

MODELO PARA EVALUACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA PRODUCIDA EN UNA PLANTA DE ÓSMOSIS RETARDADA POR PRESIÓN

MODEL FOR EVALUATING THE ELECTRIC POWER OUTPUT OF PRESSURE RETARDED OSMOSIS GENERATION PLANT

Mario Llamas Rivas

Universidad de Guanajuato
m.llamasrivas@ugto.mx

Alejandro Pizano Martínez

Universidad de Guanajuato
apizano@ugto.mx

Iván Abel Hernández Robles

Centro Mexicano de Energías Renovables SC
ia.hernandez@ugto.mx

Miguel Ángel Gómez Martínez

Universidad de Guanajuato
gomezma@ugto.mx

Adrián González Parada

Universidad de Guanajuato
gonzaleza@ugto.mx

Héctor Javier Estrada García

Universidad de Guanajuato
hestrada@ugto.mx

Resumen

Las plantas de generación PRO producen energía eléctrica mediante el proceso de ósmosis retardada por presión (PRO, por sus siglas en inglés), el cual ocurre al mezclar dos soluciones de diferente concentración salina a través de una membrana semipermeable. El proceso PRO produce un caudal presurizado que impulsa un sistema turbina-generador eléctrico, generándose entonces potencia eléctrica. En este trabajo se presenta un modelo unificado para evaluar la producción de energía eléctrica de una planta PRO. El modelo permite evaluar la producción de potencia con un enfoque hacia el análisis del impacto de la integración de plantas PRO en la

operación de estado estacionario de redes de distribución de energía eléctrica. Para evaluar la generación de potencia eléctrica por medio del modelo propuesto se presenta dos casos de estudio. Los resultados obtenidos revelan que a mayor generación de potencia activa la planta PRO requiere un mayor consumo de potencia reactiva.

Palabras Claves: Gradiente salino, modelo para evaluación de generación de potencia eléctrica, ósmosis retardada por presión, planta de generación PRO.

Abstract

The PRO power generation plants produce electric energy based on the pressure retarded osmosis process (PRO), which is derived from mixing two solutions with different salinity concentrations through a semipermeable membrane. The PRO process produces a pressurized flow that propels a turbine-electric power generator system, allowing electric energy generation. This work presents a unified mathematical model able to evaluate the electric power output of a PRO power generation plant. The model allows evaluating the electric power output with a focus on the analysis of the impact on the electric distribution networks steady state performance produced by the integration of PRO plants. Two case studies are reported where the proposed model is used to evaluate the electric power output of the generation plant. The obtained results show that a major electric active power output of the PRO generation involves a major consumption of reactive power.

Keywords: *Model for the evaluation of electric power generation, pressure retarded osmosis, PRO generation plant, salinity gradient.*

1. Introducción

La tendencia de extraer y aprovechar la energía disponible en los océanos ha tomado gran importancia para ampliar la cartera energética a nivel mundial. Las fuentes de energía del océano que actualmente pretenden aprovecharse son las corrientes marinas, mareomotriz, oleaje, gradiente térmico y gradiente salino. Atendiendo a dicha importante tendencia, en México, estas fuentes definen las líneas pilares del Centro Mexicano de Innovación de Energía–Océano (CEMIE-O),

creado a través del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética [CEMIE-O, 2014]. Este trabajo se enmarca en el aprovechamiento de la energía del océano asociada al gradiente salino para la producción de energía eléctrica.

El gradiente salino tiene la más alta concentración de energía de todas las fuentes renovables marinas y se estima que cuenta con un potencial global de 1650 twhr por año y podría cubrir el 20% de la demanda energética mundial. En este sentido, es considerada una fuente atractiva por explorar [Tran, 2015]. La producción de energía por gradiente de salinidad no genera emisiones de gases CO₂ u otro tipo de desperdicios que puedan interferir con el cambio climático global. Además, desde una perspectiva de generación de energía eléctrica, posee grandes beneficios en comparación con otras fuentes de generación renovables bien establecidas, tales como la energía solar, la energía eólica y la energía geotérmica. Por ejemplo, a partir del gradiente de salinidad se podría generar energía eléctrica de manera continua. Mientras que la generación a partir de la energía del oleaje, irradiación solar, eólica y geotérmica prestan variaciones que afectan el abastecimiento continuo de la demanda eléctrica; por ende, requieren sistemas robustos de almacenamiento de energía. Tal que complican la integración de la energía producida a la red eléctrica y elevan el nivel de complejidad de operación de los sistemas eléctricos.

