

Diseño y análisis de un sistema experimental de generación de energía eléctrica a partir de gradiente osmótico mediante ósmosis retardada por presión

Autor: Daniel Jesús Suárez Alfonso

Tutores: Alejandro Ruiz García e Ignacio de la Nuez Pestana

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Resumen

Tras la Revolución Industrial, la demanda de energía se ha incrementado con el paso de los años, desembocando esto en excesivas emisiones de contaminantes y de gases de efecto invernadero que han conducido al cambio climático de la actualidad. Esto ha motivado a comunidades de todo el mundo a buscar soluciones renovables, como la solar y la eólica. Sin embargo, su gran problemática radica en que son relativamente difíciles de predecir. Por esta razón, se han estudiado las fuentes de energía renovable que podrían aprovecharse de los océanos, convirtiéndose así la “energía azul” en una de las fuentes renovables más populares. La energía azul aprovecha la diferencia de concentración salina entre dos cuerpos de agua para producir electricidad, resultando ser más predecible que las fuentes solar o eólica. El objeto del presente trabajo es el de diseñar una planta piloto de Ósmosis Retardada por Presión (PRO). El proceso de PRO transforma la diferencia de salinidad entre dos cuerpos de agua en energía al permitir el transporte de agua a través de una membrana semipermeable, y oponiéndose a la aplicación de una presión hidráulica. El agua fluye desde la solución menos concentrada a la más concentrada hasta que se alcanza el equilibrio osmótico. En el presente trabajo se ha desarrollado un algoritmo de diseño de sistemas de PRO, haciendo uso de modelos ya existentes. Dicho algoritmo opera sobre un tubo de presión de PRO con 8 elementos de membrana en serie, de fibra hueca, cuyos parámetros de entrada en términos de concentraciones, caudales y presiones se modifican de forma iterativa. Se muestran numerosas gráficas y tablas en las que se analiza la influencia de cada una de las variables de entrada (concentraciones, presiones y caudales) sobre la potencia que genera el sistema. Teniendo presente la influencia de estas variables, se diseña la planta a escala piloto con aquellos equipos y máquinas indispensables para su funcionamiento.

Introducción

Tras la Revolución Industrial, la demanda de energía no ha hecho más que incrementarse con el paso de los años, resultando esto en excesivas emisiones de contaminantes y de gases de efecto invernadero. Esta consecuencia ha motivado a comunidades de todo el mundo a buscar soluciones eficientes, confiables, y sobre todo renovables, para generar energía limpia y dejar de depender de los combustibles fósiles.

Entre las fuentes de energía limpia descubiertas, la solar y la eólica destacan por ser las económicamente más efectivas [1]. Sin embargo, son muy impredecibles. Es por esta razón que recientemente, se han estudiado las fuentes de energía renovable que podrían aprovecharse de los océanos, como por ejemplo las corrientes marinas, los gradientes térmicos y de salinidad. Así, el gradiente osmótico (también llamado “energía azul”) se ha ganado un lugar entre las fuentes renovables más populares [2]. La energía azul aprovecha la diferencia de concentración salina entre dos cuerpos de agua para producir electricidad, y sin emitir una notable cantidad de gases contaminantes.

Las tecnologías más prometedoras desarrolladas a partir de la energía azul son la Electrodiálisis Inversa (RED), la Conversión Energética Termo-Osmótica (TOEC) y la Ósmosis Retardada por Presión (PRO).

Se podría decir que una planta de PRO opera a la inversa que una desalinizadora de agua de mar de Ósmosis Inversa (ver Figura 1), ya que en vez de suministrarle energía para superar el gradiente de presión osmótica y obtener una solución con un menor contenido de sales, este tipo de planta aprovecharía la fuerza osmótica para producir energía por la mezcla de una fuente de agua dulce (FS) y una salada (DS) [3]. La primera planta piloto de generación de electricidad que funciona con un sistema de PRO fue construida en 2009 en Noruega por la empresa Statkraft (Figura 2), y tenía el objetivo de producir 10 kW [4].

