [20], [21]:

$$\rho_r = 498,4 m_f + \sqrt{(248400 m_f^2 + 752,4 m_f C_r 18,01253)} \quad (26)$$

$$\rho_p = 498,4 m_p + \sqrt{(248400 m_p^2 + 752,4 m_p C_p 18,01253)} \quad (27)$$

donde,

$$m_f = 1,0069 - 2,757 \times 10^{-4} T_r \quad (28)$$

$$m_p = 1,0069 - 2,757 \times 10^{-4} T_p \quad (29)$$

El conjunto de ecuaciones y las propiedades del fluido se resuelven simultáneamente utilizando el software Python. Las ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) se discretizan mediante el método de las líneas [14].

Una vez se realice la optimización del sistema, será importante calcular el número de paneles solares fotovoltaicos (N_p) necesarios para suplir la demanda de energía del sistema, teniendo en cuenta que la comunidad seleccionada en este estudio se encuentra en una zona no interconectada (ZNI). Este calculo se realiza a través de la Ecuación (30) mostrada a continuación [14], [22]:

$$N_p = \frac{SEC Q_p}{\eta_{inv} \eta_r T_c A_{PV/panel} I} \quad (30)$$

donde, η_r es la eficiencia nominal de celda solar (ficha técnica del fabricante), $A_{PV/panel}$ es el área de cada panel solar, I es la insolación diaria promedio (se estima en 4,8 kWh/m²/mensual) [14], η_{inv} es la

eficiencia del inversor y T_c es el factor de corrección de temperatura, encontrada a través de la Ecuación (31) [14], [22].

$$T_c = (1 - \beta(T_{celda} - 25)) \quad (31)$$

donde, β es el coeficiente de eficiencia de temperatura y T_{celda} es la temperatura del módulo, que se obtiene a través de la Ecuación (32) [14], [22]:

$$T_{celda} = T_{amb} + \left(\frac{9,5}{5,7 + 3,5 v_m} \right) \left(\frac{G(T_{NOCT} - 20)}{800} \right) \quad (32)$$

donde, G es el flujo de radiación solar (irradiancia) en W/m² en el plano del módulo, T_{NOCT} es la temperatura nominal de funcionamiento de la celda, T_{amb} es la temperatura ambiente y v_m es la velocidad media el viento.

4. Resultados y discusión

Se realizó una optimización no lineal con restricciones utilizando el método de programación secuencial de mínimos cuadrados. Inicialmente, se validó el modelo con los resultados obtenidos por Bartman et al. [15]. En su investigación, estos autores presentan resultados de optimización del (SEC) de una planta de desalinización, como se muestra en la Figura 2, utilizando condiciones de operación descritas en la Tabla 3. En la Figura 4 se grafica el consumo de energía específico normalizado (SEC_{norm}) versus la recuperación de agua (REC) basado en el funcionamiento teórico considerando el rechazo de sal de las membranas. Nuestros resultados teóricos siguen la misma tendencia y el error entre las curvas disminuye a medida que aumenta la recuperación del sistema, lo que proporciona confianza en los resultados obtenidos. La REC se calcula implícitamente en el algoritmo de optimización programado en Python y, a partir de las demás variables del modelo, se obtiene un SEC mínimo para una velocidad de alimentación (v_f) y resistencia de la válvula (e_{vr}) óptimas.

Tabla 3. Condiciones de operación del estudio experimental realizado por Bartman et al. [15].

Parámetros	Unidad
Densidad $\rho = 1007$	kg/m ³
Volumen $V = 0,6$	m ³
Área transversal de la tubería $A = 0,000127$	m ²
Área activa de la membrana $A_m = 15,6$	m ²
Coeficiente de transferencia de masa $K = 9,7 \times 10^{-9}$	s/m
Concentración de NaCl $C_{feed} = 1600, 1850, 500$	ppm

Rango de presión de alimentación $P_{feed} = 110$ a 170	psi
Caudal de permeado $Q_p = 1$ y $1,45$	gpm

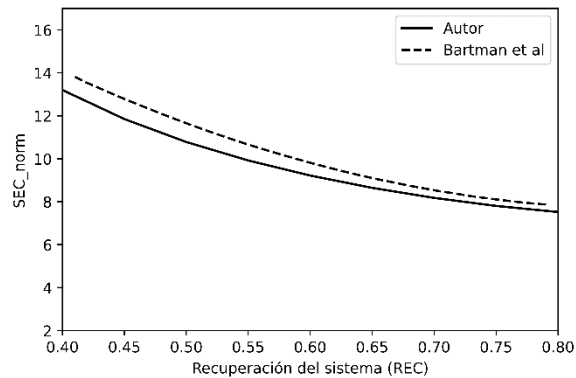


Figura 4. Recuperación del sistema versus SEC_{norm} , comparando los resultados obtenidos con otros autores.

