

## CONSTRUCCION DE UNA PLANTA PILOTO DE DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR MEDIANTE UN PROCESO DE HUMIDIFICACIÓN-DESHUMIDIFICACIÓN

BRUNINI ADRIÁN<sup>1,2</sup>; PANDOLFI, DANIEL R<sup>1</sup>; RODRÍGUEZ, ROBERTO G.<sup>1</sup>;  
CHOCALA, MARÍA DE LOS ANGELES <sup>1</sup>; GOUPILLAUT, CARLOS A. <sup>1</sup>; CABALLERO,  
ANDREA<sup>1</sup>; GUTIERREZ, HÉCTOR R. <sup>1</sup> Y VALDEZ, JORGE C.<sup>1</sup>

1: Unidad Académica Caleta Olivia.  
Universidad Nacional de la Patagonia Austral.  
E-mail: abrunini@yahoo.com.ar  
2: C.O.N.I.C.E.T.

**Resumen.** *En el presente trabajo se muestra el diseño de los diversos componentes de una planta de desalinización de agua de mar, de tipo Humidificación/Deshumidificación, con capacidad de producir 0.1-0.5 m<sup>3</sup>/h de agua dulce. La misma se está construyendo en el marco de un proyecto financiado por la Universidad Nacional de la Patagonia Austral cuyo objetivo específico es realizar un aporte a la solución de la problemática del suministro de agua potable en la ciudad de Caleta Olivia. El equipo que se está construyendo es también apto para el reciclado de aguas grises, eliminación de otro tipo de sales que puedan estar presentes en acuíferos, etc.*

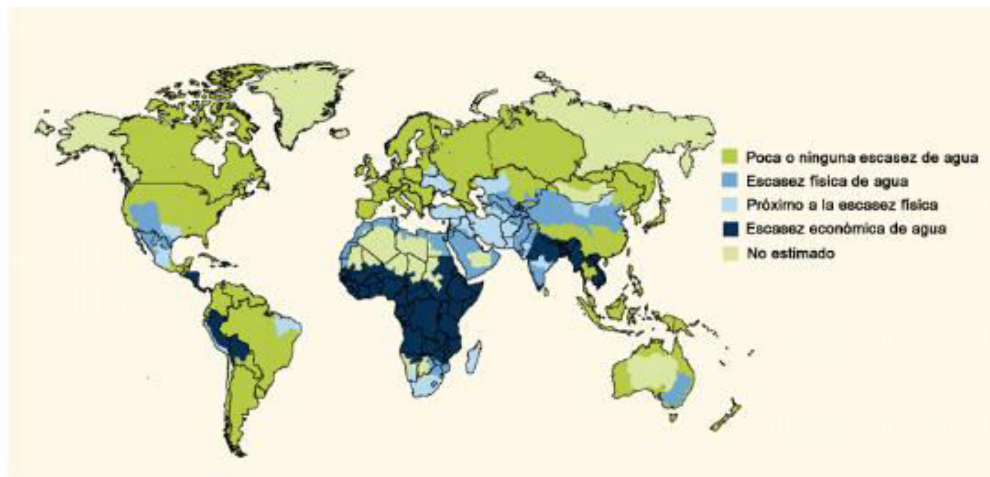
*El prototipo implementa un sistema de adquisición de datos y control de operación de tipo SCADA, flexible e interoperable, basado en la integración de los protocolos de procesos MAS y Arduino. Desarrollaremos un simulador numérico que, incorporando parámetros de diseño y datos experimentales, permitirá analizar su funcionamiento y proponer posibles mejoras que aumenten la eficiencia de la planta. Se espera que con esta herramienta se pueda realizar el diseño de una planta de producción de agua dulce a escala industrial, de acuerdo a las necesidades locales.*

**Palabras clave:** Desalinización, Recursos marinos, Agua potable.

### 1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento de vital importancia para la vida cotidiana y para el desarrollo de la mayor parte de las actividades relacionadas a la producción industrial, agrícola y ganadera. Es, sin lugar a dudas, uno de los factores clave para dar impulso al desarrollo sustentable de cualquier región del planeta.