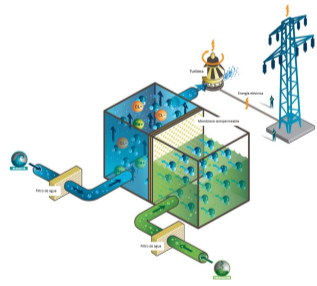


Figura 1. Esquema básico de funcionamiento de PRO



Figura 2. Primera planta piloto de PRO en Noruega, por la empresa Statkraft

Metodología Desarrollada

En un sistema de PRO, el fenómeno de transporte que ocurre a través de la membrana semipermeable está basado en la termodinámica que describe la energía liberada durante un proceso de mezcla espontánea, en este caso de las soluciones diluida (FS) y concentrada (DS).

De la termodinámica básica, se deduce que el flujo de permeado (J_p) es el producto del coeficiente de permeabilidad para el agua (A) y la fuerza conductora a través de la membrana [5]:

$$J_p = A \cdot (\Delta\pi - \Delta p)$$

$$\Delta\pi = \pi_{D,m} - \pi_{F,m}$$

$$\pi = 3,805 \cdot C^2 + 42,527 \cdot C + 0,434$$

$$C_{D,m} = \left(C_{D,av} + \frac{J_p}{J_p} \right) \cdot e^{-\frac{J_p}{k_D}} - \frac{J_p}{J_p}$$

$$C_{F,m} = \left(C_{F,av} + \frac{J_p}{J_p} \right) \cdot e^{\frac{J_p}{k_F}} - \frac{J_p}{J_p}$$

$$C_{D,av} = 0,5 \cdot (C_{D,in} + C_{D,out})$$

$$C_{F,av} = 0,5 \cdot (C_{F,in} + C_{F,out})$$

$$J_s = J_p \cdot \frac{B}{A \cdot \beta \cdot R \cdot T} \cdot \left(1 + \frac{A \cdot \Delta p}{J_p} \right)$$

$$k_D = \frac{(Sh_D \cdot D_{D,av})}{d_{h,D}}$$

$$k_F = \frac{(Sh_F \cdot D_{F,av})}{d_{h,F}}$$

$$K = \frac{S_F}{D_{F,av}}$$

$$Sh_D = 0,048 \cdot Re_D^{0,6} \cdot Sc_D^{1/3}$$

$$Sh_F = 0,048 \cdot Re_F^{0,6} \cdot Sc_F^{1/3}$$

$$Re_D = \frac{\rho_{D,av} \cdot v_{D,av} \cdot d_{h,D}}{\mu_{D,av}}$$

$$Re_F = \frac{\rho_{F,av} \cdot v_{F,av} \cdot d_{h,F}}{\mu_{F,av}}$$

$$D = -1,025 \cdot 10^{-10} \cdot C + 1,518 \cdot 10^{-9}$$

$$Sc_D = \frac{\mu_{D,av}}{\rho_{D,av} \cdot D_D}$$

$$Sc_F = \frac{\mu_{F,av}}{\rho_{F,av} \cdot D_F}$$

$$d_{h,D} = \frac{2}{\frac{H_D}{H_D} + (1 - \epsilon_D) \cdot \frac{8}{H_D}}$$

$$d_{h,F} = \frac{2}{\frac{H_F}{H_F} + (1 - \epsilon_F) \cdot \frac{8}{H_F}}$$

$$\rho = -1,047 \cdot C^2 + 39,462 \cdot C + 997,97$$

$$\mu = 0,001 \cdot (0,012 \cdot C^2 + 0,065 \cdot C + 0,985)$$

$$\Delta p = p_{D,in} - \frac{PL_D}{2} - p_{F,in} + \frac{PL_F}{2}$$

$$PL_D = \lambda_D \cdot L \cdot \frac{\rho_D}{d_{h,D}} \cdot \frac{v_{D,av}^2}{2}$$

$$PL_F = \lambda_F \cdot L \cdot \frac{\rho_F}{d_{h,F}} \cdot \frac{v_{F,av}^2}{2}$$

