



Energía Azul: generación de potencia a través de la Ósmosis por Presión Retardada (PRO)

Blue Energy: Power generation through Pressure Retarded Osmosis (PRO)

Carlos Esteban Aristizabal Alzate
Instituto Tecnológico Metropolitano
carlosaristizabal207157@correo.itm.edu.co

(Tipo de Artículo: Investigación científica y tecnológica. Recibido: 09/06/2017. Aprobado: 20/11/2017)

Resumen. La emisión de gases efecto invernadero, causadas por el uso de combustibles fósiles y el crecimiento exponencial de la humanidad, vuelca los esfuerzos hacia la búsqueda de fuentes de energía limpia y sostenible, que satisfagan las necesidades energéticas actuales y futuras. Por lo que es imperativo, investigar y desarrollar tecnologías que aprovechen las energías renovables, una de ellas es la Ósmosis por Presión Retardada (PRO), proceso que aprovecha el gradiente de salinidad entre dos soluciones para generar electricidad, ya que la mezcla de una solución salina de concentración alta con agua fresca disipa más de 2,2 MJ/m³ de agua dulce tratada. A escala industrial, se podría aprovechar la diferencia de salinidad entre ríos y mares, cerca de los estuarios. La aplicación, viabilidad y eficiencia del proceso y la tecnología PRO, dependen de las características de la membrana semipermeable, como la potencia por unidad de área, y las propiedades fisicoquímicas y de superficie de esta. En la actualidad, se utilizan membranas de acetato de celulosa, las cuales dan potencias (1W/m²). Sin embargo, se está investigando con membranas de materiales compuestos, como, por ejemplo, las basadas en grafeno, las cuales permiten un mayor flujo de agua y potencias superiores a 5 W/m².

Abstract. *The emission of greenhouse gases, caused by fossil fuel use and the exponential growth of the human population, have turned man's efforts toward finding sources of clean and sustainable energy to meet the current and future energy needs. So it became a priority to research and develop technologies that harness renewable energy, one is the Pressure Retarded Osmosis (PRO), which is a process or method of generating electric power, which harnesses the salinity gradient between two solutions, since the mixture of saline high concentration with fresh water, dissipates more than 2.2 MJ/m³ of treated fresh water. On an industrial scale, it could take advantage of the difference in salinity between the rivers and the seas, near estuary. Application, feasibility and efficiency of the process and technology, which operating under this phenomenon, depend on the characteristics of the semipermeable membrane, as power per unit area, and the physical, chemical and surface properties of that. Currently cellulose acetate membranes are used, which give very low power (1 W/m²). However, under investigation with composite membranes, such as those based on graphene, which allow a greater flow of water through the membrane and powers above 5 W/m².*

Palabras clave. Energía renovable; gradientes salinos; Membranas semipermeables; Ósmosis retardada por presión.

Keywords. *Salt gradients; Semi-permeable membranes; Pressure retarded osmosis; Renewable Energy.*

1. Introducción

La emisión de gases efecto invernadero, tales como el CO₂, causadas por el uso de combustibles fósiles y el crecimiento exponencial de la población mundial, son algunas de las razones por las cuales la humanidad ha volcado sus esfuerzos hacia la búsqueda de fuentes de energía limpia y sostenible, que satisfagan las necesidades energéticas actuales y las futuras [1-3].

En la actualidad se volvió una prioridad investigar y desarrollar tecnologías que aprovechen las energías renovables, tales como: la energía eólica, energía solar y biocombustibles [1, 2, 4]. Sin embargo, no todas las regiones o zonas son aptas para ciertas energías

renovables, ya que no cuentan con las condiciones edafoclimáticas, de radiación solar, de velocidad de vientos, etc., que aprovechen y satisfagan las condiciones mínimas de operación de las tecnologías empleadas en biocombustibles, energía solar y eólica, respectivamente [2, 5]. Es por esta razón que recientemente, se ha estudiado las fuentes de energía renovable y verde que podrían aprovecharse de los océanos, como por ejemplo las corrientes marinas, las mareas, los gradientes térmicos y de salinidad [2], con el fin de ampliar más este portafolio. En la Figura 1 se muestra la potencia teórica de los principales ríos del mundo durante el proceso de mezcla cuando estos ríos van al mar.