El 2.5% del agua que existe en la Tierra es agua dulce [1], y el ser humano tiene acceso a sólo el 0.36% de ella [2]. Este sin embargo es un valor promedio, de modo que existen regiones donde el acceso al agua potable es severamente limitado. La industrialización acelerada, la deforestación, la utilización indiscriminada de agroquímicos, la minería a cielo abierto sin rigurosos controles estatales, etc. han contribuido a que muchas fuentes de agua potable se encuentren contaminadas.



**Figura 1:** Mapa mundial que muestra las dificultades de acceso al agua potable (Fuente: <http://www.hidrojing.com/>)

La Patagonia Argentina no está exenta de algunos de estos problemas. La mayor parte de su región costera, y en particular, la zona norte de la provincia de Santa Cruz, ostenta un serio problema de provisión de agua potable. En la ciudad de Caleta Olivia y sus zonas de influencia, la mayor parte del suministro se realiza a través de un acueducto que se nutre en el lago Musters, ubicado en la provincia de Chubut. Este también abastece, entre otras, a la ciudad de Colonia Sarmiento, y Comodoro Rivadavia, una de las más pobladas de la Patagonia. Los problemas que ocasionan de por sí las fallas estructurales en dicho acueducto se ven agudizados por la presión a la que el mismo está sujeto, la cual se origina en la diferencia de altitud entre el lago Musters y la costa atlántica, donde se asientan Comodoro Rivadavia y Caleta Olivia. Cualquier tarea de reparación estructural requiere el drenado completo del acueducto, con el consiguiente corte de servicio por varios días. Parte del agua para consumo humano en las localidades de la zona proviene de los acuíferos de Cañadón Quintas y Meseta Espinosa, que ya están al límite de extracción.

Sumado a estos problemas, debemos mencionar que, en los últimos años, la población en la zona del Golfo San Jorge ha experimentado un sostenido crecimiento, impulsado por la actividad petrolera regional, que es una de las más intensas de la Argentina. Las proyecciones en el consumo de agua potable indican que en un futuro no muy lejano, el lago Musters ya no podrá abastecer a las ciudades costeras del sur de la Patagonia. En el verano de 2017, los niveles del lago fueron alarmantemente bajos, lo cual preanuncia problemas serios de suministro a futuro.

El agua de mar en la costa patagónica posee en promedio unos 30000 mg/l de sales disueltas (agua con mayores concentraciones de sal que 50000 mg/l se la denomina “salmuera”). La Organización Mundial de la Salud recomienda una salinidad menor a 1000 mg/l para agua de consumo humano o para utilizar en irrigación agrícola. Los procesos industriales requieren de agua con mucho menor contenido de sales disueltas (menor a 10 mg/l). Por lo tanto, previo a su consumo, se requiere someter al agua de mar a algún proceso tendiente a disminuir la cantidad de sales disueltas. El proceso por el cual se realiza la separación de las sales disueltas

en el agua salobre o bien agua de mar, para obtener de este modo agua adecuada para el consumo humano o para uso industrial o agrícola se denomina desalinización.

La Asociación Internacional de Desalinización, en su informe de junio 2015, menciona que existen alrededor del mundo plantas de desalinización que producen unos 86.8 millones de metros cúbicos diarios de agua dulce para abastecer a unos 300 millones de personas [3]. En países como Kuwait, por ejemplo, el abastecimiento de agua potable a su población proviene 100% de plantas de desalinización de agua de mar. En actividades industriales donde se requiere agua de alta calidad, como en la industria farmacéutica, la fabricación de semi conductores, o los discos duros de PC, es cada vez más frecuente el uso de plantas desalinizadoras.