El algoritmo para la optimización no lineal comienza definiendo las variables involucradas en el problema, es decir, las variables de decisión. Luego, se formula la función objetivo en términos de los datos del problema y las restricciones como sistemas de inecuaciones. Se establecen valores iniciales para las variables de la función objetivo y, finalmente, se calcula el valor de la función objetivo dentro del dominio del problema, encontrando el valor óptimo para el sistema.

Tras validar el modelo utilizado en la optimización, se procede a encontrar el SEC del sistema planteado mediante una ecuación algebraica. En las Ecuaciones (6) - (11) se define la función objetivo con sus restricciones, utilizada para optimizar el SEC del sistema de desalinización de agua por ósmosis inversa (OI) de nuestro estudio, resuelta con el método de programación secuencial de mínimos cuadrados. La función objetivo depende de la velocidad de alimentación (v_f) y de la resistencia de la válvula (e_{vr}).

Los datos de entrada utilizados para la optimización no lineal del sistema de desalinización de agua por OI presentados en este estudio se resumen en la Tabla 4. Como se mencionó, estos datos se obtienen a partir de los resultados de modelos matemáticos dinámicos y especificaciones de la membrana seleccionada.

Tabla 4. Parámetros iniciales para la optimización no lineal.

Parámetros	Valor
Densidad (ρ)	997 kg/m ³
Volumen del sistema (V)	0,6 m ³

Área transversal de la tubería (A)	$0,50671 \times 10^{-3}$ m ²
Área activa de la membrana (A_m)	40,8 m ²
Coefficiente de transferencia de masa (K)	$9,7 \times 10^{-9}$ s/m
Concentración de alimentación (C_{feed})	3050,77 mg/L
Caudal de permeado (Q_p)	$2,7 \times 10^{-4}$ m ³ /s

Para la optimización, se consideraron los datos de entrada mostrados en la Tabla 4 y los valores iniciales de la velocidad de alimentación y resistencia de la válvula de 0,2 m/s y 0,1, respectivamente. Como resultado, se obtuvo un SEC de 0,405 kWh/m³. Este resultado, comparado con nuestro trabajo anterior, representa una disminución del 37,11% y se encuentra en línea con el consumo de energía de estos sistemas al utilizar agua salobre [23]. Además, se determinaron valores óptimos para la velocidad de alimentación y la resistencia de la válvula, que resultaron ser 0,672 m/s y $1,19 \times 10^5$, respectivamente. A partir de la resistencia de la válvula, se calculó el porcentaje de posición de la válvula utilizando la Ecuación 12 y la Tabla 1, dando como resultado un porcentaje de 0,32, acorde con el caudal de permeado necesario para satisfacer la demanda de agua potable en la comunidad indígena estudiada. Además, el objetivo de la válvula a la salida de la tubería del canal de salmuera regula la presión del sistema, mejorando el rendimiento de la membrana y aumentando la recuperación del sistema, lo que reduce el consumo de energía.

Con el SEC optimizado y los datos de la Tabla 5, que contiene las especificaciones técnicas de un panel solar comercial elegido para el estudio y otras variables de interés detalladas en nuestro trabajo previo [14], se dimensionó el número de paneles solares fotovoltaicos necesarios para satisfacer la demanda de energía del sistema, obteniendo un total de 92 paneles solares fotovoltaicos para un área total de 178,63 m².

Tabla 5. Especificaciones del sistema de producción de energía [14].

