

MODELAMIENTO DE SISTEMAS HÍBRIDOS PARA ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA A UNA DESALADORA EN LAS ISLAS GALÁPAGOS

MODELING OF HYBRID SYSTEMS TO SUPPLY ENERGY TO A DESALINATION PLANT IN THE GALAPAGOS ISLANDS

Ángel Guillemes Peira

Universidad del Pacífico, Facultad del Mar y Medio Ambiente, El Pinar Alto, Calle B, Leonor Stacey N48-177, Quito-Ecuador,

Contacto: angel.guillemes@upacifico.edu.ec

RESUMEN

El trabajo tuvo como objetivo modelar los sistemas híbridos basados en las energías renovables, que proporcionen las necesidades energéticas a una planta desaladora (ósmosis inversa), con una capacidad de producción de 50 m³/día. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software Hybrid Optimization Model for Electric Renewables. Se tomaron como elementos de partida la demanda eléctrica de una planta desaladora estándar, las especificaciones técnicas de los equipos utilizados, así como los potenciales de radiación solar y las velocidades de viento de la Isla San Cristóbal del archipiélago de Galápagos de Ecuador. Los resultados muestran que el sistema híbrido óptimo, desde el punto de vista técnico-económico es el eólico-fotovoltaico-diesel, compuesto por un aerogenerador, paneles fotovoltaicos, un banco de baterías y un generador diésel.

Palabras clave: modelamiento, desalinización, ósmosis inversa, energías renovables, Islas Galápagos.

ABSTRACT

This study aimed to model hybrid systems based on renewable energy, which satisfy the energetic demand to a desalination plant (reverse osmosis) with a production capacity of 50 m³/day. The data was analyzed using the software Hybrid Optimization Model for Electric Renewables. The electric demand of an average desalination plant, the technical specifications of the equipment used, as well as the potential energy from solar radiation, and wind speed of the San Cristobal Island in the Galapagos archipelago of Ecuador, were taken as a departure point. The results show that the optimal hybrid system, from the technical-economic point of view is the wind-photovoltaic-diesel, consisting of a wind turbine, photovoltaic panels, a storage battery system and a diesel generator.

Keywords: modeling, desalinization, reverse osmosis, renewable energy, Galapagos Islands.



Recibido: 07 de marzo del 2014

Aceptado: 21 de noviembre del 2014

ESPAMCIENCIA 5(2): 89-95/2014

INTRODUCCIÓN

El archipiélago de las Galápagos se caracteriza por ser un territorio seco y árido. Hasta la mitad del siglo pasado, la población de todo el archipiélago era capaz de autoabastecerse de alimentos con su propia agricultura y ganadería, sin embargo durante las últimas décadas se ha producido un notable incremento de la población residente y de los visitantes, esto junto al desarrollo gradual de las infraestructuras (puertos, aeropuertos, carreteras, hoteles, etc.), no ha ido acompañado de una mejora paralela en la obtención de agua potable.

En las islas Galápagos el agua es necesaria para tres sectores diferentes: consumo de la población, agricultura y turismo. De estos, el agrícola tiene la mayor demanda hídrica anual, sobretudo en la isla de San Cristóbal que posee una escasa oferta de agua, por tratarse de una isla excesivamente dependiente del clima, con meses secos y temporada de lluvias menos abundantes, lo cual causa periodos de insuficiencia de agua. Ante ello, la implantación de desaladoras con aporte energético renovable, aislados de la red, constituyen una excelente solución a la escasez hídrica de la isla.

La desalación de agua de mar ha demostrado ser una tecnología fiable y económicamente sostenible, para la obtención de agua potable a partir de la segunda mitad del siglo XX (Cipollina, 2009), convirtiéndose en la única alternativa posible para el desarrollo de algunas regiones del mundo. La desalación consiste en la eliminación de las sales disueltas en las aguas salinas o salobres, con el propósito de potabilizarlas tanto para el consumo humano, como para uso industrial y agrícola.

