

Discusión sobre el modelado de la destilación solar: experimentos y teoría

Discussion on solar still modeling: experimental and theoretical approaches

*Juan Cristóbal Torchia-Núñez¹
Jaime Cervantes-de-Gortari²*

Fecha de recepción: 9 de abril del 2013

Fecha de aprobación: 26 de junio del 2013

Torchia J; Cervantes, J. Discusión sobre el modelado de la destilación solar: experimentos y teoría. *Tecnología en Marcha*. Vol. 26, N° 4. Pág 100-108

- 1 Consultor independiente. Argentina. Correo electrónico: juantorchia@gmail.com.
- 2 Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México. México. Correo electrónico: jgonzalo@servidor.unam.mx.

Palabras clave

Destilación solar; visualización; experimentos; métodos analíticos; patrones de flujo; discusión.

Resumen

En este trabajo se presenta una discusión sobre la metodología para el estudio teórico y experimental en la destilación solar; haciendo un breve recuento de los trabajos más significativos en este campo desde el punto de vista analítico y experimental. A partir de la discusión, se proponen los siguientes retos para promover el avance en el análisis de estos dispositivos: visualización de los patrones de flujo, medición de la velocidad y concentración con técnicas ópticas, métodos de optimización y teoría constructal, entre otros. El estudio refleja que la tendencia en el desarrollo de la destilación solar ha sido la metodología experimental de diversos diseños de destiladores para encontrar correlaciones y poder predecir coeficientes de transferencia de calor, tasa de producción de destilado y eficiencias; mientras que otros métodos analíticos y experimentales novedosos no se han utilizado hasta la fecha, dejando aspectos de la destilación solar pendientes de exploración.

Key words

Solar distillation; visualization; experimentation; theoretical methods; flow patterns; modeling.

Abstract

In this paper it is presented a discussion about the methodology for the theoretical and experimental study of solar distillation after a brief review of the most representative studies in the field from theoretical, numerical and experimental approaches. From this discussion, the following challenges are proposed in order to promote the advance in the analysis of solar stills: flow pattern visualization, velocity and concentration field measurement using optical techniques, optimization methods, and constructal theory, among others. This study shows that the tendency of solar still development has been the experimental approach to find correlations to predict heat transfer coefficients, distillate yield rate and efficiencies, whereas other theoretical and experimental methods have not been used up to this date, leaving interesting features of solar distillation unexplored.

Introducción

Existe una problemática a nivel global sobre el aprovechamiento del recurso hidrológico para la subsistencia y las actividades humanas. Según el Programa de Aguas de las Naciones Unidas (UNESCO World Water Assessment Programme), casi 800 millones de personas alrededor del mundo no tienen acceso a agua potable y cerca de 3.000 millones no cuentan con servicios de sanitación básicos, resultado directo de la problemática del agua (UNESCO, 2012).

En este sentido, una de las alternativas tecnológicas que pueden mitigar la carencia de agua son los destiladores solares. Los destiladores solares son dispositivos que aprovechan la energía térmica del sol para producir agua potable a partir de un cuerpo de agua cuyas condiciones físicas, químicas o biológicas son inadecuadas para su consumo. Existe una gran variedad de tipos y diseños de destiladores solares,

sin embargo, todos poseen el mismo funcionamiento básico (Cipollina et al., 2009). Un esquema del destilador solar de batea simple se presenta en la figura 1.

El proceso que realiza un destilador solar es el siguiente:

- El destilador es una especie de caja cubierta con un vidrio transparente que se llena parcialmente con salmuera (o cualquier otra agua impotable) en el fondo del depósito, que es una superficie negra utilizada para absorber la radiación solar que atraviesa la cubierta de vidrio y el mismo cuerpo de agua;
- El colector aumenta su temperatura y transfiere calor a la salmuera;
- Ocurre evaporación en la superficie de la salmuera;

- d. Un flujo de convección natural de aire húmedo se produce dentro del destilador; debido a la diferencia de temperaturas entre la superficie de la salmuera caliente y la cubierta de vidrio más fría;
- e. La cubierta de vidrio inclinada condensa el vapor en agua destilada líquida y la conduce por gravedad hacia un pequeño canal recolector en la pared lateral menos alta del arreglo.