## **2. UNA BREVE RESEÑA DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA LA DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR**

La desalinización de agua de mar para producir agua potable es un problema de larga data. Ya Aristóteles escribió acerca de la destilación de agua marina como medio para obtener agua dulce. Abu al-Mansur al Muwaffak, un científico árabe, produjo en el siglo X un escrito sobre la destilación de agua de mar para producir agua potable, mientras que la primera patente de un proceso de destilación para este fin fue publicada en el siglo XVII. Con el correr de los años se han ido introduciendo diversos procesos para la obtención de agua potable, para llegar hoy día a tener una multiplicidad de opciones tecnológicas a la hora de pensar en el desarrollo de una planta de desalinización de agua de mar. Cada una de ellas presenta ventajas y desventajas comparativas, en relación al volumen de agua dulce producida, el consumo de energía requerido para producirlo, su impacto ambiental, el costo de mantenimiento, etc.

Los sistemas desarrollados hasta la actualidad para la desalinización de agua salobre o de mar se pueden clasificar en dos tipos básicos: los que se basan en un proceso térmico, ya sea utilizando combustibles fósiles o energía solar para calentar el agua salada, y aquellos que utilizan membranas y alta presión para realizar un proceso de “filtrado” de las sales disueltas. El otro método usualmente aplicado es la desmineralización por resinas de intercambio iónico, pero esta involucra el uso de sustancias ácidas y alcalinas que afectan peligrosamente al medio ambiente.

La energía que cada uno de estos procesos requiere puede ser eléctrica, térmica o “limpia”. La forma usual de cuantificar la eficiencia de una planta de desalinización es a través de la relación entre la cantidad de combustible consumido para producir una dada cantidad de agua dulce. Se denomina GOR (por su sigla en inglés: *Gained Output Ratio*) a la medida de cuanta energía térmica se consume en un proceso de desalinización. Dependiendo de la tecnología aplicada y la implementación particular de ella, los valores típicos oscilan entre 1 a 10 kg/kg. Sin embargo, en lugares donde la energía es barata, se suele aceptar una planta con menor GOR. La inversa es aplicable también en regiones donde la energía es cara o poco accesible.

Una alternativa más conceptual para definir la eficiencia del proceso es la Tasa de Eficiencia (ER por *Efficiency Ratio* o *Economy Ratio*). Fue definida en Gran Bretaña como la cantidad de libras de agua dulce producida por cada 1000 BTU de calor consumido. En unidades internacionales es equivalente a cuántos kg de agua dulce se producen por cada 2326 kJ de

calor consumido.

A continuación realizaremos una breve descripción de los procesos más utilizados en desalinización, para detenernos luego en la tecnología de Humidificación / Deshumidificación que es la presentada en este trabajo.

## 2.1 Sistemas de filtrado por membranas

Se utilizan membranas o bien para la separación de fases líquido / vapor o de las moléculas e iones.

En el primer caso, se produce la evaporación del agua salada en las membranas debido a la diferencia de presión de vapor a cada lado de las mismas. En el segundo caso, el proceso de desalinización se produce por difusión. Las moléculas o iones que son más pequeños que los poros de las membranas son los únicos que pueden pasar a través de ellas.

De estos procesos, el más utilizado es el de Ósmosis Inversa, donde membranas de poliamida enrolladas en espiral actúan como un nano filtro, permitiendo el paso de las moléculas de agua y dejando atrás a los iones de sal. Este sistema requiere alta presión para que el proceso de ósmosis inversa funcione (unos 70 bar). La misma es generada por bombas eléctricas de alta potencia. Si bien dentro de una planta de Ósmosis inversa sólo se consume energía eléctrica, se debe tener en cuenta que esta no es una energía de origen primario. Siendo un vector energético, hay que considerar que por cada KW consumido, se necesitaron dos más en la central térmica que se perdieron en forma de calor. Este número se debe tener en cuenta a la hora de hacer el cálculo del ER correspondiente. En esta tecnología se requiere un riguroso pre tratamiento del agua de mar, pues las membranas son muy sensibles tanto a las impurezas inorgánicas como orgánicas (bacterias, algas, etc). Requiere un permanente retrolavado de las mismas, y su costo de mantenimiento es relativamente elevado.