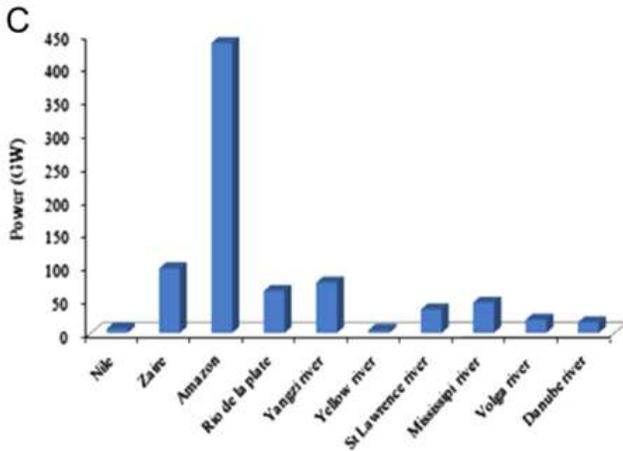


Figura 1. Potencia teórica de los principales ríos del mundo [6]

En el presente artículo se aborda el tema de generación de energía eléctrica, a través del proceso de Ósmosis por Presión Retardada o por sus siglas en inglés conocido como PRO, el cual aprovecha para este fin, los gradientes de salinidad que se presentan entre los océanos o los mares, y las fuentes corrientes de agua dulce (ríos), en las zonas conocidas como estuarios [6, 7], por ejemplo, la mezcla de una solución salina de concentración alta con agua fresca, produce una solución salobre, la cual disipa más de 2,2 MJ energía libre por m³ de agua dulce tratada o lo que es equivalente a la energía potencial liberada por la caída del mismo volumen de agua corriente a una altura de 220 m [7]. Este tipo de generación, es considerada como renovable, no tiene emisiones de CO₂ asociadas al proceso de generación u otra emisión que pueda contribuir de forma negativa con el cambio climático [2], el proceso entero posee una huella de carbono mínima (Kg CO₂ equiv./KWh generado) [8, 9] y es una gran alternativa para aprovechar la ventaja competitiva natural que posee Colombia, ya que el país cuenta con dos océanos, gran cantidad de ríos que desembocan en estos, sobretodo en la región pacífica, y permitiría diversificar la matriz energética nacional con una fuente de energía renovable. Por ejemplo, el Caribe colombiano es uno de los lugares del mundo con las condiciones adecuadas para aprovechar la generación de energía utilizando el principio de PRO [10].

2. Procesos Osmóticos

La Ósmosis es un proceso natural, el cual opera bajo el principio de transporte de agua, a través de una membrana semipermeable y en el que existe un gradiente de concentración, por ejemplo, de salinidad [2, 11]. Estos procesos que utilizan membrana, tales como el de Ósmosis Directa (FO) y el de Ósmosis por Presión Retardada (PRO), juegan un papel muy importante en varias industrias, ya que gracias a ellos es posible el tratamiento de agua para consumo humano, aguas residuales, el procesamiento de alimentos y la obtención de energía eléctrica [11]. A continuación, en la Figura 2, se ilustran los diferentes procesos osmóticos de acuerdo

al flujo de agua y al gradiente de presión aplicado o alcanzado.

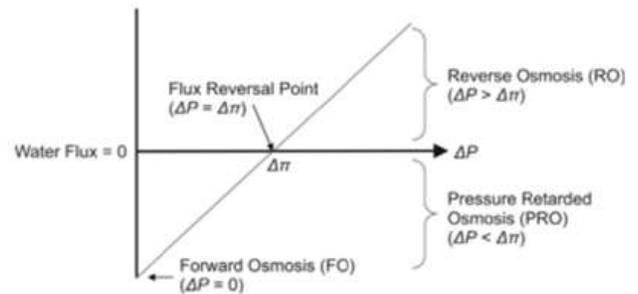


Figura 3. Principio de PRO [14]

Una planta de PRO opera a la inversa de una desalinizadora de agua de mar con membranas, ya que en vez de imprimirle energía para superar el gradiente de presión osmótica y obtener un líquido con un menor contenido de sales, este tipo de plantas aprovechan la fuerza osmótica para producir energía por la mezcla de una fuente de agua dulce y una salada [2]. A continuación, en la Figura 4 se ilustran los componentes y subprocesos inmersos en una planta que utiliza el principio de ósmosis para generar energía eléctrica.