$$\lambda_D = K_\lambda \cdot 6,23 \cdot Re_D^{-0,3}$$

$$\lambda_F = K_\lambda \cdot 6,23 \cdot Re_F^{-0,3}$$

$$DF = \frac{C_{D,out}}{C_{D,in}} = 1 - Y_m$$

$$CF = \frac{C_{F,out}}{C_{F,in}} = \frac{1}{1 - Y_m}$$

$$Y_m = \frac{Q_p}{Q_{F,in}}$$

$$C_{D,out} \cdot (Q_{D,in} + Q_p) = C_{D,in} \cdot DF \cdot (Q_{D,in} + Q_p) - J_s$$

$$C_{F,out} \cdot (Q_{F,in} - Q_p) = C_{F,in} \cdot CF \cdot (Q_{F,in} - Q_p) + J_s$$

Para conocer el potencial de generación de energía del sistema, se necesita conocer la entalpía específica (h) a la entrada y a la salida de la turbina, pues la energía (en $J \text{ kg}^{-1}$) que producirá este dispositivo se obtendrá como la diferencia de dichas entalpías. En la siguiente Figura se muestran los dispositivos y máquinas que forman parte de una planta de PRO, como lo son las bombas de alimentación, intercambiador de presión, bomba booster y turbina:

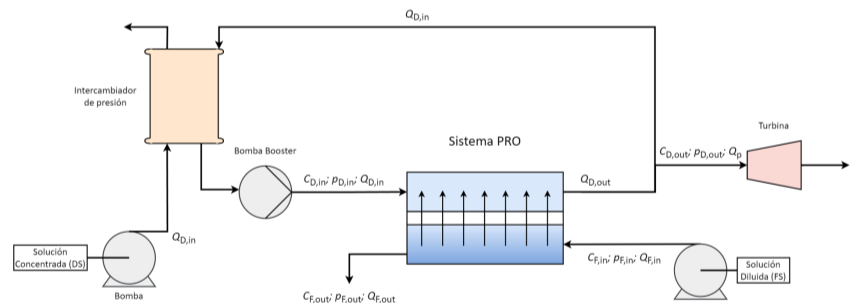


Figura 3. Diagrama de flujo de la planta PRO

La energía por unidad de tiempo (potencia) y densidad de potencia ideales generadas por la turbina se obtienen con:

$$G_{P_{id}} = P_{TB} = \eta_{TB} \cdot \dot{m}_{TB} \cdot (h_{TB,in} - h_{TB,out}) \quad P_{D_{id}} = \frac{P_{TB}}{n \cdot S_m}$$

$$h(T, p, C) = h(T, p_0, C) + \vartheta \cdot (p - p_0) \quad \dot{m}_{TB} = Q_p \cdot \rho_{D,out}$$

Análisis de Soluciones

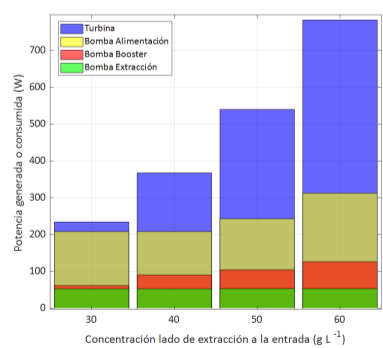


Figura 4. Histograma de Potencias consumidas por los diferentes dispositivos, y generada por la turbina, para diferentes concentraciones del lado de extracción a la entrada, y para las condiciones de $Q_{D,in}$, $Q_{F,in}$, $p_{D,in}$ más favorables en cada caso

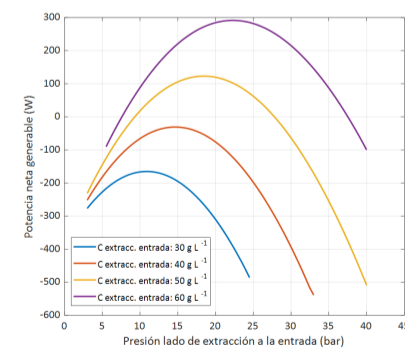


Figura 5. Gráfica de Potencia neta generable frente al rango de presiones a la entrada de la extracción, en bar, y para diferentes concentraciones de la extracción, a las condiciones de $Q_{D,in} = 3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, $Q_{F,in} = 4,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y 8 elementos de membrana