Parámetros	Valor
Tipo de celda	Policristalino
Área del panel fotovoltaico	1,94 m ²
Potencia máxima (P_{max})	385 Wp
Voltaje máximo (V_{mpp})	40,15 V
Corriente máxima (I_{mpp})	9,6 A
Voltaje circuito abierto (V_{oc})	48,45 V
Corriente corto circuito (I_{sc})	102 A
Eficiencia del panel (η_r)	19,21 %
Coefficiente de temperatura de eficiencia (β)	-0,39 %/°C
Temperatura nominal de la celda	45 °C

Operativa (NOCT)	
Eficiencia del inversor (η_{inv})	95 %
Temperatura ambiente promedio (T_{amb})	27,4 °C
Velocidad del viento promedio (v_m)	5 m/s
Irradiancia diaria promedio (I)	
Flujo de radiación solar (G)	665,71 W/m ²

Este resultado indica una disminución del 39,47% en la cantidad de paneles solares necesarios en comparación con nuestro trabajo anterior, donde no se optimizó el SEC. Esto demuestra la importancia de optimizar los sistemas de OI para la desalinización de agua, ya que reduce el consumo de energía, disminuye los costos de instalación y el costo de producción de agua, sin afectar la demanda de agua necesaria. Esto es particularmente relevante en áreas aisladas como la Alta y Media Guajira, donde recursos hídricos como pozos subterráneos pueden ser aprovechados con estas tecnologías para llevar soluciones de agua a la comunidad, haciéndolo más accesible si se reducen los costos de instalación.

5. Conclusiones

En este estudio, se ha logrado minimizar el consumo específico de energía (SEC) del sistema de desalinización por ósmosis inversa (OI) que ha sido modelado y simulado en la comunidad indígena "Yuyurupana". A través de una optimización no lineal basada en una ecuación algebraica y resuelta mediante el método de programación secuencial de mínimos cuadrados utilizando el software Python, se consiguió disminuir el SEC a 0,405 kWh/m³, lo que representa una mejora significativa respecto al SEC inicial de 0,644 kWh/m³ obtenido en estudios previos. Esta disminución permitió disminuir el número de paneles solares fotovoltaicos necesarios para alimentar el sistema de 152 a 92, con un área total requerida de 178,63 m², donde se mejoraría la eficiencia y sostenibilidad del sistema.

La validación de los resultados teóricos con los obtenidos por Bartman et al. mostró una coherencia notable, ya que el comportamiento de las curvas fue similar y el error entre ellas disminuyó con el aumento de la recuperación del sistema (REC). Esto refuerza la fiabilidad de nuestro modelo y los métodos utilizados en este estudio.

6. Referencias

[1] N. Cicek, "A review of membrane bioreactors and their potential application in the treatment of agricultural wastewater," *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada*, vol. 45, pp. 6.37-6.44, 2003.

[2] M. A. Al-Obaidi and I. M. Mujtaba, "Steady state and dynamic modeling of spiral wound wastewater reverse osmosis process," *Comput Chem Eng*, vol. 90, pp. 278–299, 2016, doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.04.001.

[3] S. Jain and S. K. Gupta, "Analysis of modified surface force pore flow model with concentration polarization and comparison with Spiegler-Kedem model in reverse osmosis systems," *J Memb Sci*, vol. 232, no. 1–2, pp. 45–62, 2004, doi: 10.1016/j.memsci.2003.11.021.

[4] S. Sundaramoorthy, G. Srinivasan, and D. V. R. Murthy, "An analytical model for spiral wound Reverse Osmosis membrane modules: Part I - Model development and parameter estimation," *Desalination*, vol. 280, no. 1–3, pp. 403–411, 2011, doi: 10.1016/j.desal.2011.03.047.

[5] M. A. Al-Obaidi, C. Kara-Zaïtri, and I. M. Mujtaba, "Wastewater treatment by spiral wound reverse osmosis: Development and validation of a two dimensional process model," *J Clean Prod*, vol. 140, pp. 1429–1443, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.008.

[6] M. A. Al-Obaidi, C. Kara-Zaïtri, and I. M. Mujtaba, "Simulation and sensitivity analysis of spiral wound reverse osmosis process for the removal of dimethylphenol from wastewater using 2-D dynamic model," *J Clean Prod*, vol. 193, pp. 140–157, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.036.

[7] K. Jeong, M. Park, and T. H. Chong, "Numerical model-based analysis of energy-efficient reverse osmosis (EERO) process: Performance simulation and optimization," *Desalination*, vol. 453, no. December 2018, pp. 10–21, 2019, doi: 10.1016/j.desal.2018.11.021.

[8] H. Kotb, E. H. Amer, and K. A. Ibrahim, "On the optimization of RO (Reverse Osmosis) system arrangements and their operating conditions," *Energy*, vol. 103, pp. 127–150, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.02.162.