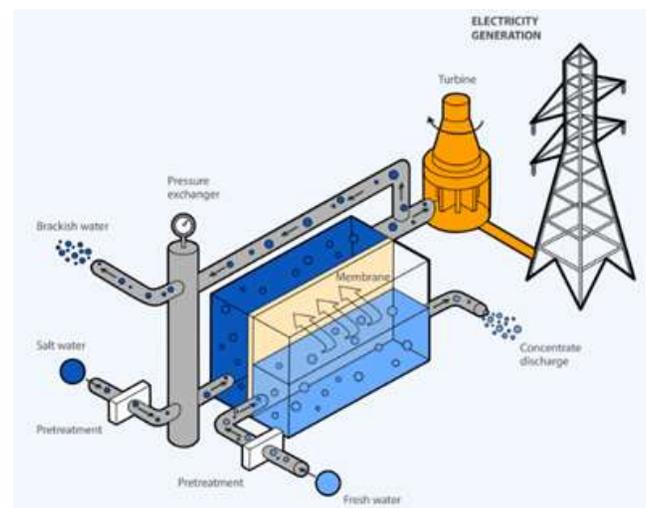


Figura 4. Planta de generación de energía eléctrica mediante PRO [8].

La primera planta piloto de generación de electricidad que funciona bajo el concepto de PRO, fue construida en el 2009 en Noruega por la empresa Statkraft y con el objetivo de producir 10KW [5, 9] y de alcanzar con 200.000 m² de membrana una producción de 1MW de energía eléctrica [1, 12].

Las ventajas de una planta que funciona con este principio y tecnologías en comparación con otras tecnologías renovables son: i) se puede operar durante las 24 horas por día, ii) no se ve afectada por la velocidad del viento y la radiación solar, iii) tiene la impresión pequeña del pie, y iv) es fácil de escalar [15]. Sin embargo, la aplicación PRO para la generación de electricidad es todavía un reto económico en

comparación con los combustibles fósiles, debido a la falta de membranas PRO eficaces [13, 15–17]. Por lo tanto, estos desafíos indican la necesidad de desarrollar membranas resistentes al ensuciamiento y solutos impermeables, con propiedades de superficie a medida y módulos de membranas con mejor mezclado hidrodinámico, para mitigar el ensuciamiento [6].

En la Figura 5 se ilustra un diagrama Sankey, en donde se representa de manera gráfica la energía libre aprovechable y las pérdidas teóricas, y parasitarias del proceso.

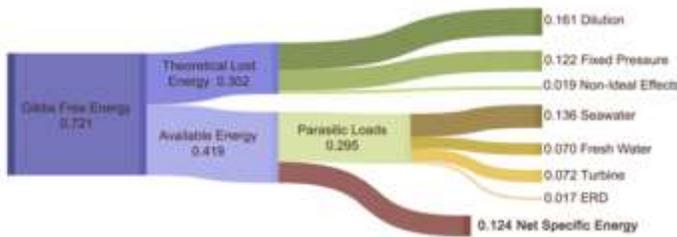


Figura 5. Diagrama Sankey del proceso PRO [3].

Las pérdidas de energía teóricas son el efecto de dilución de la mezcla de 2 partes de agua fresca con 3 partes de agua de mar. Las cargas parasitarias de los subsistemas reducen la energía específica neta disponible a 0.124 kWh/m³. Estas pérdidas incluyen los costes de pretratamiento y las ineficiencias asociadas al funcionamiento de las bombas de refuerzo, necesarias para suministrar a los módulos el agua a la presión de operación del sistema. La energía específica neta disponible es de aproximadamente el 17% de la energía

libre de Gibbs de la mezcla entre el agua dulce y el agua de mar.