Las instalaciones más empleadas en la desalación de agua de mar con energía renovable son los sistemas autónomos para satisfacer pequeñas demandas hídricas, hasta 50 m³/día (Wiley, 2013). Estas unidades pueden llegar a abastecer alrededor de 333 personas, tomando un consumo promedio por persona igual a 150 L/día. Dentro de las tecnologías existentes, la de mayor eficiencia para la desalación de agua de mar es la de ósmosis inversa, que en las últimas décadas ha sufrido un vertiginoso desarrollo con importantes beneficios, como son la reducción de costes del metro cúbico del agua desalada y la calidad del suministro (Herbert, 2008).

La tecnología empleada en estas plantas es bastante fiable, siendo solo necesario un mantenimiento muy básico. La ósmosis inversa abastecidas con energía solar o eólica, se consideran hasta el momento las fuentes renovables más efectivas, técnico-económico, para el suministro de energía a plantas desaladoras (Sánchez, 2007).

Los dos componentes fundamentales que intervienen en el proceso de ósmosis inversa son el sistema de presión y las membranas. La presión que debe ser aplicada va a depender del grado de salinidad que presente la solución a desalar, que en el caso de aguas salobres se sitúa en un rango de 17 a 27 bares, y en el caso de agua de mar va desde 55 hasta 82 bares (Papadakis y Mohamed, 2007).

El factor de conversión (relación entre el agua producto que atraviesa la membrana y la que entra en la misma) también depende de la salinidad del agua y está entre el 90 % y el 95 % en el caso de aguas salobres y entre el 35 % y el 50 % para agua de mar (Semiat, 2010). El agua que no llega a atravesar la membrana tiene un contenido de sales muy superior a la de entrada.

Además la desalación de agua requiere un aporte constante del suministro energético, lo cual constituye un serio problema para estas tecnologías, dadas las tendencias al aumento del coste de las energías y la contaminación que provoca la quema de combustibles fósiles para la obtención de las mismas.

Antes este panorama, los sistemas híbridos hacen referencia a dos o más opciones de generación de energía que son combinados en una misma instalación para producir energía eléctrica. Estos sistemas híbridos suelen estar compuestos habitualmente por fuentes de energía renovables y de ser necesario se complementan con grupos electrógenos, quedando relegados en la mayoría de las situaciones únicamente para desempeñar funciones de emergencia. La principal particularidad de las desaladoras de ósmosis inversa, es que requieren de un suministro constante de energía para evitar que las membranas puedan degradarse.

Para el diseño de los sistemas híbridos el método más usado es el modelado mediante software computacional. Como herramienta para el diseño, modelado y optimización de sistemas híbrido, HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) ha sido empleado en diferentes estudios para analizar la viabilidad de los mismos. El presente trabajo ha sido realizado en función de la demanda energética requerida para el funcionamiento de una planta desaladora y de los potenciales energéticos naturales existentes en la Isla San Cristóbal del archipiélago de la Galápagos en Ecuador. El objetivo es proponer un sistema híbrido óptimo, con recursos eólicos o solares como principales fuentes de energía, y diésel como suministro alterno, que proporcione energía a una planta desaladora de agua de mar con el principio de ósmosis inversa, para una producción diaria de hasta 50 m³ de agua potable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Software Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER)

Para la modelización del sistema híbrido de generación de energía eléctrica se empleó el software HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) que ha sido desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos (NREL). HOMER es una herramienta capaz de modelar y comparar un sinnúmero de opciones de diseño de sistemas energéticos renovables, basándose en sus características técnico – económica.

Se realizaron las tres tareas principales que ejecuta este tipo de software: la simulación, optimización y un análisis de sensibilidad. El proceso de simulación determinó una configuración particular del sistema, una combinación de diferentes componentes de tamaños específicos y una estrategia operacional que definió cómo esos componentes trabajan juntos y se comportaría en una escena dada en un periodo de tiempo determinado. La simulación sirvió para dos propósitos. El primero determinó si el sistema es factible y segundo estimó los costes a lo largo del ciclo de vida del sistema.

En el proceso de optimización, HOMER simuló todas las posibles configuraciones del sistema en busca de la que mejor satisfaga las necesidades técnicas al menor costo económico posible.

El análisis de sensibilidad ayudó a evaluar los efectos de inestabilidad o cambios en variables sobre las cuales no se tiene ningún control, tales como: la velocidad del viento o el precio futuro del combustible.