[9] M. G. Ahunbay, S. B. Tantekin-Ersolmaz, and W. B. Krantz, "Energy optimization of a multistage reverse osmosis process for seawater desalination," *Desalination*, vol. 429, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1016/j.desal.2017.11.042.

[10] A. Jiang, L. T. Biegler, J. Wang, W. Cheng, Q. Ding, and S. Jiangzhou, "Optimal operations for large-scale seawater reverse osmosis networks," *J Memb Sci*, vol. 476, pp. 508–524, 2015, doi: 10.1016/j.memsci.2014.12.005.

[11] L. Abkar, A. Aghili Mehrizi, M. Jafari, S. E. Beck, A. Ghassemi, and M. C. M. Van

- Loosdrecht, "Optimizing energy efficiency in brackish water reverse osmosis (BWRO): A comprehensive study on prioritizing critical operating parameters for specific energy consumption minimization," *Science of the Total Environment*, vol. 932, p. 172772, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172772.
- [12] A. Ruiz-García, I. Nuez, M. D. Carrascosa-Chisvert, and J. J. Santana, "Simulations of BWRO systems under different feedwater characteristics. Analysis of operation windows and optimal operating points," *Desalination*, vol. 491, p. 114582, 2020, doi: 10.1016/j.desal.2020.114582.
- [13] M. Li, "Optimal plant operation of brackish water reverse osmosis (BWRO) desalination," *Desalination*, vol. 293, pp. 61–68, 2012, doi: 10.1016/j.desal.2012.02.024.
- [14] D. Serrano-Florez, W. F. Florez, C. A. Bustamante, and F. Chejne, "Analysis and simulation of reverse osmosis equipment: Case of La Guajira, Colombia," *Comput Chem Eng*, vol. 171, p. 108145, 2023, doi: 10.1016/j.compchemeng.2023.108145.
- [15] A. R. Bartman, A. Zhu, P. D. Christofides, and Y. Cohen, "Minimizing energy consumption in reverse osmosis membrane desalination using optimization-based control," *J Process Control*, vol. 20, no. 10, pp. 1261–1269, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.jprocont.2010.09.004.
- [16] A. Zhu, P. D. Christofides, and Y. Cohen, "Minimization of energy consumption for a two-pass membrane desalination: Effect of energy recovery, membrane rejection and retentate recycling," *J Memb Sci*, vol. 339, no. 1–2, pp. 126–137, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2009.04.039.
- [17] A. Zhu, P. D. Christofides, and Y. Cohen, "Effect of Thermodynamic Restriction on Energy Cost Optimization of RO Membrane Water Desalination," *Ind Eng Chem Res*, vol. 48, no. 13, pp. 6010–6021, Jul. 2009, doi: 10.1021/ie800735q.
- [18] E. Nagy, I. Hegedüs, D. Rehman, Q. J. Wei, Y. D. Ahdab, and J. H. Lienhard V, "The need for accurate osmotic pressure and mass transfer resistances in modeling osmotically driven membrane processes," *Membranes (Basel)*, vol. 11, no. 2, pp. 1–34, Feb. 2021, doi: 10.3390/membranes11020128.
- [19] S. H. Aladwani, M. A. Al-Obaidi, and I. M. Mujtaba, "Performance of reverse osmosis-based desalination process using spiral wound membrane: Sensitivity study of operating parameters under variable seawater conditions," *Clean Eng Technol*, vol. 5, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100284.
- [20] C. Koroneos, A. Dompros, and G. Roumbas, "Renewable energy driven desalination systems modelling," *J Clean Prod*, vol. 15, no. 5, pp. 449–464, 2007, doi: 10.1016/j.jclepro.2005.07.017.
- [21] K. M. Sassi and I. M. Mujtaba, "Effective design of reverse osmosis-based desalination process considering wide range of salinity and seawater temperature," *Desalination*, vol. 306, pp. 8–16, 2012, doi: 10.1016/j.desal.2012.08.007.
- [22] B. Rahimi, H. Shirvani, A. A. Alamolhoda, F. Farhadi, and M. Karimi, "A feasibility study of solar-powered reverse osmosis processes," *Desalination*, vol. 500, p. 114885, 2021, doi: 10.1016/j.desal.2020.114885.
- [23] N. Ghaffour, T. M. Missimer, and G. L. Amy, "Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability," *Desalination*, vol. 309, pp. 197–207, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.desal.2012.10.015.