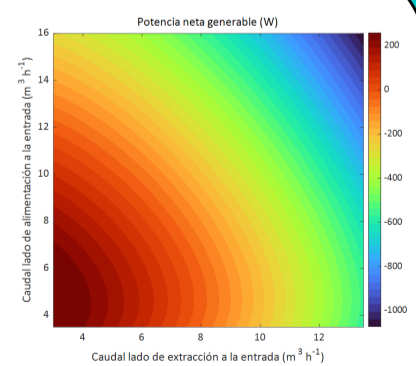


Figura 6. Mapa de color de la Potencia neta generable para diferentes combinaciones del caudal de alimentación y de extracción, ambos a la entrada, para las condiciones de $C_{D,in} = 60 \text{ g L}^{-1}$, $p_{D,in} = 22,5 \text{ bar}$ y 8 elementos de membrana

La Figura 4 es un histograma de potencias, donde en azul se encuentra la única potencia que es generada por el sistema, es decir, es la que entrega la turbina. El resto de dispositivos consumen potencia para realizar sus funciones. La Figura 5 muestra las curvas Potencia - presión para diferentes concentraciones de entrada al lado de la extracción, y cómo estas tienen tendencia parabólica. Esto significa que la potencia tendría un máximo de generación para una presión determinada, y que a partir de esta, la potencia decrecería. La Figura 6 ilustra que las mayores potencias netas se encuentran para caudales del lado de extracción bajos, y para caudales del lado de alimentación que no sobrepasen los 7 u 8 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$. Analizando pequeños incrementos en los rangos de caudal, se deduce que el sistema es más sensible a modificaciones en el caudal del lado de extracción que de alimentación.

Conclusiones

Recapitulando, se desarrolló un algoritmo de cálculo del sistema de PRO, que integra su modelo matemático y evalúa la gran posibilidad de soluciones de forma iterativa. A partir de estos valores, se establecen las denominadas “ventanas de operación”, que son los rangos de las condiciones de partida en los que debería trabajar la planta piloto para maximizar la generación de energía eléctrica. Tras diversos análisis, se observó que es de gran importancia que la diferencia de concentración entre ambas soluciones sea elevada. También se estudió la relevancia de la presión de entrada al lado de la extracción, y la influencia de los caudales movidos de ambas soluciones. Así, se llega a la conclusión de que la máxima energía generable se tiene cuando existe cierto equilibrio entre los caudales de entrada y la presión de entrada en el lado de la extracción. En cuanto al sistema de instrumentación y control automático, se seleccionaron los equipos comerciales necesarios, tales como conductímetros, caudalímetros, sensores de presión o de temperatura, etc. Todos estos sensores envían sus lecturas en tiempo real a un PLC, el Siemens Simatic S7-1500, que procesa la información y manda las señales necesarias a los actuadores, que son las electroválvulas y los variadores de frecuencia de las bombas. Por último, se incluyó una pantalla táctil (HMI) con el objetivo de que los operarios de la planta puedan supervisar el proceso.

Referencias

[1] Irena, The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025. 2016. [En línea]. Disponible en: www.irena.org

[2] Z. Jia, B. Wang, S. Song, y Y. Fan, «Blue energy: Current technologies for sustainable power generation from water salinity gradients», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 31, mar. 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113007983?via%3Dihub>

[3] K. Gerstandt, K. V. Peinemann, S. E. Skilhagen, T. Thorsen, y T. Holt, «Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant», Desalination, vol. 224, n.o 1-3, pp. 64-70, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916408000325>

[4] A. Altaee y A. Sharif, «Pressure retarded osmosis: Advancement in the process applications for power generation and desalination», Desalination, vol. 356, pp. 31-46, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916414005037>

[5] Ngai Yin Yip et al., «Thin-Film Composite Pressure Retarded Osmosis Membranes for Sustainable Power Generation from Salinity Gradients», Environ Sci Technol, vol. 45, n.o 10, pp. 4360-4369, abr. 2011. [En línea]. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es104325z>