Entre los procesos más destacados para producir energía eléctrica a partir del gradiente de salinidad se encuentran los siguientes: ósmosis retardada por presión (PRO, por sus siglas en inglés), Electrodiálisis inversa (RED, por sus siglas en inglés), Mezcla capacitiva (CAPMIX, por sus siglas en inglés), la Expansión de Hidrogel, Compresión de Vapor y Generación Hidrocrática [Straub, 2016]. Las tecnologías más desarrolladas hasta el momento para extraer energía del gradiente de salinidad están basadas en los procesos PRO y RED [Berry, 2015, Thorsen, 2009]. Este trabajo se relaciona con la producción de energía eléctrica a partir del proceso PRO.

En la desembocadura de un río, el agua dulce de éste se pone en contacto con el agua salada del océano, apareciendo un gradiente de salinidad debido a la diferencia de concentración salina entre el agua de río y de mar. El gradiente de

salinidad produce una diferencia de potencial químico que establece fuerzas moleculares que obligan a las moléculas del agua de río y de mar a mezclarse. En el proceso PRO la mezcla del agua de río y de mar se realiza de manera controlada a través de membranas semipermeables en módulos de mezclado, donde dicha diferencia de potencial químico y fuerzas moleculares se aprovechan para producir un caudal permeado presurizado durante el proceso de mezclado. El caudal permeado se utiliza como energía primaria del sistema de generación para producir energía eléctrica. Esta energía es renovable debido a que la mezcla del agua de los ríos y de los océanos es parte del ciclo natural del agua.

La eficiencia y viabilidad económica de las plantas de generación PRO depende en gran medida de las características de las membranas semipermeables de los módulos de mezclado. En la actualidad la tecnología ha tenido un avance significativo y se estima que se podrían lograr densidades de potencia superiores a 5 watt por metro cuadrado de membrana semipermeable [Thorsen, 2009]. En este sentido, las plantas de generación en base al proceso PRO, podrían resultar económicamente viables y podrían convertirse en una de las tecnologías más prometedoras para la generación de energía eléctrica a partir del gradiente de salinidad.

Para el consumo de la energía producida por las plantas PRO, la potencia generada se debe integrar a las redes de distribución de energía eléctrica. Sin embargo, su integración puede afectar y/o modificar la operación de dichas redes. Para cuantificar el impacto que dicha integración tiene en la operación de las redes de distribución se requiere primeramente evaluar la cantidad de potencia producida por las plantas de generación PRO. En relación a este aspecto, en la literatura se han reportado diferentes modelos que permiten estimar la densidad de potencia de la membrana semipermeable de los módulos de mezclado. En los modelos reportados dicha densidad de potencia se utiliza para calcular la potencia efectiva a la salida del módulo de mezclado. Esta potencia efectiva simplemente se multiplica por la eficiencia de los elementos transductores (por ejemplo de la turbina y generador eléctrico) para así evaluar la potencia eléctrica neta que sería producida por la planta de generación. Un compendio extenso de los modelos reportados hasta la

fecha puede encontrarse en [Touati, 2017] y [Achilli, 2016]. Todos estos modelos podrían considerarse principalmente útiles para el estudio de la viabilidad económica de la planta de generación PRO. Sin embargo, en el mejor conocimiento de los autores, hasta el momento no ha sido reportado en la literatura un modelo de las plantas PRO que pueda ser directamente incorporado en estrategias de análisis de redes de distribución para estimar el impacto de la integración de la potencia producida. Teniendo en mente lo anterior, este trabajo presenta un modelo unificado para evaluar la producción de energía eléctrica de una planta de generación en base al mecanismo PRO. En este modelo los transductores turbina y generador son representados explícitamente. Además, es formulado de tal forma que puede ser directamente incorporado en estrategias para el análisis de estado estacionario de redes de distribución de energía eléctrica. El modelo unificado presentado permite entonces evaluar la producción de potencia eléctrica con un enfoque hacia el análisis del impacto de la integración de plantas PRO en la operación de redes eléctricas de distribución. Éste trabajo se deriva de los objetivos en desarrollo de la Línea Transversal I-LT1: Tecnologías y Estrategias de Interconexión Eléctrica de Energías del Océano para el Mar Territorial Mexicano del CEMIE-O. El modelo presentado es susceptible de extenderse para incrementar la precisión de la evaluación de la producción de energía al considerar diferentes fenómenos que afectan el caudal permeado [Achilli, 2009], [Berry, 2015], [Maisonneuve, 2014], [Straub, 2016]. Este aspecto es de fundamental interés y se encuentra bajo desarrollo por parte de los proponentes de este trabajo.