La mayor parte de las plantas actualmente en funcionamiento en el mundo se basan en esta tecnología. En la actualidad hay una planta funcionando en Puerto Deseado que produce unos 3000 m<sup>3</sup> de agua dulce por día, y se está montando una planta de estas características en la localidad de Caleta Olivia. La misma, una vez finalizada, suministraría unos 12.000 metros cúbicos por día de agua potable, o 150 litros por día por persona para una población proyectada de 80.000 habitantes. El costo del proyecto asciende a u\$s 35 millones. La Ósmosis Inversa es una tecnología probada y muy confiable, pero es de alto costo inicial y su mantenimiento es delicado [4]

## 2.2 Sistemas térmicos

En los procesos de destilación el agua de mar se calienta hasta evaporarla. Posteriormente el vapor se condensa formando agua dulce, mientras que el agua sobrante se desecha como salmuera concentrada.

Este mecanismo necesita calor para provocar el cambio de estado líquido/vapor, que prácticamente es independiente de la salinidad que tenga el agua. La desalinización por destilación directa demanda un alto consumo de energía. Se estima que aproximadamente por cada metro cúbico de agua dulce producida se requieren unos 30 litros de combustible [5] [6] [7]. Por este motivo, está ganando en popularidad la utilización de energía solar para este

propósito. Los sistemas térmicos se pueden clasificar en

- **Condensadores solares:** Una tecnología muy simple es la denominada “condensador solar”, que utiliza la energía solar para evaporar agua. Un techo vidriado cubre un recipiente de agua salada, cuya base se pinta de color negro, para aumentar el intercambio de calor. El agua se volatiliza por la influencia de la radiación solar. El vapor se condensa en la parte inferior del techo, que es enfriado por el aire fresco del ambiente. El agua condensada se recolecta por escurrimiento. Estas instalaciones se utilizan para aplicaciones a pequeña escala, siendo la producción diaria no mayor a 5 l por metro cuadrado. Tienen la ventaja de no necesitar ninguna fuente de energía adicional, son económicos y de muy bajo mantenimiento.
- **Destilación por Compresión Mecánica de Vapor:** Los sistemas de Compresión Mecánica de Vapor funcionan comprimiendo vapor de agua, lo que causa condensación sobre una superficie de transferencia de calor (un tubo). Esto permite al calor de la condensación ser transferido al agua salada del otro lado de la superficie, resultando en la vaporización de esta. El compresor es el requerimiento de energía principal, este aumenta la presión en el lado del vapor y baja la presión del lado del agua salada, para bajar su temperatura de ebullición. Es un proceso muy robusto y confiable, pero a grandes tasas de compresión, se deben utilizar compresores axiales, que resultan extremadamente costosos. Estos sistemas requieren grandes superficies de transferencia de calor para lograr bajo consumo de potencia.
- **Destilación Flash Multietapa:** En este proceso el agua de mar es calentada en un tanque por medio de un serpentín o tubos en paralelo que contienen algún fluido caliente. Posteriormente se pasa a otro tanque, donde la presión reducida permite que el agua hierva. El agua vaporizada es enfriada y condensada para obtener el producto. El calor latente liberado en la condensación del vapor es utilizado para calentar la salmuera en otra etapa y el producto destilado se colecta en cascada en cada uno de los tanques colocados en paralelo con la salmuera y se bombea a un tanque de almacenamiento. La tasa de producción depende de la temperatura del agua salada y del número de etapas que se lleven a cabo.  
Las plantas de desalinización con esta tecnología son extremadamente robustas y admiten largos períodos entre limpiezas. Son capaces de tratar aguas con alto contenido de sales. No obstante, este tipo de instalaciones son bastante costosas, necesitando grandes superficies de transferencia de calor. Además, el consumo de energía eléctrica es alto.
- **Destilación Multiefecto (MED):** Una instalación MED consta de varias etapas de evaporación en cámaras de vacío. Las plantas MED se configuran en base a tubos (verticales u horizontales), donde el vapor se condensa en un lado y ocasiona la evaporación de agua salada en el otro lado. El agua salina al evaporarse es distribuida sobre la superficie exterior de tubos calentados. Dentro de cada efecto MED, se rocía agua marina fresca sobre un grupo de tubos de intercambio térmico mientras el vapor que fluye a través de los tubos se condensa volviéndose agua pura. Fuera de los tubos, la delgada película de agua marina hierve a medida que absorbe el calor del vapor. El