Los destiladores solares frecuentemente se utilizan en regiones áridas para abastecer de agua potable a comunidades apartadas, donde las instalaciones de agua potable no existen o son inadecuadas, generalmente cercanas a la costa. Existe una gran cantidad de experiencias en el uso de esta tecnología en varios países, las cuales han llegado a la literatura especializada. Históricamente, la destilación solar es una tecnología probada desde 1872, cuando en Las Salinas, una región al norte de Chile, el ingeniero sueco Charles Wilson diseñó y construyó destiladores solares para abastecer de agua potable a esa comunidad minera. Un gran recuento histórico de esta experiencia puede leerse en Arellano (2011), quien ofrece un panorama histórico-social de Wilson, la planta de desalación solar y de quienes escribieron sobre ella subsecuentemente. Por su parte, Delyannis y Piperoglou (1968) hacen un estudio sobre la planta de desalación solar ubicada en la isla griega de Patmos. Foster et al. (2005) estudiaron diez años de historia del uso de destiladores solares en la frontera entre Estados Unidos y México. Los

autores detallan los aspectos económicos de los destiladores, así como las características de operación de los dispositivos y la calidad del agua como resultado de la destilación.

Los destiladores pueden construirse con materiales accesibles comercialmente y de bajo costo e impacto ambiental. No tienen partes móviles, por lo que los costos de operación y mantenimiento no suelen ser altos, sin embargo, económicamente los destiladores resultan costeados hasta los 200 m³ de agua destilada por día (Malik et al., 1982). Más allá de esta capacidad, otras técnicas de destilación como la ósmosis inversa o mediante tanques "flash" son más viables desde el punto de vista económico.

Con relación al modelado matemático en la destilación solar, la enorme mayoría de los trabajos se basa en el análisis realizado por Dunkle (1961), cuya virtud es la simplificación de los coeficientes de transferencia de calor de cada uno de los modos que ocurren en el destilador; de manera que puede calcularse con facilidad la tasa de producción de destilado, entre otros parámetros relevantes. Dunkle (1961) llega a un balance de energía para la cubierta del vidrio cuya incógnita es la temperatura de este. A partir de ciertas suposiciones, encuentra el porcentaje de los modos de transferencia de calor dentro del colector: convección, evaporación, radiación y conducción, así como su eficiencia. Es importante mencionar que el análisis de Dunkle está hecho para un régimen permanente.

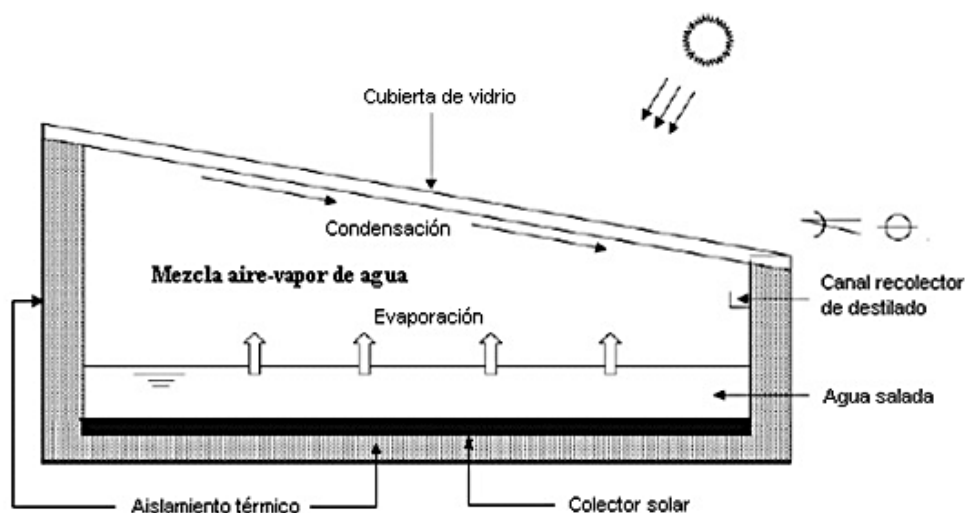


Figura 1. Esquema de un destilador solar de batea simple.