3. Membranas utilizadas en el proceso de PRO

En PRO, el agua penetra por ósmosis a través de una membrana semi-permeable de una corriente de alimentación de baja concentración de sales a una salmuera de concentración más alta [13]. Es por esta razón, que uno de los componentes más importantes de este proceso y, por ende, del cual depende del éxito de este, es la membrana semipermeable [13, 18]. Este componente puede ser descrito mediante los valores; A (el coeficiente de permeabilidad al agua), B (coeficiente de permeabilidad del soluto) y S (el parámetro de estructura), y para que sea de utilidad en el proceso de PRO debe combinar las características de las membranas utilizadas en la ósmosis directa (FO) y la ósmosis inversa (RO), es decir, altos flujos de agua a través de la membrana (altos valores A) y un alto rechazo de sales, y un bajo flujo inverso de sales (bajos valores de B) [18].

Para que la generación de energía, mediante PRO, sea económicamente viable las membranas deben tener la característica de posibilitar la producción de 5W/m² [6, 17]. La planta piloto PRO, construida por Statkraft, genera energía eléctrica más o menos en una relación de 1W/m², usando las membranas comerciales, asimétricas de acetato de celulosa [2, 6, 9]. A continuación, en la Tabla 1, se muestra un resumen de los resultados experimentales recientes para el proceso PRO, los cuales utilizan diferentes tipos de membranas y combinaciones de soluciones que representan, ya sea de agua dulce vs. agua de mar, o agua salobre.

Tabla 1. Resumen de los resultados experimentales recientes para el proceso PRO, utilizando diferentes tipos de membranas [12] (1/2)

Solución	Presión de operación (bar)	Flujo de agua (L m ⁻² h ⁻¹)	Densidad de potencia (W m ⁻²)	Tipo de membrana
Resultados experimentales				
Agua dulce (<0.06% NaCl)	11–15	4.8	1.0	Membrana compuesta de película delgada modificada para PRO
	5.0	32.0	5.7	
Aguas residuales (≈0.2% NaCl)	8.9	22.7	5.6	Membrana de TFC de fibra hueca para PRO
	8.9	16.7	4.1	
Agua desionizada (0.0% NaCl)	9.7	10	2.7	Membrana FO de fibra plana comercial de triacetato de celulosa
Agua salobre (≈0.25% NaCl)	9.7	9.0	2.4	
		9.7	8.2	2.2
Agua Fresca (<0.06% NaCl)	12	1.03	0.35	Membrana RO de fibra hueca de poliamida aromática
	8	10	2.25	Membrana mejorada de fibra plana de triacetato de celulosa
	N/A	N/A	1.3	Membrana mejorada de fibra plana de acetato de celulosa
	N/A	N/A	3.5	Membrana compuesta modificada de película delgada
	7	8.2	1.6	Membrana de fibra plana comercial de acetato de celulosa de Osmonics
	12	8.1	2.7	Membrana compuesta de película delgada de GKSS, Alemania
	9	5	1.2	Membrana comercial asimétrica de acetato de celulosa

Tabla 1. Resumen de los resultados experimentales recientes para el proceso PRO, utilizando diferentes tipos de membranas [12] (2/2)

Solución	Presión de operación (bar)	Flujo de agua (L m ⁻² h ⁻¹)	Densidad de potencia (W m ⁻²)	Tipo de membrana
Resultados modelados				
Agua dulce (<0.06% NaCl)	9.6	74	7.4	Membranas compuestas modificadas de película delgada, con A=7.7 L m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹ , B=7.7 L m ⁻² h ⁻¹ y S=350 μm
	12.5	16.7	5.8	Membranas compuestas modificadas de película delgada, con A=1.6 L m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹ , B=0.1 L m ⁻² h ⁻¹ y S=349 μm
	12.5	26.5	9.2	Membranas compuestas modificadas de película delgada, con A=4.4 L m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹ , B=0.76 L m ⁻² h ⁻¹ y S=340 μm
	9.7	23	6.2	Membranas compuestas modificadas de película delgada, con A=7.6 L m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹ , B=4.5 L m ⁻² h ⁻¹ y S=360 μm
Agua salobre (≈0.25% NaCl)	12.5	14.4	5.0	Membranas compuestas modificadas de película delgada, con A=1.6 L m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹ , B=0.1 L m ⁻² h ⁻¹ y S=349 μm
	12.5	21	7.3	Membranas compuestas modificadas de película delgada, con A=4.4 L m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹ , B=0.76 L m ⁻² h ⁻¹ y S=340 μm
	9.7	19.3	5.2	Membranas compuestas modificadas de película delgada, con A=7.6 L m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹ , B=4.5 L m ⁻² h ⁻¹ y S=360 μm