2. Métodos

Principio PRO para producción de energía eléctrica

El proceso de ósmosis retardada por presión fue investigado por primera vez por Sydney Loeb en la Universidad de Ben-Gurion de Negev, Beersheba, Israel. Loeb describe el mecanismo y la viabilidad de la tecnología para la generación de energía eléctrica [Tran, 2015]. Este proceso se discute en base a figuras 1 y 2.

La figura 1 ilustra un módulo que almacena agua de mar (alta concentración salina C_m) y agua de río (baja concentración salina C_r) en dos compartimentos separados

por una membrana semipermeable; permeable al solvente (agua) pero impermeable al soluto (sal). Ambos compartimentos se encuentran a una misma presión (p.e. 1 atm). La diferencia de salinidad produce una diferencia de potencial químico ΔP_{quim} entre ambas soluciones la cual provoca la tendencia del soluto y el solvente a disolverse uniformemente. El agua de mar ejercerá una presión osmótica π_m sobre el agua de río, mientras que el agua de río ejercerá una presión osmótica π_r sobre el agua de mar. Como π_m es mayor que π_r , el agua de río permeará al compartimento de agua salada debido al gradiente (diferencia) de la presión osmótica $\Delta\pi$ entre ambas soluciones. Después de un intervalo de tiempo, se logra el equilibrio químico debido a que cierto volumen de agua de río habrá permeado al compartimento de agua salada (igual concentración salina en ambas soluciones). Por lo tanto, se tendrá un incremento de volumen en dicho compartimento, resultando una columna de presión de altura final $z(\Delta\pi)$ función de la diferencia presión osmótica $\Delta\pi$ (figura 2a). Este proceso es conocido como ósmosis hacia adelante (FO, por sus siglas en inglés). La diferencia de presión osmótica $\Delta\pi$ se define como la presión necesaria en el compartimento de la solución de alta concentración salina para evitar el proceso de ósmosis.

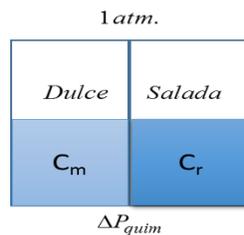
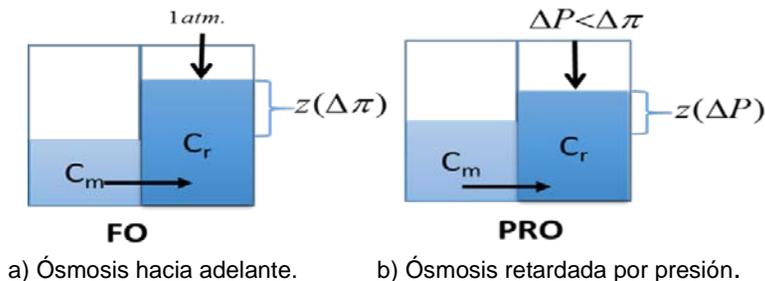


Figura 1 Proceso osmótico.



a) Ósmosis hacia adelante. b) Ósmosis retardada por presión.

Figura 2 Principios de ósmosis [Maisonneuve, 2014].

Suponga ahora que el proceso de ósmosis FO se altera al mantener una presión hidráulica (externa) ΔP menor a la diferencia de presión osmótica (ver figura 2b) en el compartimento de la solución de alta concentración. El proceso de ósmosis será retardado, habrá flujo neto permeado de agua dulce al compartimento de agua salada y resultará una columna de presión de altura final $z(\Delta P)$ menor a la producida en el proceso FO $z(\Delta \pi)$. En este caso no se logrará el equilibrio químico, por tanto, existirá energía potencial extraíble. Este proceso es conocido como ósmosis retardada por presión y es considerado en este trabajo.

Con el fin de aprovechar la energía del proceso PRO, el compartimento de alta concentración salina se adiciona con un sistema de bombeo para mantener la presión hidráulica ΔP . De tal manera que el potencial químico asociado al gradiente de salinidad pueda producir un caudal permeado a través de la membrana a la presión hidráulica ΔP . Esto da lugar al caudal presurizado requerido para impulsar el sistema de generación de energía eléctrica.

La eficiencia de generación se expresa normalmente en términos de la densidad de potencia. En este trabajo se consideran la densidad de potencia de la membrana y de la planta. Estas se definen como la potencia hidráulica a la salida del módulo de la membrana y la potencia eléctrica en las terminales del generador eléctrico por unidad de área de la membrana.