A grandes rasgos, el modelado matemático en los destiladores solares consiste en establecer balances de energía para cada uno de los componentes del destilador; típicamente el colector, la masa de agua y la cubierta de vidrio. Los balances de energía son ecuaciones diferenciales con respecto al tiempo, donde las incógnitas son las temperaturas del colector, la masa del agua y la cubierta de vidrio. El modelo de Dunkle (1961) permite, bajo ciertas aproximaciones, considerar los coeficientes convectivos de transferencia de calor independientes de la temperatura, lo cual hace que las ecuaciones diferenciales sean lineales y de parámetros concentrados. La mayoría de los estudios se ha concentrado en encontrar correlaciones empíricas para determinadas configuraciones geométricas y distintos tipos de diseño de destiladores (batea simple, doble, de multiefecto, de operación pasiva o activa, etc.).

Las correlaciones empíricas establecen la relación funcional entre el número de Nusselt y el número de Grashof para la convección natural. A partir de ahí, se pueden encontrar fácilmente los coeficientes de transferencia de calor, los cuales son necesarios para el cálculo de los flujos de calor en cada uno de sus modos en el destilador solar.

Discusión

Los tres tipos de metodología utilizados en la ciencia para estudiar fenómenos físicos y en la ingeniería para el estudio de equipos o dispositivos son típicamente: 1) el método experimental, 2) el método analítico y 3) el método numérico. En este estudio discutimos las metodologías analíticas y experimentales aplicadas al campo de la destilación solar. Siempre que sea posible se mencionan los estudios realizados en destiladores utilizando tales metodologías. El objetivo de la discusión es conocer las implicaciones tecnológicas y económicas de cada uno de los métodos en el estudio de los destiladores. Para información general y completa de los destiladores solares y sus técnicas de análisis, se recomienda Malik et al., (1982).

Métodos experimentales en destilación solar

El método experimental es el método utilizado por excelencia en la destilación solar. De hecho, a partir de la imitación del ciclo hidrológico de la naturaleza llevado a una escala geométrica mucho

menos es como nacen los primeros destiladores solares. El conocimiento empírico aventaja en gran medida a los demás métodos y los mayores avances en destilación solar se han logrado gracias a él. Los modelados matemáticos y numéricos aún no logran producir los mismos resultados en destilación solar como el método experimental. La razón reside principalmente en que el problema analítico es bastante complejo, como veremos más adelante, mientras que en el caso del problema numérico, este emplea vastos recursos computacionales. Por otra parte, cabe decir que en general los métodos experimentales son costosos y requieren de extremo cuidado y detalle para dejar de lado los efectos indeseables que no se quieran estudiar.

Visualización

En la mecánica de fluidos, la visualización ha resultado una herramienta históricamente fundamental. Desde los dibujos de Da Vinci sobre las ondulaciones producidas por la turbulencia en el agua (Levi, 2001) hasta las técnicas de la fotónica más sofisticadas, la inspección visual del campo de flujo es un procedimiento insustituible en la búsqueda de información sobre su comportamiento. Llama la atención la falta de información cualitativa de visualización en los destiladores solares, ya sea en la masa de agua como en la región que ocupa la mezcla aire-vapor entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio.

Hasta donde los autores conocen, los únicos trabajos de visualización del campo de flujo dentro de un destilador solar son los de Porta et al. (1998, 2004), como se observa en la figura 2.