Con el desarrollo de los materiales compuestos las propiedades de las membranas pueden mejorarse [6], [12], tal y como puede observarse en la Figura 5 y por ejemplo en membranas basadas en grafeno, el cual consiste en un plano 2D de átomos de carbono enlazados con una hibridación sp² en una red de panal hexagonal, poseen ventajas potenciales sobre las membranas de ósmosis inversa existentes, las cuales incluyen un espesor despreciable y alta resistencia mecánica, lo que puede permitir el transporte de agua más rápido y una gama más amplia de condiciones de operación que las membranas convencionalmente usadas en PRO. De acuerdo a resultados computacionales, se determinó que una sola capa de grafeno podría separar sal de agua eficazmente y permitiría un flujo de agua, a través de la membrana en el rango de 10 a 100 L/cm²/día/MPa [6].

4. Antecedentes teóricos, matemáticos y termodinámicos

A continuación, en la Figura 6, se describen y se ilustran las variables asociadas a los flujos de agua, presiones, equipos y condiciones de operación para una planta que opera bajo el principio de PRO, con el fin de definir las ecuaciones y modelos matemáticos los cuales rigen este fenómeno.

Como se puede ver en la Figura 4, dos corrientes se bombean a las membranas PRO:

El flujo de drenaje (QD), que tiene una alta concentración de sal (alrededor de 36 kg/m³ de agua de mar), y se regula para obtener la presión óptima del proceso PRO.

Un flujo de alimentación (QF), de agua de baja salinidad (en la práctica a menos de 5 kg/m³), a partir de plantas de aguas superficiales o de tratamiento de aguas

residuales. Esta corriente se regula para tener una baja presión (algo más de 1 bar).

La energía recuperada por la turbina puede ser estimada por la Ecuación 1.

$$W = Q_b * P * \eta \quad (1)$$

Donde W es la energía recuperada por la turbina (watt), Q_b es el flujo de agua que atraviesa la membrana PRO (m³/s), P es la presión de funcionamiento y η la eficiencia de la turbina de producción de la electricidad, ya que por lo general se espera que el proceso opere con diferentes flujos, esta turbina se supone que es un Pelton o turbinas de flujo cruzado, que dan buenas eficiencias en una amplia gama de flujos de agua (alrededor de 90% de para Pelton y 80% para una turbina de flujo transversal) [19].

El parámetro de control principal es la presión de trabajo P. En condiciones óptimas, se ha demostrado que se obtiene el máximo de energía para el proceso de PRO cuando la diferencia de presiones entre los dos lados de la membrana PRO es la mitad de la presión osmótica en la membrana [18]–[20], y la cual es representada por la Ecuación 2.

$$P = P_f + \frac{\Delta\pi}{2} \quad (2)$$

Donde P es la presión de trabajo, P_f es la presión a la que la solución de baja concentración en sales es alimentada y ΔΠ es la presión osmótica. Esta presión es generada por el gradiente de concentración de sales entre ambas soluciones (ver Figura 7).