Modelo de la planta PRO

Desde un punto de vista general la planta PRO contempla cuatro componentes fundamentales: entradas al módulo de membranas, módulo de membranas, salidas del módulo de membranas y generador eléctrico. Este último se conecta a la red de distribución de energía eléctrica, como se muestra en la figura 3. El principio básico de operación de la planta PRO para la producción de energía eléctrica es el siguiente. En las entradas del módulo de membrana se bombea el caudal de agua marina Q_{mar} y de río Q_{rio} . En el módulo de membranas ocurre el proceso PRO, lo que genera un caudal permeado presurizado $Q_{permeado}$ de agua de río. Esto resulta en un caudal de agua salobre equivalente a la suma del caudal permeado y el caudal de agua de mar, i.e., $Q_{mar} + Q_{permeado}$. De este caudal de agua salobre, la porción

equivalente al agua de mar Q_{mar} se desecha al mar. Es importante mencionar que el caudal de agua de río $Q_{residual}$ que no permeó a través de la membrana es devuelto al río. Sin embargo, la porción del agua salobre equivalente al flujo permeado $Q_{permeado}$ alimenta la turbina, la cual funciona como primomotor y produce un par mecánico P_{mec} que es entregado a la flecha del generador eléctrico. El generador eléctrico transforma el par mecánico en potencia eléctrica S_{elec} , la cual se integra a la red de distribución de energía eléctrica. Lográndose la producción de energía eléctrica por medio de la planta PRO.

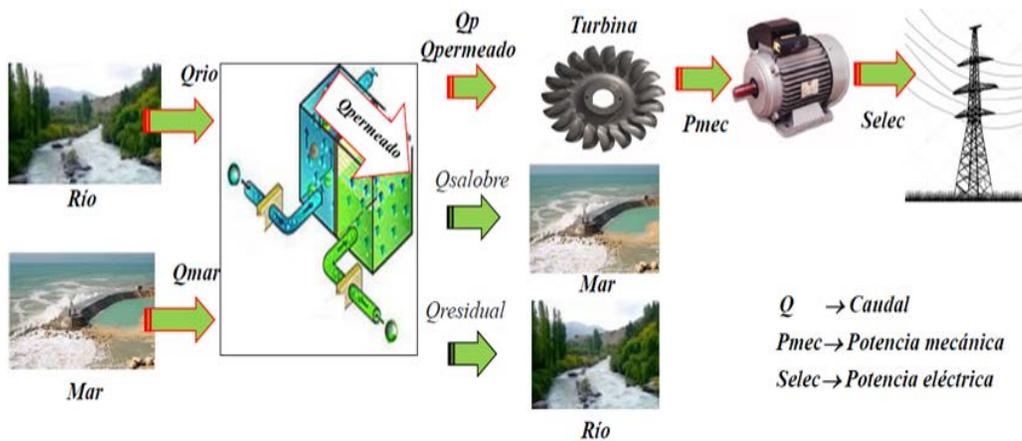


Figura 3 Diagrama esquemático de la planta PRO.

Con el fin de representar el proceso de producción de energía eléctrica antes descrito, en las siguientes secciones se describen los modelos matemáticos que representan los componentes principales de la planta PRO. Estos modelos dan lugar al modelo unificado de la planta PRO.

Modelo del módulo de membranas

Para fines de determinar la potencia eléctrica producida por la planta PRO se requiere determinar el caudal permeado en los módulos de las membranas, como se describe a continuación. El caudal permeado Q_p (m³/s) en la membrana es función de la diferencia de presión osmótica entre los dos cuerpos de agua de diferente concentración salina. Las ecuaciones 1 y 2 permiten evaluar la presión osmótica en el cuerpo de agua de río y de mar, respectivamente.

$$\pi_r = \frac{C_r RT i_r}{M} \quad (1)$$

$$\pi_m = \frac{C_m RT i_m}{M} \quad (2)$$

En estas ecuaciones los subíndices r y m denotan agua de río y agua de mar, respectivamente. π representa la presión osmótica en (kPa), C es la concentración salina en (g/l), R es la constante Universal de los gases 8.3144 ((l kPa)/(K.mol)). i es el Factor Van't Hoff; para agua de río (i_r) tiene un valor de 1 y para agua de mar (i_m) tiene un valor de 2. M es la masa molar del cloruro de sodio (NaCl) y tiene un valor de 58.4427 g/mol.