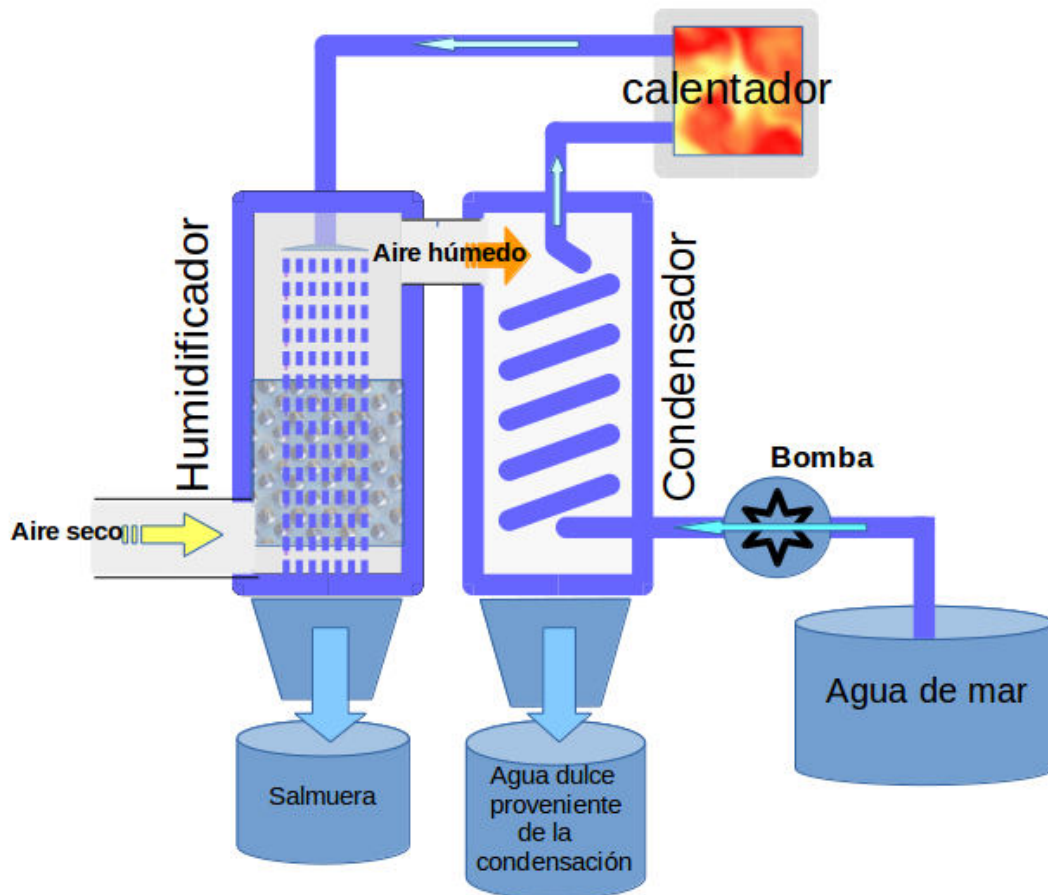
vapor resultante pasa a través de eliminadores de rocío para atrapar gotas de salmuera remanentes antes de que el vapor se introduzca en los tubos para el próximo efecto. Este tipo de instalaciones cubren grandes superficies.