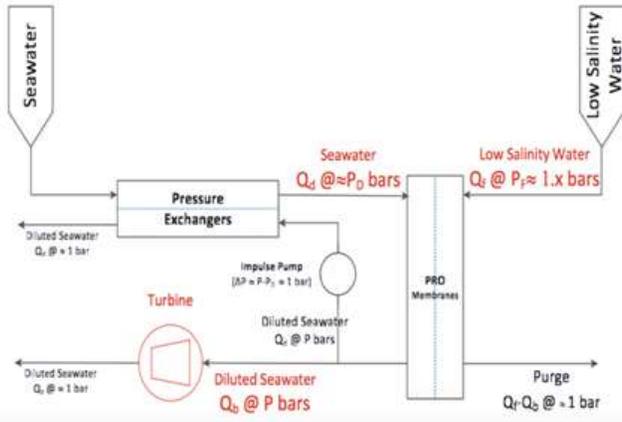


Figura 6. Diagrama esquemático de una planta PRO con agua marina [19]

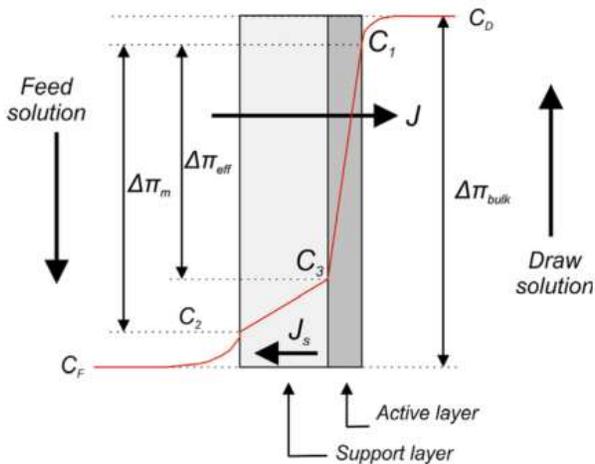


Figura 7. Polarizaciones de concentración de membranas externas e internas que se producen durante PRO. [12]

En la Figura 7, CD y CF son las concentraciones de sal de la alimentación a granel y dibujadas soluciones, respectivamente. C1 y C2 son las concentraciones de sal debido a la polarización de la concentración externa, lo que resulta en una diferencia osmótica reducida $\Delta\pi_m$. C3 es la concentración de sal debido a la polarización de la concentración interna, resultando en una diferencia de presión osmótica efectiva $\Delta\pi_{eff}$.

Esta presión osmótica de una solución acuosa, puede ser calculada numéricamente mediante el uso de la relación de Van't Hoff [18], la cual está representada por la ecuación 3.

$$\pi = R * T * \sum i * M \quad (3)$$

Donde R es la constante universal de los gases (0.083145 L · bar / mol · K), T es la temperatura absoluta (K), i es el factor de Van't Hoff sin dimensiones para ion específico, y M es la molaridad del ion específico. En la Figura 8 se observa la presión osmótica alcanzada con diferentes concentraciones de cloruro de sodio (NaCl).

El flux de agua (m/h) que se da a través de la membrana semipermeable, se expresa matemáticamente por la Ecuación 4.

$$J_w = A * (\Delta\pi - \Delta P) \quad (4)$$

Sin embargo, las Ecuaciones 3 y 4 se basan en condiciones ideales, pero no se deben dejar de lado irreversibilidades asociadas a: (i) dilución por la polarización de la concentración externa (ECP), este fenómeno ocurre debido al flujo de agua desde la solución alimentada hacia la extraída, reduciendo la concentración efectiva en la superficie activa de la membrana y (ii) la acumulación por la polarización de la concentración interna (ICP), la cual se presenta por la acumulación de sal en el soporte poroso, ocasionando un aumento en la concentración en la superficie de la membrana y de esta manera, reduciendo el gradiente y por ende la potencia [3], [12], [15], [20].

5. Consideraciones ambientales

Si se compara la generación de energía eléctrica mediante PRO con las metodologías y tecnologías convencionales, este método novedoso no tiene impactos negativos sobre el medio ambiente y es considerado un método de producción de energía libre de emisiones, ya que no emite gases efecto invernadero (GEI's) durante su operación [8, 9] y la descarga y/o vertimiento del agua salobre, agua residual procedente de la instalación, imitaría la descarga natural de un río en el océano [12].