A partir de las ecuaciones 1 y 2 la diferencia de presión osmótica $\Delta\pi$ en kpa se puede expresar como en la ecuación 3 [Berry, 2015, [Thorsen, 2009]. La presión que hace que el caudal de flujo permeado Q_p se transporte hacia la turbina se conoce como presión hidráulica ΔP . La presión hidráulica máxima ΔP_{max} , y por ende el mayor rendimiento del proceso PRO, se alcanza cuando la presión hidráulica es la mitad de la diferencia presión osmótica. Esto se representa por medio de ecuación 4. Finalmente, el total del caudal permeado Q_p que llega hasta la turbina depende principalmente del área de la membrana A_{mem} , número de módulos de membranas N_{mod} y la velocidad del flujo permeado J_w , como es dado por la ecuación 5. La velocidad del flujo J_w está dada por la ecuación 6, donde A representa el coeficiente de permeabilidad del agua ($m^3/(Pa.s.m^2)$) [Achilli,2009, Berry, 2015, Gerstandt, 2008, Maisonneuve, 2014, Tran, 2015]

$$\Delta\pi = \pi_m - \pi_r \quad (3)$$

$$\Delta P_{max} = \frac{\Delta\pi}{2} \quad (4)$$

$$Q_p = J_w A_{mem} N_{mod} \quad (5)$$

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P_{max}) \quad (6)$$

Modelo de la turbina

La potencia mecánica en watts a la salida de la turbina P_{tur} se puede evaluar a partir de la ecuación 7. Donde η_t es la eficiencia de la turbina. Q_p es el caudal

permeado con velocidad J_w y ΔP_{max} es la presión hidráulica máxima, estos son evaluados a partir de las ecuaciones 4, 5 [Berry, 2015].

$$P_{tur} = \eta_t \Delta P_{max} Q_p \quad (7)$$

Modelo del generador eléctrico

A partir de la revisión bibliográfica no se identificó algún tipo específico de generador eléctrico idóneo para plantas de generación en base a PRO. Por lo anterior y tomando en cuenta su gran aplicación para fuentes de energía renovable, se propone aquí utilizar como generador eléctrico una máquina de inducción tipo jaula de ardilla trifásica. Esta máquina permite su directa conexión a la red eléctrica. Aunque es importante mencionar que otro tipo de generadores y modos de conexión (p.e. a través de convertidores conmutados) podrían ser considerados. El diagrama esquemático de dicha máquina se muestra en la figura 4.

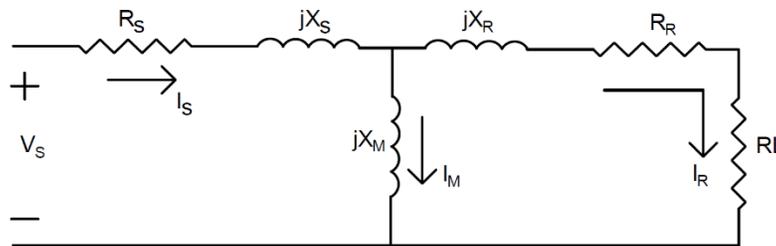


Figura 4 Diagrama esquemático de la máquina de inducción [Kersting, 2002].

Primeramente, se establece que la potencia mecánica que recibe la flecha del generador es igual a la potencia de salida de la turbina dada por la ecuación 7, como es denotado por la ecuación 8.

$$P_{mec} = P_{tur} \quad (8)$$

La potencia P_{mec} en el eje en el generador de inducción se transforma a potencia eléctrica en el rotor y se representa por PR . Esta potencia PR está dada por la potencia que se transfiere al estator a través del entrehierro y la potencia que se consume en pérdidas en el mismo rotor, como es dado por la ecuación 9. Donde s_1 y s_2 representan el deslizamiento de secuencia positiva y negativa,

respectivamente. Las corrientes fasoriales de secuencia positiva y negativa en el rotor están representadas por I_R^1 y I_R^2 en amperes, respectivamente. R_r representa la resistencia del rotor en ohms [Tran, 2015]. Además, el balance entre la potencia mecánica en la flecha del generador y la potencia en el rotor es una condición que se debe satisfacer incondicionalmente y se expresa en la ecuación 10.

$$P_R = 3|I_R^1|^2 \left(\frac{1-s_1}{s_1} \right) R_R + 3|I_R^2|^2 \left(\frac{1-s_2}{s_2} \right) R_R \quad (9)$$

$$\Delta P_{ind} = P_{mec} - P_r = 0 \quad (10)$$

En la ecuación 9 las corrientes de secuencia positiva I_R^1 y I_R^2 negativa del rotor se calculan por medio de la ecuación 11.