Los autores diseñaron un ingenioso mecanismo para la oscilación de un espejo iluminado con un láser rojo. El interior del destilador se siembra con humo de tabaco para la visualización. Se puede percibir que el flujo convectivo produce vórtices en 3D, ya que ninguna de las dimensiones del destilador es demasiado grande o pequeña en comparación con las demás. La distancia entre la superficie de la salmuera y el interior de la cubierta de vidrio parece ser un parámetro influyente en la dimensión de los vórtices. La información que podría obtenerse de la visualización sería el efecto del ángulo en el flujo convectivo y en el patrón de las celdas convectivas dentro del destilador.

Cabe decir que la implementación de un método de visualización en un destilador no es un asunto

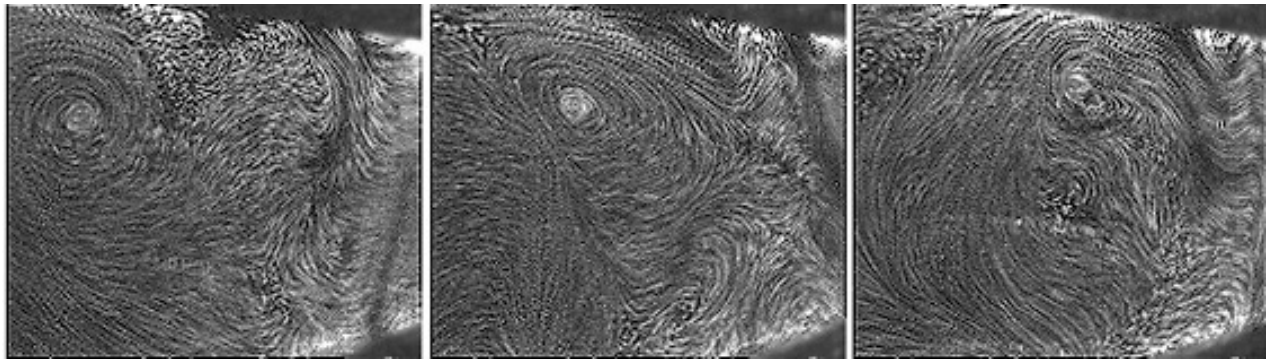


Figura 2. Visualización en un destilador con trazas de humo de acuerdo a Porta et al. (1998).

trivial. La visualización consiste en observar la distribución heterogénea de un medio de contraste dentro de la región de interés. La idea es sembrar este medio de contraste dentro del destilador; de manera que en la región de la mezcla aire-vapor se puedan observar las estructuras vorticales, sin embargo, la evaporación de la salmuera puede resultar un problema adicional para la visualización ya que modifica la transmisividad de la región, así como también podría afectar la naturaleza y vida útil de las partículas sembradas para la visualización.

Velocimetría de imagen de partículas (PIV)

La técnica de velocimetría mediante imagen de partículas (*Particle Image Velocimetry*, PIV, por sus siglas en inglés) consiste en registrar una secuencia de imágenes con una cámara fotográfica cuando la región de interés ha sido sembrada con partículas que reflejan la luz de una fuente intensa de luz, generalmente un láser. Con esa secuencia de imágenes es posible detectar el movimiento relativo de cada una de las partículas iluminadas a lo largo de la secuencia. Conociendo el tiempo que ha ocurrido entre ellas y la distancia recorrida, además de otras aproximaciones de carácter estadístico, se puede inferir la velocidad en cada punto de la región. Es una técnica que proporciona información bidimensional, pero existen arreglos estereoscópicos con dos cámaras en las que se puede obtener el otro componente del vector velocidad.