Los grandes impactos ambientales de las plantas de energía osmótica, como todos los otros métodos convencionales, podrían estar asociados con la construcción de las instalaciones, vías de acceso, las conexiones a la red eléctrica, etc., pero las plantas de PRO por lo general requieren una pequeña área de influencia, impacto, implementación y operación [8, 12]. Por ejemplo, una instalación con una capacidad de producción de 25 MW de potencia, tendría el tamaño de un campo de fútbol [12]. Además, dado que, en el mundo, la mayoría de desembocaduras de los ríos en el mar se encuentran en zonas pobladas, urbanas o industriales, las plantas de PRO pueden ser construidas sin que se vean afectadas zonas naturales, ecosistemas, la biodiversidad, las condiciones y calidad de vida, etc. [9, 12]. Inclusive, este tipo de plantas podrían ayudar a mejorar las condiciones medioambientales (calidad del agua) de áreas de alta influencia industrial [9], ya que este proceso puede operar con aguas residuales residenciales e industriales, como fluido impulsor [19].

6. Conclusiones

En el presente trabajo se abordó la posibilidad de generación de energía eléctrica renovable, cero emisiones (Eq-CO2) y disponible las 24 horas del día, a través del proceso de Presión Retardada por Osmosis (PRO), el cual utiliza membranas semipermeables y aprovecha los gradientes de salinidad entre dos cuerpos

Referencias

de agua, como ejemplo entre fuentes de agua dulce y el mar. Esta forma de generar energía renovable no impacta negativamente el bienestar humano y ambiental, ya que, en comparación con las plantas de energía solar y eólica, este tipo de proceso se lleva a cabo en pequeñas instalaciones, porque lo que determina el potencial energético es el área de la membrana (m²) y estas vienen dispuestas de forma modular y en una geometría que busca la maximización de la potencia por área de trabajo.

Como se pudo evidenciar, la membrana semipermeable es el elemento más importante y crucial del proceso PRO, ya que dependiendo de sus características podrá permitir un mayor flujo a través de ella de agua de la solución menos concentrada en sales a la más concentrada, lo que significa más trabajo en la turbina, de acuerdo a su resistencia física podrá tener una vida útil mayor y aguantar presiones de trabajo más elevadas, y sus propiedades químicas, y de superficie posibilitarán menores tasas de ensuciamiento y la aparición de fenómenos, como la polarización, los cuales afectan el proceso osmótico, y por ende la eficiencia de la generación de energía eléctrica. Actualmente, se están utilizando membranas convencionales para Ósmosis Inversa, como por ejemplo las de Acetato de Celulosa, las cuales brindan una relación de 1W/m². Sin embargo, con la aparición de los materiales compuestos y métodos eficientes, viables y baratos para producirlos, se pueden fabricar membranas, tales como las basadas en grafeno, que puedan otorgar una relación mayor a 5W/m², valor determinado para considerar el proceso de PRO viable, y mejores características químicas, y físicas, para lograr una operación estable, eficiente y rentable en el tiempo.

Colombia al tener gran infinidad de ríos caudalosos que desembocan a sus dos fuentes de agua salada, el mar Caribe y el océano Pacífico, posee una potencialidad muy alta para la generación de energía eléctrica, mediante este proceso osmótico. Sin embargo, se deben hacer estudios serios sobre los perfiles de concentración de sales, niveles de contaminantes, hidrodinámica de los cuerpos de agua involucrados y de impacto social y ambiental, para que la construcción de una planta de PRO genere los mayores beneficios sociales, ambientales, diversifique la matriz energética del país y brinde la posibilidad de tener una fuente de energía limpia, de alta sostenibilidad y confiabilidad para zonas no interconectadas, ya que un gran número de fuentes de corrientes de agua dulce, se encuentran en estas regiones, como por ejemplo ciudades, pueblos y asentamientos humanos ubicados en el Pacífico colombiano.