$$I_R^1 = \frac{jX_M}{j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_1}} I_S^1; \quad I_R^2 = \frac{jX_M}{j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_2}} I_S^2 \quad (11)$$

Donde X_M y X_R son las reactancias de magnetización y del rotor en ohms, respectivamente. I_S^1 e I_S^2 representan las corrientes fasoriales de secuencia positiva y negativa en amperes en las terminales del estator de la máquina, dadas por ecuaciones 12a y 12b.

$$I_S^1 = \frac{V_S^1 \left[j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_1} \right]}{jX_M \left(jX_R + \frac{R_R}{s_1} \right) + (R_S + jX_S) \left[j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_1} \right]} \quad (12a)$$

$$I_S^2 = \frac{V_S^2 \left[j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_2} \right]}{jX_M \left(jX_R + \frac{R_R}{s_2} \right) + (R_S + jX_S) \left[j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_2} \right]} \quad (12b)$$

Donde R_S y X_S representan la resistencia y reactancia del estator, mientras que V_S^1 y V_S^2 representan los voltajes fasoriales de secuencia positiva y negativa en las terminales de la máquina, respectivamente. Estos voltajes se obtienen a partir de los voltajes de línea a neutro V_{abc}^{LN} en las terminales de la máquina, los cuales se pueden considerar como conocidos. Note que en las ecuaciones 9-12 no se han considerado cantidades de secuencia cero, esto se debe a que se considera que los devanados del estator de la máquina de inducción están conectados en delta o

en estrella con neutro flotante. Estos tipos de conexión son típicos e implican que no existen corrientes de secuencia cero. Las corrientes fasoriales I_{abc} en amperes en las terminales de la máquina en el dominio de las fases se pueden evaluar a partir de la ecuación 13, donde A_s es la matriz de transformación de componentes simétricas.

$$I_{abc} = A_s [0 \quad I_s^1 \quad I_s^2]^T \quad (13)$$

Finalmente, la potencia eléctrica producida en las terminales del generador se puede evaluar de la ecuación 14.

$$S_{ele}^{abc} = V_{abc}^{LN} I_{abc}^* \quad (14)$$

Donde S_{ele}^{abc} es la potencia compleja en volts-ampere. Se hace notar que el modelo unificado para cuantificar la potencia eléctrica generada por la planta de generación PRO a partir de la diferencia de concentración salina entre el agua de mar y de río está entonces dado por las ecuaciones 1 a la 14.

3. Resultados

El modelo 1-14 se utiliza en esta sección para evaluar la potencia eléctrica producida a partir del gradiente de salinidad. Para este fin, se considera una planta de generación de capacidad nominal de 7.5 kW, la cual puede ser producida a través 80 módulos de membranas planas con densidad de potencia máxima de 4.1 w/m². En este caso se adoptó una turbina Pelton con eficiencia de $\eta_t = 0.85$. El generador eléctrico es una máquina de inducción trifásica jaula de ardilla conectada en estrella con neutro flotante, de 6 polos, con capacidad de 7.5 kW y opera a 220 V y una frecuencia de 60 hz. Los parámetros de las membranas y del generador de inducción son proporcionados en la tabla 1.

Para la evaluación de la potencia eléctrica se abordaron los siguientes dos escenarios. En el escenario 1 se evalúa la potencia eléctrica producida al considerar que la planta está constituida por diferentes cantidades de módulos de membranas. Las diferentes cantidades de módulos producen una potencia hidráulica capaz de hacer operar el generador eléctrico desde un 10% a un 100% su capacidad nominal.

Tabla 1 Parámetros del generador y la membrana.

Membranas	Generador
$C_r = 0 \text{ g/l}$	$R_R = 0.144 \Omega$
$C_m = 35 \text{ g/l}$	$R_S = 0.294 \Omega$
$T = 293.15 \text{ }^\circ\text{K}$	$X_R = 0.209 \Omega$
$M = 58.44 \text{ g/mol}$	$X_S = 0.503 \Omega$
$R = 8.31 \text{ l.kPa/}^\circ\text{K.mol}$	$X_M = 13.25 \Omega$
$l_r = 1$	
$l_m = 2$	
$A = 1.87 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{Pa s m}^2$	
$A_m = 28 \text{ m}^2$	
$N_{mod} = 80$	

Para este caso se ha tomado una concentración salina del agua de río y de mar de 0 g/l y 35 g/l, respectivamente. En el escenario 2 se evalúa la potencia eléctrica generada al variar el nivel de concentración salina del agua del río C_r y de mar C_m en valores que van de 0 a 10 g/l y 30 a 50 g/l, respectivamente. En este caso se considera que la planta está constituida por una cantidad fija de 80 módulos de membranas, los cuales son capaces de hacer operar el generador eléctrico al 100% de su capacidad nominal.