Recursos energéticos renovables

Los datos de la velocidad del viento y la radiación solar, fueron medidos desde julio 2011 hasta agosto 2013. Los datos de radiación solar se obtuvieron de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy (Nasa, 2013) y los datos de velocidades de viento se tomaron de una estación meteorológica (Meteored, 2013), ambos para una localización en la Isla de San Cristóbal de Latitud Sur $0^{\circ}40'$ y Longitud Oeste $89^{\circ}14'$ (Figura 1).

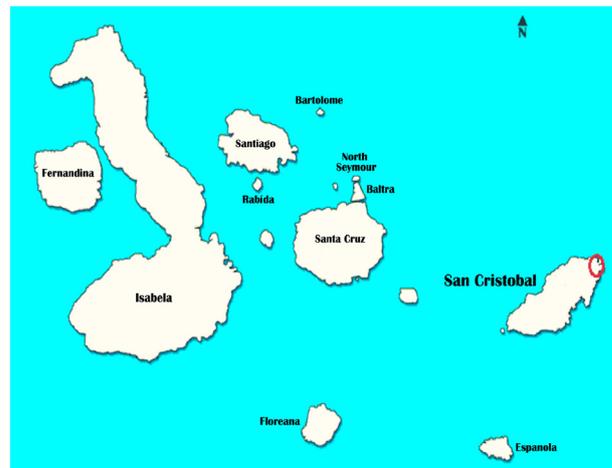


Figura 1. Localización en la Isla de San Cristobal en el archipiélago de Galápagos.

En los datos obtenidos se apreciaron diferencias en la magnitud de la velocidad del viento, con más variaciones y siendo más imprevisibles, que las correspondientes a la radiación solar. El promedio mensual de la velocidad del viento en la Isla San Cristóbal es mayor de julio a diciembre, lo que se superpone estrechamente con la temporada húmeda, que dura de junio a diciembre en el archipiélago de las Galápagos (Stoltenberg y Ley, 2010).

El software HOMER trata las velocidades del viento con la función probabilística de Weibull, que es la recomendada por la literatura especializada (Ucar y Balo, 2008), esta función permite conocer la probabilidad para que el viento tenga una cierta velocidad en un período determinado. Además, HOMER permitió trabajar tanto con medias horarias, como con las medias mensuales.

Los datos analizados de medias anuales fueron los siguientes: radiación solar $5.31 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ y velocidad del viento 5.39 (m/s) .

La media de radiación solar que se obtuvo es elevada, por lo que a priori garantizaría una buena producción de energía eléctrica de origen fotovoltaico. Para el caso de la velocidad del viento, el valor resultante es bajo, por lo que limitará la elección del aerogenerador que será utilizado en la modelación.

Sistemas modelados

Para la modelación de los sistemas fotovoltaicos se introducen unos costes por Watts instalado igual a siete dólares y unos valores de potencia entre 0 y 500 kW, lo cual permitirá que el software seleccione la potencia óptima a instalar en cada caso.

El cuadro 1 muestra las características del aerogenerador propuesto para el estudio, tiene una potencia nominal de 83 kW. Este equipo fue seleccionado dado su disponibilidad en el mercado y sus posibilidades de abastecer las distintas demandas eléctricas de las plantas desaladoras. Por otra parte, se estableció como premisa de partida, después de analizar los datos correspondientes a las velocidades del viento con la función probabilística de Weibull, que para la elección del aerogenerador a utilizar en el modelado, este tuviera la velocidad de arranque más baja de todos los disponibles en la base de datos del software HOMER, con el objetivo de que estas se situaran por debajo de la media del viento predominante en la zona. Por esta razón, se utilizó un único aerogenerador que cumpliera con las exigencias establecidas.

Cuadro 1. Características comerciales del aerogenerador.

Especificaciones	WES 18
Potencia nominal (kW)	83
Diámetro de rotor (m)	18
Velocidad de arranque (m/s)	4
Velocidad de corte (m/s)	20

La curva de potencia de la turbina se encuentra representada en la figura 2.