- [1] N. R., D. Memmier and C. P. Borges, "Direct osmosis process for power generation using salinity gradient: FO/PRO pilot plant investigation using hollow fiber modules," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 103, pp. 27–36, 2016.
- [2] K. Gerstandt, K. V. Peinemann, S. E. Skilhagen, T. Thorsen, and T. Holt, "Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant," *Desalination*, vol. 224, no. 1–3, pp. 64–70, 2008.
- [3] G. O'Toole, L. Jones, C. Coutinho, C. Hayes, M. Napoles, and A. Achilli, "River-to-sea pressure retarded osmosis: Resource utilization in a full-scale facility," *Desalination*, vol. 389, pp. 39–51, 2016.
- [4] T. M. López, "Producción de Bioetanol a partir de *Elodea* sp . Production of Bioethanol from *Elodea* sp .", *Ingenierías USBMed*, vol. 8, no. 1, pp. 37–42, 2017.
- [5] A. Altaee and A. Sharif, "Pressure retarded osmosis: Advancement in the process applications for power generation and desalination," *Desalination*, vol. 356, pp. 31–46, 2015.
- [6] Z. J. Jia, B. G. Wang, S. Q. Song, and Y. S. Fan, "Blue energy: Current technologies for sustainable power generation from water salinity gradient," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 91–100, 2014.
- [7] K. Sharma, Y. H. Kim, S. Yiacoumi, J. Gabitto, H. Z. Bilheux, L. J. Santodonato, R. T. Mayes, S. Dai, and C. Tsouris, "Analysis and simulation of a blue energy cycle," *Renew. Energy*, vol. 91, pp. 249–260, 2016.
- [8] H. D. S. S. Karunarathne and S. Walpalage, "Applicability of pressure retarded osmosis power generation technology in Sri Lanka," *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 211–217, 2013.
- [9] K. Touati and F. Tadeo, "Green energy generation by pressure retarded osmosis: State of the art and technical advancement—review," *Int. J. Green Energy*, vol. 14, no. 4, pp. 337–360, 2017.
- [10] O. Álvarez-Silva, A. Osorio, S. Ortega, and P. Agudelo-Restrepo, "Estimation of the electric power potential using pressure retarded osmosis in the leon river's mouth: A first step for the harnessing of saline gradients in colombia," *Ocean. 2011 IEEE - Spain*, 2011.
- [11] E. Nagy, J. Dudás, and I. Hegedűs, "Improvement of the energy generation by pressure retarded osmosis," *Energy*, p. , 2016.
- [12] F. Helfer, C. Lemckert, and Y. G. Anissimov, "Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends - A review," *J. Memb. Sci.*, vol. 453, pp. 337–358, 2014.
- [13] K. L. Hickenbottom, J. Vanneste, M. Elimelech, and T. Y. Cath, "Assessing the current state of commercially available membranes and spacers for energy production with pressure retarded osmosis," *Desalination*, pp. 108–118, 2015.
- [14] H. Sakai, T. Ueyama, M. Irie, K. Matsuyama, A. Tanioka, K. Saito, and A. Kumano, "Energy recovery by PRO in sea water desalination plant," *Desalination*, vol. 389, pp. 52–57, 2016.
- [15] J. Lee and S. Kim, "Predicting power density of pressure retarded osmosis (PRO) membranes using a new characterization method based on a single PRO test," *Desalination*, vol. 389, pp. 224–234, 2016.
- [16] S. Sarp and J. Cho, "Editorial of the special issue for pressure retarded osmosis," *Desalination*, vol. 389, p. 1, 2016.
- [17] A. Tanioka, "Preface to the special issue on 'Pressure Retarded Osmosis in Megaton Water System Project,'" *Desalination*, vol. 389, pp. 15–17, 2016.
- [18] S. Sarp, Z. Li, and J. Saththasivam, "Pressure Retarded Osmosis (PRO): Past experiences, current developments, and future prospects," *Desalination*, vol. 389, pp. 2–14, 2016.
- [19] K. Touati and T. Schiestel, "Evaluation of the Potential of Osmotic Energy as Renewable Energy Source in Realistic Conditions," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 261–269, 2013.
- [20] A. Achilli, T. Y. Cath, and A. E. Childress, "Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation," *J. Memb. Sci.*, vol. 343, no. 1–2, pp. 42–52, 2009.