### **3. UN SISTEMA BASADO EN LA HUMIDIFICACIÓN Y DESHUMIDIFICACIÓN DEL AIRE**

El equipo que se está construyendo se basa en el ciclo natural del agua [9] [10] y consta, básicamente, de tres secciones:

- Un humidificador de aire.
- Un condensador de la humedad que este aire húmedo acarrea.
- Un equipo de calentamiento del agua de mar.

Esquemáticamente se lo puede ver en la figura 2. Sobre una torre de humidificación se distribuye desde la parte superior agua salada a una temperatura de 85 °C – 95 °C. Parte del agua se evapora a medida que fluye hacia abajo y se va enfriando. Al mismo tiempo, cierta cantidad de aire seco fluye en contra corriente, ya sea por convección natural o forzado, ganando humedad relativa a medida que se pone en contacto con el agua. El aire se humedece a medida que se calienta en su curso ascendente. La cantidad de humedad que es capaz de absorber aumenta notablemente con la temperatura. En el condensador fluye agua de mar fría, intercambiando calor con el aire húmedo y caliente que sale del humidificador. La humedad contenida en el aire se condensa a medida que este se enfría en el condensador y se escurre hacia el fondo, donde es recolectada como agua dulce.



**Figura 2:** Modelo esquemático de una planta de desalinización por Humidificación/Deshumidificación con sus diversas componentes.

El agua de mar que se utiliza para enfriar el aire sale del condensador a una cierta temperatura, que es superior a la de entrada, pues intercambió calor con el aire húmedo. Su temperatura no llega a los 85-95 °C que necesita para ingresar al humidificador y por este motivo se debe recalentar con una fuente de calor externa, ya sea una caldera a base de combustible fósil, con energía solar en zonas tropicales, etc. El agua que sale por debajo del humidificador mantiene la misma cantidad absoluta de sales, pero perdió agua pura, por lo cual su salinidad ha aumentado. Esta salmuera es colectada en el fondo de la sección del humidificador y se vierte nuevamente al mar.

El equipo se está construyendo en la Unidad Académica Caleta Olivia de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral en el marco de un Proyecto de Desarrollo Tecnológico y Social (PDTs) financiado por la propia Universidad. Hasta el presente, se ha construido la sección de humidificación del aire y la está testeando en condiciones de laboratorio. Esta consta de una torre de humidificación de 40 cm de diámetro, construida en acero galvanizado, con empaque random conformado por anillos Pall de acero inoxidable de 3/4". La torre fue diseñada para que funcione por convección natural del aire. El calentador que se está

empleando es una pequeña caldera industrial del tipo utilizado para calefacción domiciliaria con radiadores. Las pruebas se están llevando a cabo con agua de red, ya que sus propiedades termodinámicas no difieren sustancialmente de las del agua de mar. Posteriormente, una vez concluidas las pruebas y completada la construcción de la planta piloto, se emplazará en la planta de desalinización por ósmosis inversa en Caleta Olivia, donde se la hará funcionar con agua de mar en las condiciones locales. Se ha diseñado un condensador de vapor de tipo coraza y tubos el cual se está construyendo. Los cálculos preliminares muestran que este es un dispositivo crítico para el buen funcionamiento de la planta.