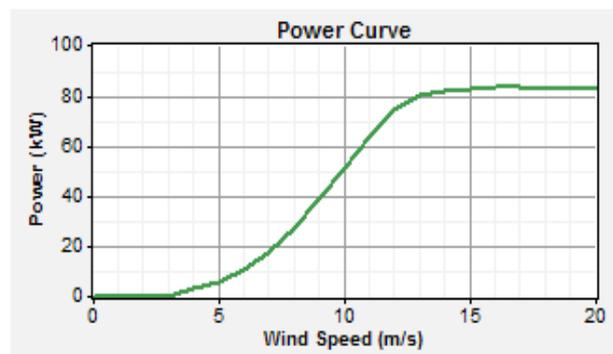


Figura 2. Curva de potencia del aerogenerador de 83 kW (WES 18).

La función prioritaria de las baterías en un sistema híbrido, es la de acumular la energía producida por los sistemas renovables para ser utilizada durante periodos de déficit. Para la modelación de los sistemas híbridos se seleccionó la batería de 6.0 V con una capacidad nominal de 360 Ah, ampliamente difundidas en el mercado para acumulación de energía proveniente de sistemas renovables. HOMER representará las baterías como un sistema de “dos almacenes”. Un almacén proporciona la capacidad inmediatamente disponible, mientras el segundo sólo se descarga a una proporción limitada (Givler y Lilienthal, 2005).

El conversor se utilizó para transformar la corriente con-

tinua en alterna en un proceso denominado inversión y a su vez la corriente alterna en continua en un proceso llamado rectificación (Givler y Lilienthal, 2005). Se asumirá como rendimiento en los procesos de inversión y rectificación el 90 % y 85 % respectivamente, tomándose para el modelo valores entre 0 y 30 kW de capacidad para el convertidor.

Un generador eléctrico no es más que un sistema termodinámico el cual transforma la energía química de un combustible en energía eléctrica. HOMER proporciona una serie de generadores con distintos principios de funcionamiento, de los cuales se selecciona el generador diésel de combustión interna. Para la modelación del sistema híbrido, el generador solo producirá la energía necesaria para abastecer el déficit del sistema y no recargará las baterías (las baterías son recargadas con el exceso de energía producida por los sistemas renovables).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez configurados los datos de entrada del sistema, HOMER simuló y optimizó todas las combinaciones posibles, comparando los sistemas desde lo técnico-económico y desechando aquellos que no se adecuan a la carga, se presentan a continuación los resultados logrados.

Sistema híbrido óptimo para el suministro de energía a una desaladora de 50 m³/día de capacidad.

La figura 3 muestra los resultados optimizados de las posibles variantes propuestas por el software HOMER para el suministro de energía de una desaladora con una capacidad de producción de agua de 50 m³/día y un consumo eléctrico igual a 250 kWh/día (se asume un gasto de 5.0 kWh/m³ de agua producida).

Desalación system (kWh/d)		Wind Speed (m/s)									
PV (kW)	WES18	GEN (kW)	L16P	Conv. (kW)	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	GEN (hrs)			
310	1	3	120	15	0.149	0.99	246	299			
350	1		120	20	0.152	1.00					
500			140	20	0.210	1.00					
500		1	140	20	0.211	1.00	6	22			

Figura 3. Optimización obtenida en HOMER para un consumo eléctrico de 250 kWh/día.

Se obtiene que el sistema híbrido óptimo desde lo técnico-económico, para estas condiciones sería el compuesto por: un sistema fotovoltaico de 310 kW, un aerogenerador de 83 kW de potencia nominal, un banco de 120 baterías (L16P), un convertidor (Conv.) de 15 kW y un generador (GEN) de 3 kW, el cual trabaja alrededor de 299 horas al año y tendría un gasto de 246 litros de combustible. El costo de la energía útil producida por el sistema (COE) sería de 0.149 USD/kWh. Para el cálculo se asume un precio del combustible igual a 0.8 USD/L. La figura 4 representa la configuración del sistema óptimo mencionado.

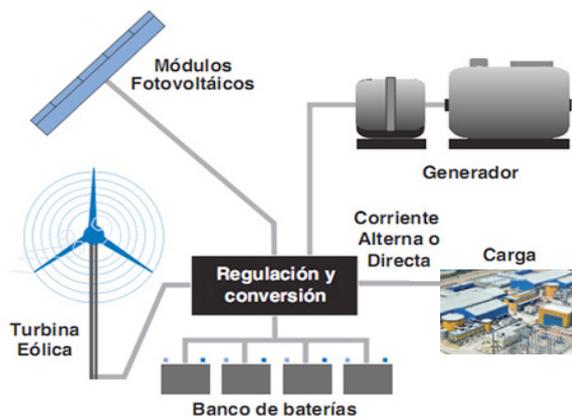


Figura 4. Configuración del sistema óptimo para el suministro de energía a la desaladora.