El advenimiento del progreso computacional ha logrado que esta técnica, creada en la década de 1980, se consolide como una de las más atractivas en la medición de flujos, debido al procesamiento digital de imágenes. A diferencia de la visualización,

esta técnica ofrece resultados cuantitativos del campo de flujo, por lo que podría extraerse un gran cúmulo de información sobre los patrones de flujo en la región de la mezcla aire-vapor bajo distintos regímenes de funcionamiento y cómo afectan la condensación en el interior de la cubierta de vidrio. Hasta donde llega el conocimiento de los autores, no se conocen estudios en destiladores solares utilizando esta técnica. Desafortunadamente, una de las grandes desventajas de esta técnica es el costo de los equipos necesarios para conseguir resultados confiables, como las cámaras de alta definición y rápida respuesta, los láseres pulsados y el software requerido para el manejo estadístico de las imágenes. Las referencias de Raffel et al. (2007) presentan los aspectos más importantes de esta técnica.

Fluorescencia inducida por láser (LIF)

En la técnica denominada Fluorescencia inducida por láser (*Laser Induced Fluorescence*, LIF, por sus siglas en inglés) se aprovecha la propiedad óptica de ciertas sustancias que cambian de color cuando son expuestas a cierto tipo de longitud de onda, llamada fluorescencia, para medir el campo de concentración en un flujo. El procedimiento consiste en agregar en la región de estudio una tinta (generalmente de naturaleza orgánica) que cambia de color con un estímulo luminoso como es la luz de un láser de cierta longitud de onda. El cambio de color se presenta después de un tiempo -que se conoce como el desplazamiento de Stokes- y se aprovecha para distinguir zonas de diferente concentración con base en la Ley Lambert-Beer de decaimiento de la intensidad luminosa. Existe también la posibilidad, siguiendo el mismo principio, de realizar mediciones de temperatura en una

región cuando se suministran dos tintes, uno que se utiliza como referencia y otro que es el que fluorescerá, al ser estimulado por el láser, con una intensidad que dependerá de la temperatura en ese punto (Smits y Lim, 2000).

Se trata de una técnica que puede ser de gran utilidad en destiladores solares, debido al proceso inherente de cambio de fase en su funcionamiento. El cambio de fase produce que el vapor ocupe una región donde únicamente hay aire dentro del destilador; precisamente un efecto que se podría medir con la técnica de fluorescencia inducida. Se podrían medir las zonas de mayor concentración de vapor en la región aire-vapor y a partir de esa información hacer diseños que favorecieran la producción de destilado. Nuevamente, se trata de una técnica que requiere equipos costosos cuya calibración exige un cuidado especial para la obtención de resultados confiables. Hasta el momento, los autores no conocen estudios de esta técnica experimental aplicada en destiladores solares. Para mayores referencias sobre esta técnica, se sugiere al lector ver Smits y Lim (2000) y Lemoine y Grisch (2013).

Termografía infrarroja

La termografía infrarroja consiste en detectar la radiación infrarroja de los cuerpos emisores con un sensor que traduce esa radiación en una señal eléctrica, interpretada y desplegada mediante una imagen bidimensional. En esa imagen, la diferencia de tonalidades de gris o de colores implica una diferencia de temperaturas en el cuerpo emisor registrado por el sensor. Las cámaras termográficas se utilizan en la industria militar o policíaca para la detección de personas, así como en el sector energético para la detección de fugas de calor.

Vollmer y Möllmann (2010) estudian las características y aplicaciones más importantes de la termografía infrarroja. Astarita et al. (2000) ofrecen una revisión en el campo del estudio de los fenómenos de transferencia de calor, aunque ninguno sobre destiladores solares. En destiladores solares, la técnica de termografía infrarroja, aún no empleada, mostraría con mucha claridad la distribución espacial de la temperatura en la cubierta de vidrio o en el fondo del depósito. La información recogida mostraría las zonas calientes y frías a lo ancho del destilador y permitiría realizar mejoras con base en ella.