En cuanto a los dispositivos de adquisición de datos y control, estos estarán operados por un sistema SCADA [8] (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) con el objeto facilitar la retro-alimentación en tiempo real del equipo a través de actuadores. El sistema propuesto propone las siguientes ventajas: 1) es simple de operar; 2) es flexible; 3) es interoperable; 4) es de bajo costo y fuente abierta. Todos los dispositivos de adquisición de datos (Anemómetros, caudalímetros, termómetros y sensores de consumo de gas y de energía eléctrica) serán operados con estos protocolos. Para ello se han desarrollado softwares específicos y se están montando las consolas apropiadas para acoplarlas a la planta. Ya se han realizado las primeras mediciones que permitieron obtener los parámetros de la torre de humidificación e información importante para el diseño del intercambiador de calor, que provea la mayor recuperación posible de energía junto con la condensación de la mayor cantidad de agua posible.

#### **4. CONCLUSIONES**

Esta tecnología posee varios aspectos interesantes. Los más importantes son:

- Las plantas de este tipo son de muy bajo o nulo mantenimiento ya que no poseen partes móviles.
- El agua de entrada no necesita complejos pretatamientos o filtrados. Basta un filtrado grueso a base de gravas.
- Su vida útil es prolongada.
- Si bien el GOR de estas plantas no es elevado, el costo energético puede disminuirse utilizando energías limpias para ayudar en el calentamiento del agua de mar (si es que el proceso de calentamiento no se puede realizar 100% en base a ellas).

El escalado a grandes niveles de producción representa a priori un desafío de diseño. Sin embargo, si bien el costo de una instalación de este tipo puede crecer notablemente con la escala de producción, las ventajas comparativas descritas más arriba, hacen de esta una tecnología muy atractiva. Desde el punto de vista de la ductilidad, debemos decir que sería viable y económico construir plantas de bajo porte, para proveer agua dulce a pequeñas comunidades a partir del reciclado de agua domiciliaria. Este dispositivo también podría servir como medio para descontaminar aguas con altos contenidos de arsénico.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la UNPA por el apoyo brindado para la realización de este proyecto. Un especial agradecimiento a la Lic. Mabel Herrera por brindarnos un espacio en la Planta de



Hidrógeno de Pico Truncado para realizar las pruebas del equipo. Agradecemos al personal del API Caleta Olivia por su desinteresada colaboración.

## REFERENCIAS

- [1] Qiblawey, H. M., & Banat, F. Solar thermal desalination technologies, *Desalination*, Vol 220, 633–644. 2011.
- [2] Ali MT, Fath HES, Armstrong PR. A comprehensive techno-economic review of Indirect solar desalination, *Renew Sustain Energy Rev* Vol 15: 4187–99. 2011.
- [3] Henthorne, Lisa (June 2012). "The Current State of Desalination". International Desalination Association. Publicado en septiembre de 2016.
- [4] Crittenden, J.; Trussell, Rhodes; Hand, David; Howe, Kerry and Tchobanoglous, George, "*Water Treatment Principles and Design*". John Wiley and Sons. New Jersey.
- [5] Seifert, B.; A. Kroiss, M. Spinnler, T. Sattelmayer, "About the history of Humidification-dehumidification desalination systems", <https://www.researchgate.net/publication/258217631>
- [6] Kalogirou, S. "Economic Analysis of a Solar Assisted Desalination System," *Renewable Energy*, Vol. 12, No. 4, 351-367. 1997.
- [7] Nawayseh, N.; M. Farid, S. Al-Hallaj and A. R. Al-Timimi, "Solar Desalinate Heat Based on Humidification Process-I and Mass Transfer Coefficients," *Energy Conversion and Management*, Vol. 40, No. 13, 1423-1439. 1999.
- [8] McCrady, S. G.; "Designing SCADA Application Software: A Practical Approach", Elsevier. 2013.
- [9] Narayan, G.P.; Sharqawy, M. H.; Zubair S. M.; "Thermodynamic analysis of humidification dehumidification desalination cycles", *Desalin Water Treat* Vol 16, 339–353. 2010.
- [10] Kabeel, A. E.; Hamed, M. H.; Omara, Z. M.; Sharshir, S.W. "Water desalination using a humidification-dehumidification technique - A detailed review". *Nat Resour* Vol 4. 286–305. 2013.