4. Discusión

Escenario 1

La figura 5 muestra producción de potencia activa y reactiva en las terminales del generador para las diferentes cantidades de módulos y niveles de generación del generador eléctrico. Para la discusión de estos resultados se ha adoptado la convención pasiva, tal que valores negativos y positivos denotan potencia producida y consumida, respectivamente. Se puede observar que a mayor cantidad de módulos (y por ende mayor porcentaje del nivel de generación) la planta PRO incrementa la producción de potencia activa (útil o efectiva), pero requiere de un mayor consumo de potencia reactiva (no efectiva). En relación con la integración de plantas de generación PRO a las redes eléctricas, este resultado sugiere que a mayor nivel de generación de potencia activa por medio de este tipo de plantas se deben considerar estrategias y equipos adicionales para incrementar el soporte de potencia reactiva para compensar el inherente consumo de potencia reactiva.

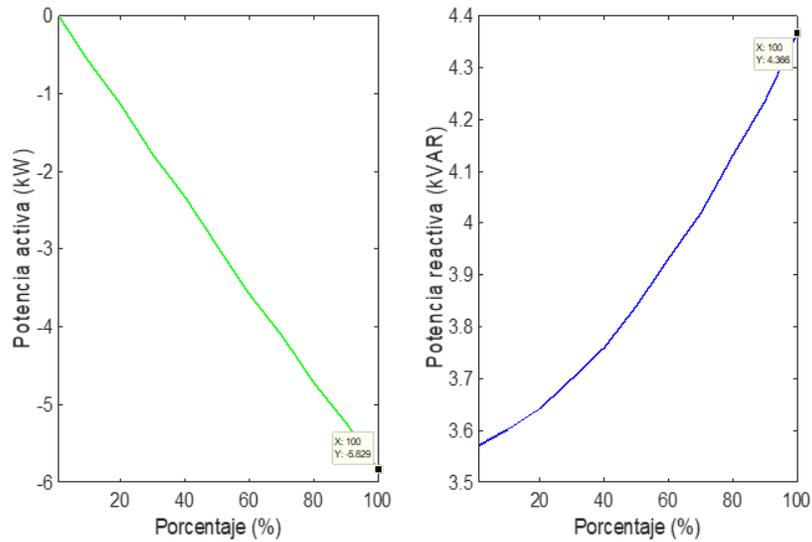


Figura 5 Potencia activa y reactiva en los diferentes niveles de generación.

Escenario 2

La figura 6 muestra producción de potencia activa y reactiva en las terminales del generador para diferentes concentraciones de salinidad.

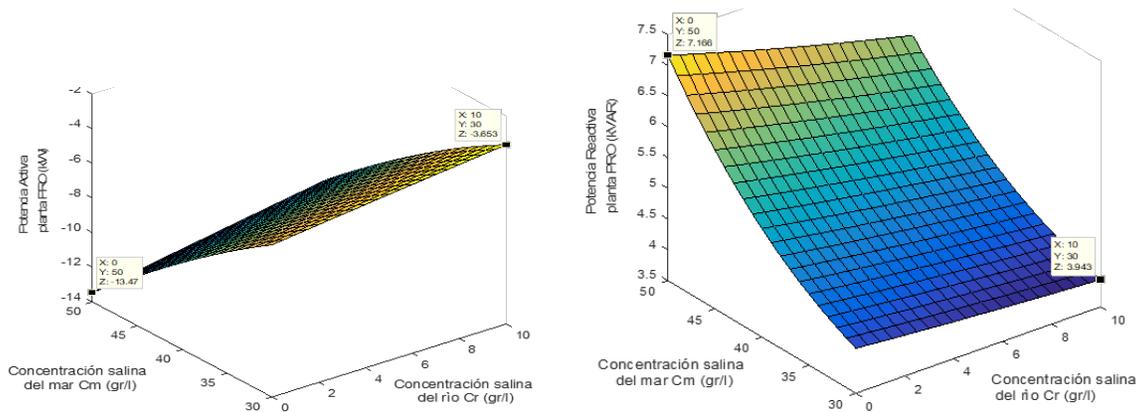


Figura 6 Potencia activa y reactiva para las diferentes concentraciones de salinidad.

Los resultados ilustrados en la figura 6 indican que la producción y el consumo de potencia activa y reactiva, respectivamente se incrementan conforme se incrementa la diferencia de salinidad entre el agua de río y agua de mar. En este caso la máxima producción de potencia activa es de 13.47 kW, mientras que el consumo máximo de potencia reactiva alcanza 7.16 kVAR. Superando entonces la capacidad nominal de la planta y del generador eléctrico (7.5 kW), la cual hipotéticamente se obtendría

con los 80 módulos de membrana. Estos valores máximos se obtienen cuando las concentraciones salinas del agua de río y de mar son $C_r = 0$ g/lit y 50 g/lit, respectivamente. Este resultado sugiere que para la selección precisa de la capacidad de la planta PRO y en la planeación de la generación de energía eléctrica se debe tomar en cuenta la variación de la salinidad para diferentes estaciones del año y distintas zonas geográficas.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta un modelo unificado básico para evaluar la generación de potencia compleja de una planta PRO. Los resultados obtenidos sugieren que la integración de estas plantas a las redes eléctricas para el consumo de la potencia activa producida deberá considerar aspectos relacionados con la compensación de potencia reactiva. Así mismo la precisa selección y diseño de la planta deberá considerar los posibles cambios de salinidad que ocurren en diferentes periodos estacionales y diferentes zonas geográficas. Es necesario extender el modelo para considerar aspectos que alteran la evaluación del caudal permeado. Además, es necesario modelar diferentes tipos de generadores eléctricos. Por último, para evaluar el impacto de la integración de la energía asociada a la planta PRO en la operación de las redes de distribución de energía eléctrica, se requiere que el modelo unificado sea incorporado en las estrategias de análisis de dichas redes. Estos aspectos se encuentran bajo desarrollo por parte de los autores de este trabajo y los resultados obtenidos serán sometidos a evaluación para su posible publicación.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Achilli Andrea, Cath Tzahi Y., Childress Amy E., Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation, *Journal of Membrane Science*, vol. 343, pp. 42-52, 2009.
- [2] Achilli A., Blandin G., Brogioli D., Chung T.-S., Cipollina A., D'Angelo A., Derese S., Galia A., Grasman S., Gurreri L., Han G., Hickenbottom K.L., Kumpavat K., Mantia F. La, Le Clech P., Li X., Micale G., Papapetrou M.,

- Pasta M., Piacentino A., Post J., Scialdone O., Tamburini A., Tedesco M., Vanoppen M., Veerman J., Verliefde A.R.D., Vermaas D.A., Wan C., Zhang S., Sustainable Energy from Salinity Gradients, Woodhead Publishing, 1st ed., 2016.
- [3] Berry A., Weinand D., Zenouzi M., Hennessy C., Mathieu J., Kowalski G., Pressure Retarded Osmosis: Laboratory Scale Design and Experiment. ASME, Energy Sustainability, vol. 2: pp.1-8, 2015.
- [4] CEMIE-O (2014), Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano: <http://cemieoceano.mx/>.
- [5] Gerstandt Karen, Peinemann K.-V., Skilhagen Stein Erik, Thorsen Thor, Holt Torleif, Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant, Desalination, Volume 224, Issues 1–3, pp. 64-70, 2008.
- [6] Kersting William H., Distribution System Modeling and Analysis, CRC Press, 1st ed., 2002.
- [7] Maisonneuve Jonathan, Pillay P., Pressure-retarded osmotic power for remote communities in Quebec, IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-5, 2014.
- [8] Straub Anthony P., Deshmukh A., Elimelech M., Pressure-retarded osmosis for power generation from salinity gradients: is it viable? Energy & Environmental Science, Energy Environ. Sci., The Royal Society of Chemistry, vol. 9, pp. 31-48, 2016.
- [9] Thorsen T., Holt T., The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis, Journal of Membrane Science, vol. 335, pp. 103-110, 2009
- [10] Tran Thomas T. D., Bianchi Carlo, Melville Joseph Edward Paul, Park Keunhan and Smith Amanda D., Design of housing and mesh spacer supports for salinity gradient hydroelectric power generation using pressure retarded osmosis, 2015 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech, 2015), pp. 141-147, 2015.
- [11] Touati Khaled, Tadeo Fernando, Ho Chat Sung, Ha Kim Joon, Alvarez-Silva Oscar, Pressure Retarded Osmosis, Academic Press, 1st ed., 2017.