Métodos analíticos

Como ya se dijo, las ecuaciones utilizadas tradicionalmente en el estudio de los destiladores solares son los balances de energía para cada uno de los componentes más importantes del destilador. Estas ecuaciones se resuelven como un sistema de ecuaciones diferenciales para las temperaturas de cada componente en función del tiempo. El parámetro más importante en este sistema es la irradiación solar, que es la excitatriz del sistema y es una función del tiempo. El análisis de parámetros concentrados implica que no se toma en cuenta la variación espacial de la temperatura de cada uno de los componentes, es decir, las temperaturas no están en función de las coordenadas espaciales. Esto implica la suposición de que la temperatura en un punto de la cubierta de vidrio, digamos, es la misma que en otro punto de dicha cubierta. Este tipo de análisis es característico de las operaciones unitarias utilizadas ampliamente en la literatura de la ingeniería química.

En el ámbito de la destilación solar, causa extrañeza que no existan muchos estudios donde la mezcla aire-vapor forme parte del modelado matemático y se describa el balance energético adecuado. Incluso en un nivel más profundo, la región donde se encuentra la mezcla aire-vapor se debe describir mediante las ecuaciones de Navier-Stokes para describir la transferencia de momentum en función del espacio y el tiempo, el balance de energía que incluya los términos de potencial químico asociado a la mezcla entre el aire y el vapor y el balance de masa para cada una de las especies en la región. No hace falta decir que se trata de un problema de alta complejidad, insuperable con los métodos analíticos actuales. Sin embargo, se pueden encontrar métodos para la simplificación del problema o para un acercamiento indirecto que ofrezca otro tipo de información que mejore los diseños actuales. A continuación, comentamos tan solo algunos de los métodos analíticos que pueden utilizarse en el ámbito de los destiladores solares, aunque conviene decir que existen muchos otros con distinto grado de profundidad y tipo de resultados.

Método exergético

El método exergético se basa en la propiedad llamada exergía. La exergía es producto del análisis con la segunda ley de la termodinámica y su uso se extiende a una gran variedad de campos de estudio,

como las ciencias biológicas, el análisis de ciclos de vida, procesos industriales y químicos, radiación solar, etc. Existen algunos trabajos en destiladores solares utilizando el concepto de exergía (Kwatra, 1996, Torchia-Núñez et al., 2008, Kumar y Tiwari, 2011). La virtud del método exergético es que ofrece otro tipo de información en comparación con el método energético. El método energético considera flujos de energía que se transforman pero no se consumen, mientras que en el método exergético las transformaciones de energía pueden producir un consumo de exergía o un incremento en la generación de entropía. Los mapas de generación de entropía ofrecen información cuantitativa de las regiones donde la energía se transforma de manera ineficiente (Bejan, 1995), los cuales podrían aportar información para mejores diseños, materiales y formas de operación en un destilador solar.

Análisis de orden de magnitud

El análisis de orden de magnitud consiste básicamente en tomar las ecuaciones que describen los fenómenos físicos y, mediante cambios de variable y suposiciones de escala, eliminar los términos que resulten ser demasiado grandes o pequeños según el caso. El método está descrito con amplitud en Sedov (1993).

Este análisis se utiliza cuando el modelado matemático produce ecuaciones tan complejas que no tienen solución y se requieren aproximaciones lo suficientemente apropiadas para considerar los resultados como útiles. Este método se usa en campos donde los fenómenos dan lugar a descripciones matemáticas complejas o sencillamente inexistentes: ciencias aeroespaciales, fenómenos de transporte o reacciones químicas. En destiladores solares, únicamente se tiene conocimiento del trabajo de Ghanem (2010), quien realiza un análisis de semejanza para la simplificación de parámetros de estudio.

Debido a la complejidad de las ecuaciones, el método del análisis de orden de magnitud se vislumbra de mucha utilidad para problemas con un gran número de variables, como los destiladores solares. Uno de sus resultados es la aparición de términos adimensionales que reflejan la naturaleza de los fenómenos y establecen su importancia según tengan un valor alto o bajo. Así, podrían establecer la influencia del espesor de aislamiento térmico en las paredes del destilador; en el nivel de agua en el

depósito, el espesor de la cubierta de vidrio o el espacio entre la superficie de la salmuera y el vidrio, entre otros.