Otra opción que proporciona HOMER y a tener en consideración, dado que el incremento del costo de la energía producida es de tan solo 0.003 USD/ kWh, está formado por un sistema fotovoltaico y eólico, con ausencia del generador diesel.

Como se ha dicho anteriormente los dos factores de vital importancia en el proceso de desalación son los sistemas de presión y las membranas, no hay que olvidar que los recursos energéticos renovables (viento y sol) pueden ser impredecibles, por lo que utilizar un sistema que no disponga de un generador diésel puede no suministrar la energía necesaria, para mantener las presiones constantes en las membranas durante el proceso de desalación, lo que podría ocasionar cuantiosos daños en las mismas.

Para el empleo únicamente de sistemas fotovoltaicos, aislados de otras fuentes de energía renovable, sería necesario incrementar en un 38 % los kW instalados y el costo de la energía producida se vería incrementada en 0.062 USD./kWh, con respecto a la opción más económica.

En el caso del sistema eólico, solamente se empleó en la modelación un modelo de aerogenerador. Después de

realizar varias pruebas, de analizar las velocidades de viento obtenidas con la función probabilística de Weibull en la localización, y de estudiar diversas curvas de potencia, se decidió no modelar aerogeneradores de mayor potencia nominal, debido a que sus velocidades de arranque se situaban próximas a las obtenidas, por lo que la producción de los mismos sería mínima. Por otra parte, los costes de adquisición, implantación y mantenimiento del modelo seleccionado, son de los más económicos de todos los disponibles en la base de datos del software, lo que permite que el costo de la energía producida sea asequible para el proceso de desalación. Se tuvo en cuenta que si el costo de la energía se incrementa, por la utilización de sistemas relativamente caros que impliquen periodos de amortización largos, o con un costo de mantenimiento elevado, todo esto repercutirá en el precio de venta del m³ del agua desalada, corriéndose el riesgo de que no sea económicamente viable para la agricultura y el consumo.

La optimización realizada por HOMER, se evidencia que tanto los sistemas fotovoltaicos como la utilización de baterías, constituyen elementos fundamentales para las cuatro alternativas propuestas.

Uno de los datos relevantes tomados de las simulaciones es la fracción renovable, que comprende la relación entre la energía producida por fuentes de energía renovables, frente a la energía total producida por el sistema. Este factor es representativo de la reducción del uso de diesel.

El sistema híbrido óptimo, técnico-económico, propuesto por HOMER presenta una fracción renovable de 0.99, es decir, el 99 % de la energía del sistema son producida por energías renovables. Aumentar la fracción del sistema en energía renovable, produce inicialmente un incremento en el precio de generación de la energía eléctrica. Cuanta más fracción de energía renovable tenga el sistema, mayor es la inversión inicial, y mayor es el costo de la energía generada.

Sistemas híbridos óptimos para desaladoras de diferentes capacidades de producción

Existen variables que pueden influir de forma decisiva a la hora de seleccionar un sistema híbrido para una región determinada. Estas variables pueden tener una naturaleza económica o energética.

La figura 5 muestra los resultados optimizados de las distintas variantes propuestas por el software HOMER en función de la demanda energética y las velocidades medias de viento. La carga eléctrica horaria para esta modelación varía entre 100 kWh/día para una producción de agua de 20 m³/día hasta 250 kWh/día para una producción de 50 m³/día. Las velocidades medias de viento

evaluadas se encuentran entre 2.0 y 6.0 m/s.

Los sistemas híbridos propuestos por HOMER considerando las diferentes variantes de carga eléctrica, velocidades de viento e irradiación solar son: 1. Los sistemas formados por paneles fotovoltaicos y baterías (color naranja), óptimos para velocidades de vientos situadas entre los 2 y 3 m/s, con cargas eléctricas situadas entre los 100 y 250 kWh/día. 2. El color azul indica los sistemas formados por aerogenerador, paneles fotovoltaicos y baterías, sugeridos para cargas eléctricas que no excedan los 210 kWh/día y velocidades de viento comprendidas entre 3.1 y 5 m/s. 3. El sistema híbrido integrado por aerogenerador, paneles fotovoltaicos, generador diésel y baterías (color verde), es la opción para todos los sistemas con cargas eléctricas mayores de 150 kWh/día y velocidades medias de viento entre 3 y 3.5 m/s y superiores a los 5.1 m/s.

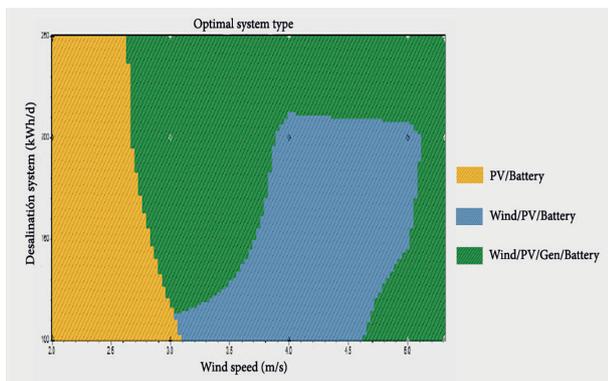


Figura 5. Sistemas híbridos optimizados por HOMER, en fusión de la carga eléctrica y las velocidades medias de viento.

CONCLUSIONES

El sistema híbrido óptimo, desde lo técnico-económico para el abasto de energía a una desaladora con capacidad de 50 m³/día y un consumo eléctrico igual a 250 kWh/día, bajo las condiciones de radiación y velocidades de viento analizadas, es un sistema eólico-fotovoltaico-diésel compuesto por: un aerogenerador, de 83 kW, un sistema fotovoltaico de 310 kW, un banco de 120 baterías, un generador diésel de 3 kW y un convertidor de 15 kW.

Para plantas de ósmosis inversa de baja producción, en zonas de bajas velocidades de viento, el mejor sistema renovable de suministro de energía es el formado por paneles fotovoltaicos y baterías.

El sistema híbrido con una mayor capacidad de respuesta a las demandas energéticas de las plantas desaladoras es el formado por: aerogeneradores, paneles fotovoltaicos y baterías, recomendado para cargas eléctricas de entre 100-200 kWh/día y velocidades medias de viento entre los 3.8 y 4.6 m/s.

Los sistemas híbridos formados por aerogenerador, paneles fotovoltaicos, generador diésel y baterías, son los óptimos para el suministro de energía de plantas desaladoras cuando las velocidades de vientos se sitúan entre 3 y 3.7 m/s, y por encima de los 5.1 m/s.

LITERATURA CITADA

- Cipollina, A. 2009. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes, 2ª ed. Green Energy and Technolog. Springer-Verlag, Berlin.
- Givler, T y Lilienthal P. 2005. Micropower Optimization Model, to Explore the Role of Gen-sets in Small Solar Power Systems. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report. Colorado.
- Herbert, J. 2008. Desalination based on RO. GE Infrastructure, Wafer & Process Technologies, Enviro 2008 Conference, Melbourne, Australia.
- Meteored. 2013. Clima en La Isla de San Cristobal. Disponible en: <http://clima.meteored.com> (consultado el 6 de junio 2014). Alpred, S.L. España.
- Nasa. 2013. Surface Meteorology and Solar Energy. Disponible en: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?+s01#s01> (consultado el 20 de junio 2014). The Atmospheric Science Data Center (ASDC). Langley.

- Papadakis G. y Mohamed Sh. E. 2007. Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics, *Desalination*, 174(1):87-97.
- Sánchez, M. 2007. El consumo de energía en la desalación de agua de mar por ósmosis inversa. *Revista Ingeniería Civil*, 148: 113-121.
- Semiat, R. 2010. Desalination: Present and Future. International Water Resources Association. *Revista Water International*, 25(1):54-65.
- Stoltenberg, B. and Ley, D. 2010. Galápagos Distributed Generation Project. Final Report for CVEN 4830, University of Colorado-Boulder.
- Ucar, A. y Balo, F. 2008. Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. *Journal Applied Energy*. 86(10): 1864–1872.
- Wiley, J. 2013. *Advances in water desalination*. 1ª ed. Noam Lior, Portland.