Métodos de optimización

Existe una gran cantidad de métodos de optimización en la literatura cuyo uso depende del problema que se analiza. En general, la optimización es la mejor solución de una relación matemática bajo restricciones que deben satisfacerse. Técnicas como algoritmos genéticos, optimización convexa, cálculo variacional, multiplicadores de Lagrange y programación lineal, entre muchas otras, forman parte del gran cuerpo teórico de optimización aplicado en las ciencias y las ingenierías.

La idea de optimización en la destilación solar está implícita en una gran cantidad de estudios, en los que se encuentran máximos de producción de destilado cuando ciertos parámetros se incrementan o decrecen monótonamente, como el espesor del aislamiento térmico (Dhiman, 1990, Khalifa y Hamood, 2009), la inclinación del ángulo de la cubierta de vidrio (Tiwari et al., 1994), el número de efectos del destilador (Kwatra, 1996) y la velocidad del viento (El-Sebaili, 2011), entre otros (Badran, 2007). Sin embargo, los fenómenos físicos en un destilador no han sido tratados con la formalidad matemática de la optimización.

Teoría constructal

La Teoría constructal establece que existe un principio de optimización de la naturaleza en los sistemas sujetos a flujos basados en la minimización de las resistencias opuestas a los flujos. La teoría se ha utilizado en análisis de transferencia de calor y mecánica de fluidos (en este campo de estudio es donde nació) y hasta en el estudio de sistemas sociales y logísticos (Bejan, 2000). Mehrgoo y Amidour (2012) utilizaron la teoría para el análisis de un sistema de desalinización que no es propiamente un destilador solar pero que revisa algunos de los fenómenos físicos. La optimización de acuerdo con la teoría constructal puede ser geométrica, es decir, qué diseño y dimensiones son óptimas para determinadas condiciones de operación, así como también puede estudiarse una optimización temporal, es decir, basada en el tiempo para variables como el periodo de suministro óptimo de salmuera en el depósito o la inercia térmica para el destilado nocturno.

Conclusiones

El campo de la destilación solar ha adquirido una madurez tecnológica y, sin embargo, desde el punto de vista comercial se mantiene detrás de otro tipo de tecnología desalinizadora, como la ósmosis inversa y los tanques "flash". El funcionamiento del destilador se conoce casi enteramente debido al conocimiento empírico de imitar el ciclo hidrológico en escala pequeña. El modelado matemático tradicional se ha basado en balances de energía con grandes simplificaciones y aunque ha permitido predecir adecuadamente los parámetros de importancia, aún faltan métodos y técnicas para estudiar estos dispositivos en búsqueda de un avance que rompa los paradigmas actuales.

Por el lado de la experimentación, las técnicas ópticas de medición basadas en la fotónica han avanzado a pasos agigantados desde hace una década; sin embargo, en el ámbito de la destilación solar no han ocupado un lugar importante en la literatura especializada. Se espera que los resultados que estas técnicas produzcan resultados que ofrezcan herramientas de diseño diferentes a las que se han tenido hasta la fecha.

Bibliografía

- Abdul Jabbar, N., Khalifa, A. & Hamood, M. (2009). Effect of insulation thickness on the productivity of basin type solar stills: An experimental verification under local climate. *Energy Conversion and Management* 50(9): 2457-2461.
- Arellano, N. (2011). La planta solar de desalación de agua de las Salinas (1872). Literatura y memoria de una experiencia pionera. *Quaderns d'història de l'enginyeria* Vol. XII, 2011, pp. 229-251.
- Astarita, T., Cardone, G., Carlomagno, G.M. & Meola, C. (2000). A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Optical & Laser Technology* 32: 593-610.
- Badran, O.O. (2007). Experimental study of the enhancement parameters on a single slope solar still productivity. *Desalination* 209: 136-143.
- Bejan, A. (1995). *Entropy generation minimization: The method of thermodynamic optimization of finite-size systems and finite-time processes*. New York: CRC Press.
- Cipollina, A., Micale, G. & Rizzuti, L. (2009). *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*. London: Springer.
- Delyannis, A. & Piperoglou, E. (1968). The Patmos Solar Distillation Plant. *Solar Energy* Vol. 12, 113-115.
- Dhiman, N.K. (1990). Evaluation of optimum thickness of bottom insulation for a conventional solar still. *Desalination* 78(2): 201-208.
- Dunkle, R.V. (1961). Solar Water distillation: The roof type still and a multiple effect diffusion still. *International Development in Heat Transfer* 5: 895-902.
- El-Sebaï, A.A. (2011). On effect of wind speed on passive solar still performance based on inner/outer surface temperatures of the glass cover. *Energy* 36(8): 4943-4949.
- Foster, R.E., Eby, S. & Amos, W. (2005). *Ten years of solar distillation application along the U.S.-Mexico border*. Solar World Congress. Orlando, Florida, US: International Solar Energy Society.
- Ghanem, T. (2010). Analysis of the solar still productivity by similitude applications. *Misr. J. Ag. Eng.* 27(1): 313-325.
- Kumar, S. & Tiwari, G.N. (2011). Analytical expression for instantaneous exergy efficiency of a shallow basin passive solar still. *International Journal of Thermal Sciences* 50(12): 2543-2549.
- Kwatra, H.S. (1996). Performance of a Solar Still: Predicted Effect of Enhanced Evaporation Area on Yield and Evaporation Temperature. *International Journal of Solar Energy* 56(3): 261-266.
- Lemoine, F. & Grisch, F. (2013). *Laser-Induced Fluorescence*. In Alan Boutier, A. (Ed.). *Laser Metrology in Fluid Mechanics: Granulometry, Temperature and Concentration Measurements*. London: Wiley.
- Levi, E. (2001). *El agua según la ciencia*. México: IMTA.
- Malik, M.A.S., Tiwari, G.N., Kumar, A. & Sodha, M.S. (1982). *Solar Distillation: A Practical Study of a Wide Range of Stills and their Optimum Design, Construction and Performance*. Oxford: Pergamon Press.
- Mehrgoo, M. & Amidpour, M. (2012). Constructal design and optimization of a direct contact humidification-dehumidification desalination unit. *Desalination* 293: 69-77.
- Porta-Gándara, M.A., Rubio-Cerda, E. & Fernández-Zayas, J.L. (1998). Visualization of natural convection inside shallow solar stills. *Exp. Fluids* 25: 369-370.
- Porta-Gándara, M.A., Cervantes, G.J. & Solorio, F.J. (2004). Periodic enclosed natural convection in a laboratory solar still. *Exp. Fluids* 37: 483-487.
- Raffel, M., Willert, C., Wereley, S. & Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry. A Practical Guide*. Berlin: Springer.
- Rajamanickam, M.R. & Ragupathy, A. (2012). Influence of Water Depth on Internal Heat and Mass Transfer in a Double Slope Solar Still. *Energy Procedia* 14: 1701-1708.
- Rizzuti, L., Ettouney, H.M. & Cipollina, A. (Eds.). (2007). *Solar Desalination for the 21st Century. A review of modern technologies and researches on desalination coupled to renewable energies*. Dordrecht: Springer.
- Sedov, L.I. (1993). *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*. New York: CRC Press.

- Smits, A.J. & Lim, T.T. (2000). *Flow Visualization. Techniques and Examples*, London: Imperial College Press.
- Tiwari, G.N., Thomas, J.M. & Khan, E. (1994). Optimization of glass cover inclination for maximum yield in a solar still. *Heat Recovery Systems and CHP*, 14(4): 447-455.
- Torchia-Núñez, J.C., Porta-Gándara, M.A. & Cervantes de Gortari, J.G. (2008). *Renewable Energy* 33(8): 608-616.
- UNESCO (2010). http://www.unwater.org/statistics_san.html [Obtenido el 10 de julio de 2013]
- Vollmer, K. & Möllmann, P. (2010). *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH.