

# Desarrollo y caracterización de un destilador solar para su aprovechamiento en el tratamiento de agua contaminada

Juan García Pérez\*  
Carlos Manuel García Lara\*  
Hugo Nájera Aguilar\*  
Pedro Vera Toledo\*  
Rubén Vázquez Sánchez \*

## RESUMEN

Se presenta una breve descripción de los sistemas utilizados para el tratamiento de agua, haciendo énfasis en aquéllos que no requieren consumo de energía convencional, así como la situación nacional y local, para el desarrollo de un sistema basado en incidencia solar y su posible contribución en comunidades. Se realiza un estudio de la técnica de destilación solar a partir de la *energía renovable* como un método alternativo para purificar agua, basado en el efecto invernadero, bajo las condiciones ambientales existentes en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Se estudia un modelo matemático basado en el balance de energía, describiendo teóricamente el comportamiento de la temperatura del agua dentro del destilador, en términos de la radiación solar, estudiando además factores como el ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio, materiales y costos. Los resultados presentan un máximo de agua destilada de 3.26 kg/m<sup>2</sup> al día, con 151,144.83 W de radiación solar total diaria, haciéndolo competitivo con aquellos propuestos para climas desérticos.

**Palabras clave:** Destilador solar, destilación, energía solar, modelo de destiladores.

## ABSTRACT

We presents a brief description of systems used for water treatment, accomplishing certain emphasis in those that not required consumption of conventional energies, The national and local situation is projected and its possible development due to the solar incidence and to the contributions that would generate this type of systems in the communities. A study of the distillation technique from renewable energy like an alternative method to purify water, from a prototype of greenhouse solar distiller, under the weather conditions at Tuxtla Gutierrez city also is shown. A mathematical model based in the balance of energy of water contained is developed, temperature of water inside of the distiller is described theoretically, behavior of the temperature in the system in terms of the solar radiation is simulated, the angle of the covering material, in terms of the use of energy and the financial resources were studied too, without failing to keep principal operation characteristics. The results presented a maximum output of water distilled of 3.26 kg/m<sup>2</sup> day, with 151,144.826 W of total solar radiation day, for that it is considered that the proposed prototype is competitive compared at those used in desert.

**Key words:** Solar stills, distillation, solar energy, still modeling.

---

\* Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
Facultad de Ingeniería, Libramiento Norte Poniente 1150  
Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México  
C. P. 29039, e-mail: carlosmg10@yahoo.com.mx

## INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda de servicios a nivel mundial ha ocasionado un impacto ambiental negativo (Mowla, 1995). El agua ha sido uno de los recursos naturales más afectados; debido principalmente a actividades industriales y de agricultura, ocasionando altas concentraciones de patógenos y sales (Armendáriz *et. al.*, 2005).

Aproximadamente una sexta parte de la población mundial (1,100 millones de personas) padecen de acceso al agua para consumo humano, de los cuales 77 millones son del continente americano, y 2,400 millones no cuentan con las instalaciones sanitarias adecuadas. En México el 65% de la población se abastece de este recurso, de las agua subterránea, sin embargo, de los 653 acuíferos existentes, 102 se encuentran sobre-explotados. Otros problemas relacionados a la escasez de agua son debidos a la competencia existente por este recurso, no solamente al interior de un país, sino también con países vecinos (Sainz and Becerra, 2002). Algunos problemas específicos de la calidad de la misma están relacionados a la excesiva salinidad, alta concentración de hierro, calcio, magnesio y fluoruros, contaminación por bacterias o virus y residuos de pesticidas.

Existen diferentes alternativas para el tratamiento del agua, como son los sistemas eólicos (Jürgen, 2000), compresión de vapor y osmosis inversa. En México fue desarrollado un sistema de fotocatalisis nano-estructurado heterogéneo, basado en nano-partículas de titanio, que permite manipularse dentro de líquidos, rompiendo las estructuras químicas de los contaminantes. Una tecnología emergente es la destilación solar, la cual puede eliminar sales, bacterias, metales pesados, organismos patógenos, así como pesticidas (Zachritz, *et al.*, 2000). Sin embargo, esta tecnología está limitada a la producción de pequeñas cantidades de agua para consumo humano, obteniendo de un destilador con un área superficial de 2m<sup>2</sup> de 15 a 20 litros diarios dependiendo de la época del

año, la incidencia de la radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiental, entre otros; razón por la cual actualmente es utilizada principalmente en comunidades rurales pequeñas (Foster and Cornier, 1999).

El sistema utilizado para la destilación solar consiste normalmente en: una base metálica que además de contener el agua contaminada, capta la radiación solar, la cual es colocada en un caja trapezoidal, comúnmente de madera, cubierta con un vidrio para retener la energía térmica solar dentro de ella, debido al efecto invernadero se logra el aumento de la temperatura del agua contaminada provocando que ésta llegue a evaporarse, produciendo un incremento de presión dentro de éste. Sin embargo, debido al equilibrio de fases ésta no podrá condensarse en la superficie interna del vidrio de cubierta, razón por la cual se requiere una diferencia de temperaturas entre la cubierta interna y externa del vidrio para lograr un desequilibrio.

El interés existente en destiladores solares convencionales se ha debido a la simplicidad de su diseño, construcción y bajos costos de operación y mantenimiento, principalmente en áreas remotas sin suministro eléctrico. Sin embargo, su baja productividad ha motivado el estudio y desarrollo de éstos para alcanzar mejoras en su productividad, ejemplo de lo mencionado es el modelo matemático desarrollado por Sakthivel (2008), que compara las variaciones de algunos parámetros como temperatura del agua, cubierta y horario con valores experimentales.

### Arreglo experimental

El diagrama esquemático del prototipo de destilador solar realizado, es presentado en la figura 1. Éste tiene una base rectangular de 1.10 m<sup>2</sup>, las paredes fueron pintadas de negro para una máxima absorción de la radiación solar, además de prevenir con esto el deterioro de los materiales de construcción, la cubierta fue hecha con un vidrio ordinario de 3 mm de espesor

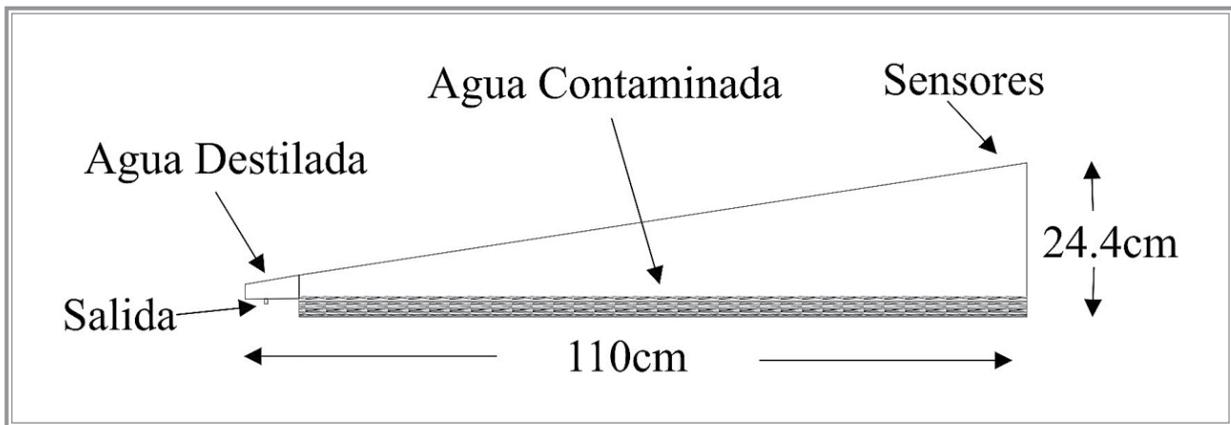


Figura 1 ■ | Árbol de objetivos elaborado a través del consenso entre usuarios y autoridades invitadas al taller.

colocado a un ángulo de  $10^\circ$  respecto de la horizontal (Fonseca, *et al.*, 2005). Se utilizó silicón para sellar las uniones entre las partes del prototipo.

Para maximizar el aprovechamiento de la radiación solar, se construyeron las paredes con un material cuya conductividad térmica fuese pobre para permitir la completa absorción de energía por el agua. La base del prototipo fue realizada utilizando una placa galvanizada de zinc de 2 mm de espesor. El área de evaporación fue de  $1.0 \text{ m}^2$ , y la altura máxima permisible del agua contaminada fue de 0.05 m, de ser excedida, ésta pasaría al canal de recolección mezclándose con el agua destilada y evitaría la fuga de vapor, y con esto la pérdida de presión. Éste fue colocado al noreste de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, cuyo clima es cálido-sub-húmedo, monitoreándose en todo momento la temperatura y presión dentro de éste, mediante sensores de la marca Vernier modelos TMP-BTA y LS\_BTA respectivamente, el prototipo desarrollado se presenta en la figura 2.

### Modelo matemático

Para la modelación matemática de destiladores convencionales mediante la ecuación de balance de energía se tomaron las siguientes condiciones iniciales.



Figura 2 ■ | Imagen del prototipo de destilador solar realizado.

- El sistema está en una condición de estado estable hasta que sea modificada por la temperatura ambiente.
- Existe un desbalance térmico entre el sistema y el medio ambiente.
- No existen pérdidas de vapor.
- La absorción del agua es alta y se asume que la radiación solar la afecta directamente.
- La incidencia solar es el único factor que afecta a los cambios de temperatura del prototipo.

La energía absorbida por el sistema proviene de la radiación solar, provocando con esto cambios en temperatura. El comportamiento de la radiación solar es tomada a partir de la ecuación (Salum, 2007).

$$I = A \cdot \cos[W(t - t^*)]$$

Donde  $I$  representa la incidencia solar global en un día ( $W/m^2$ ) descrita, utilizando una función cosenoidal centrada al medio día ( $t^*$ );  $A$ , indica la máxima amplitud;  $W$  es la hora, y  $t$  el tiempo en segundos.

La razón entre la energía absorbida por el agua y la radiación solar es igual a la razón de la energía almacenada en el agua y las pérdidas de calor del agua a través de la cubierta de vidrio y la placa galvanizada, definida por la ecuación 2.

$$IA_w + h_{cw-lmg}(T_{lmg} - T_w) = M_w C_{pw} \left( \frac{dT_w}{dt} \right) + (h_{cw-gl} + h_{eva\ w-gl} + h_{rw-gl})(T_w - T_{gl})$$

Donde  $h_{lmg-w}$  es el coeficiente de transferencia convectiva de calor del agua a la placa galvanizada, ( $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ ),  $T_{lmg}$ , es la temperatura de la placa galvanizada ( $^\circ C$ );  $T_w$ , la temperatura del agua ( $^\circ C$ );  $M_w$ , la masa del agua ( $Kg$ );  $C_{pw}$ , el calor específico del agua ( $J/Kg \text{ } ^\circ K$ );  $\frac{dT_w}{dt}$ , el cambio en la temperatura del agua, respecto del tiempo ( $^\circ C/s$ );  $h_{cw-gl}$ , el coeficiente de transferencia convectiva de calor del agua a la cubierta de vidrio ( $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ );  $h_{eva\ w-gl}$ , el coeficiente de transferencia vaporativa de calor del agua a la cubierta de vidrio ( $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ );  $h_{rw-gl}$ , el coeficiente de transferencia radiativa de calor del agua a la cubierta de vidrio ( $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ ).

Los datos de radiación y térmicos utilizados en las ecuaciones 1-2 son presentados en la tabla I.

$I = 755.72 \text{ } W/m^2$	$h_{cw-gl} = 64.74 \text{ } W/m^2 \text{ } ^\circ K$
$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ } W/m^2 \text{ } ^\circ K^4$	$M_w = 10 \text{ } kg.$
$h_{cw-lmg} = 930.57 \text{ } W/m^2 \text{ } ^\circ K$	$C_{pw} = 4186 \text{ } J/Kg \text{ } ^\circ K$
$A_w = 0.96$	

**Tabla 1** ■ Parámetros de radiación y térmicos.

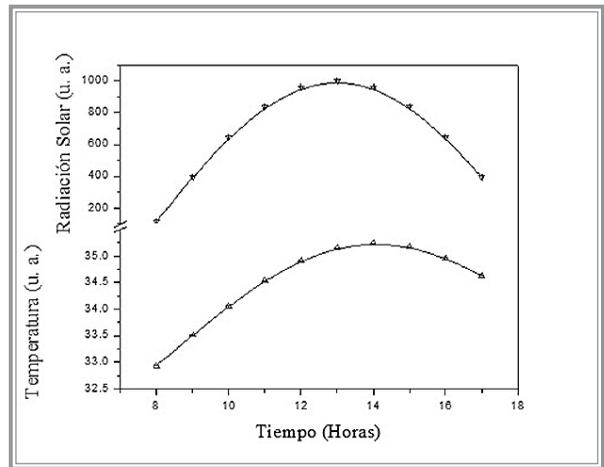
La razón de absorción de la radiación solar es un factor importante para obtener un incremento de temperatura en diferentes tipos de superficies, para el balance de energía del agua contenida en el destilador. La radiación solar es un parámetro de entrada del sistema, al que debe ser agregado la absorción del agua, por lo que la ecuación 2, puede ser expresada de la forma:

$$\frac{dT_w}{dt} + \left( \frac{h_{cw-lmg} + h_{cw-gl}}{M_w C_{pw}} \right) T_w = \frac{1}{M_w C_{pw}} [IA_w + h_{cw-lmg} T_{lmg} + h_{cw-gl} T_{gl}]$$

Los coeficientes de transferencia de calor radiativo y evaporativo fueron despreciados debido a que no afectan los resultados de manera significativa, por lo que la solución de la ecuación 3, es:

$$T_w = \frac{1}{M_w C_{pw}} \left[ \frac{IA_w + h_{cw-lmg} T_{lmg} + h_{cw-gl} T_{gl}}{\left( \frac{h_{cw-lmg} + h_{cw-gl}}{M_w C_{pw}} \right)} \right] \left( 1 - e^{-\left( \frac{h_{cw-lmg} + h_{cw-gl}}{M_w C_{pw}} \right) t} \right) + T_{wi} e^{-\left( \frac{h_{cw-lmg} + h_{cw-gl}}{M_w C_{pw}} \right) t}$$

La simulación de la ecuación 4, puede observarse en la figura 3, en donde se presenta el comportamiento de la temperatura del agua en términos de la radiación solar tomando como constantes el flujo de calor,



**Figura 3** ■ Simulación de la temperatura del agua y radiación solar.

la temperatura de la placa galvanizada y el vidrio de cubierta, además de fijar el tiempo de radiación solar desde las 7am hasta las 6pm, centrado a las 13 horas.

### Eficiencia del sistema

La eficiencia del sistema  $\epsilon$ , fue calculada utilizando la relación definida a continuación:

$$\epsilon = \frac{o_w}{i_w}$$

Donde  $i_w$  es el agua contenida en el destilador solar (masa/unidad de área\*día);  $o_w$  representa la producción diaria de agua destilada (masa/unidad de área).

## RESULTADOS

La caracterización realizada abarca parámetros como la temperatura ambiente, rendimiento diario y diferencia de temperatura entre el agua y el vidrio. Inicialmente se evaluó la correspondencia existente entre los valores teóricos obtenidos para el caso de la temperatura del agua respecto de la radiación solar, lo cual se presenta en la figura 4.

Se puede observar que la temperatura del agua varía de acuerdo a la radiación solar presente, teniendo

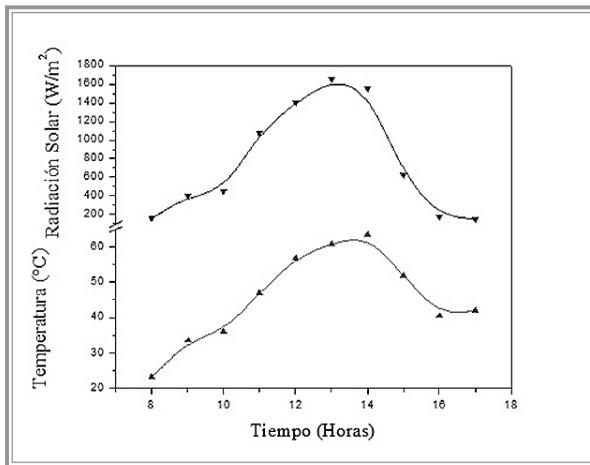


Figura 4 ■ | Valores experimentales obtenidos de la temperatura del agua contaminada y la radiación solar en un tiempo de 9 horas.

un ligero corrimiento debido al retardo de absorción de energía por el agua. El efecto de la profundidad del agua contaminada contenida en el destilador solar se presenta en la figura V. Se observa que la dependencia del volumen final diario de agua destilada respecto de la profundidad del agua contaminada, inicia con un crecimiento constante hasta una profundidad de 1cm aproximadamente, a continuación decrece lo cual se debe a que la radiación solar no penetra en su totalidad al agua lo que provoca un decremento de la temperatura.

Una vez determinada la profundidad a la cual se obtienen mejores resultados, se procedió a evaluar el rendimiento del sistema centrado a una profundidad de 10 mm de agua en el contenedor, presentado en la figura VI.

La máxima eficiencia obtenida generó aproximadamente 3.26 kg/m²-día, que corresponde a un valor del 26%, a una profundidad de 5 mm, lo cual es claro debido a que, a menor profundidad, mayor absorción de la radiación solar por parte del agua, pero esto no quiere decir que se obtiene mayor volumen de agua destilada. Lo anterior demuestra que la eficiencia del

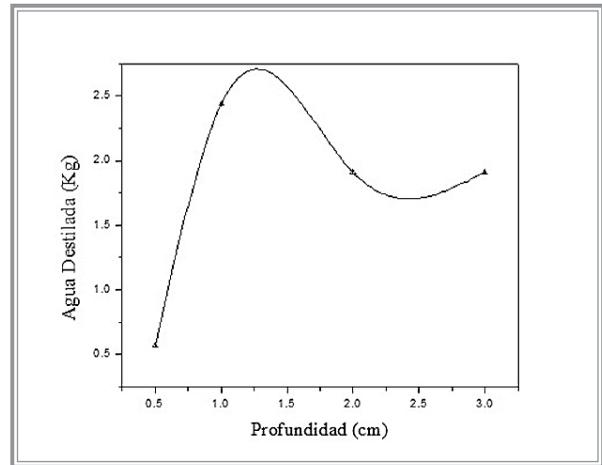


Figura 5 ■ | Valores experimentales de agua destilada obtenida en la salida, a diferentes profundidades de agua contaminada.

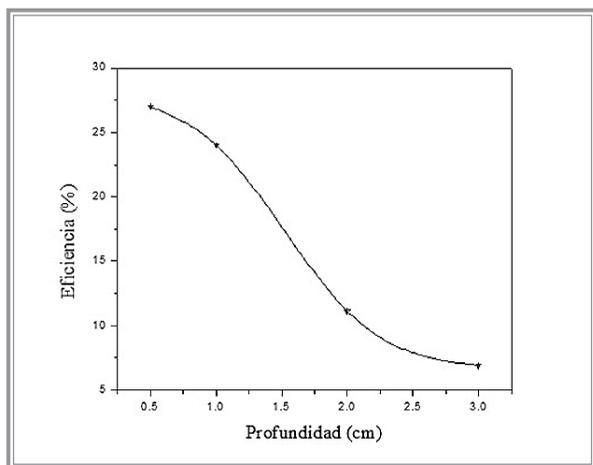


Figura 6 ■ Valores experimentales de eficiencia obtenidos en la salida del destilador, a diferentes profundidades de agua contaminada.

sistema es inversamente proporcional a la profundidad del agua. Sin embargo, se requiere un balance entre la eficiencia y la producción para que se obtenga la máxima eficiencia del sistema, lo cual, para el prototipo propuesto, se logró a 1.0 cm de profundidad.

La diferencia entre la temperatura ambiental y la del vapor es una característica importante para lograr la condensación. La máxima diferencia de temperatura lograda fue de 30.7 °C registrado al mediodía. La presión es inversamente proporcional a la temperatura dentro del sistema. Lo anterior puede ser explicado debido al incremento de la temperatura del agua dentro del sistema durante las primeras horas del día, lo que causa la adición de vapor al aire contenido dentro del sistema hasta saturarlo. Una vez alcanzada esta condición, la presión se mantiene constante logrando un máximo si la temperatura se ve incrementada, las moléculas de agua adquieren más energía y la evaporación se da con una mayor rapidez, tal como se observaría en una olla de presión, obteniéndose un desequilibrio hasta que la razón de condensación alcance nuevamente el equilibrio.

Una diferencia de temperatura es requerida en la cubierta de vidrio para lograr la condensación, la cual para las condiciones ambientales presentes en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, puede ser explicada a partir de la humedad relativa, una de las posibles razones de la producción alcanzada por el sistema propuesto, teniendo una elevada humedad relativa al inicio y final del día, ya que la temperatura ambiental no reduce la humedad presente.

## DISCUSIÓN

El sistema de destilación solar ha demostrado ser una excelente herramienta para el tratamiento de agua, proporcionando beneficios en la salud, debido a la eliminación de impurezas, además de permitir el aprovechamiento de ésta en comunidades donde la calidad o cantidad de agua es baja. Utiliza energía natural a diferencia de otros métodos, lo que permite también asentamientos humanos en zonas que puedan aprovechar la energía solar, factor importante en el incremento de la temperatura del agua, su posterior evaporación y aprovechamiento.

Si existe una alta razón de evaporación no significa que exista una alta razón de condensación, ya que depende de otras variables como el equilibrio de fases. Es conocido que después de cierto tiempo el aire dentro del sistema estará saturado por la acción del vapor de agua liberado hasta obtener un cuasi-equilibrio donde la presión se mantendrá constante y la razón de condensación será relativamente pequeña en términos de la razón de evaporación tal como sucede en climas desérticos.

La humedad relativa fue un factor importante para explicar los resultados obtenidos en la producción de agua destilada presente en climas cálido sub húmedos, donde la radiación solar es relativamente inferior comparada a la presente en climas desérticos. La baja radiación disminuye la producción de agua destilada, debido a que la razón de evaporación es inferior comparada al otro clima descrito, pero el

elevado porcentaje de humedad relativa provoca una notoria razón de condensación, compensando la deficiencia de radiación; logrando con esto resultados similares a los reportados para climas desérticos. El incremento en el volumen de agua a tratar genera una disminución en el cambio de temperatura, como consecuencia la evaporación se ve afectada disminuyendo la razón de producción de agua destilada de igual manera. Incrementando el volumen a tratar, el proceso de destilación inicia rápidamente permitiendo aprovechar de manera eficiente la radiación solar, logrando mayores volúmenes de agua destilada.

---

## LITERATURA CITADA

**MOWLA D. y KARIMI G., 1995.** Mathematical Modeling of Solar Still in Iran. *Solar Energy Journal*, 55 (5): 389-393.

**ARMENDÁRIZ S., PORTA GÁNDARA M., FOSTER R., KOUTSOUKOS P., BAUTISTA R., GRADO J. y ALONSO G., 2005.** Estudio de la precipitación de carbonato de calcio en un destilador solar experimental. *Revista internacional de contaminación ambiental, UAM, México* 21(1): 5-15.

**SAINZ SANTAMARÍA J. y BECERRA PÉREZ M., 2002.** *Los conflictos por agua en México*. Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental (DGIPEA), Instituto Nacional de Ecología (INE), 9.

**JÜRGEN KRÖBER H., 2000.** *Técnicas innovativas de desalinización de aguas salobres y del mar*, asesor técnico de la gerencia de estudios para el desarrollo hidráulico integral, Comisión Nacional del Agua, FEMIS-CA, 10.

**ZACHRITZ H., MIMBELA L., POLKA R., STEVENS K., CISNEROS L., FLOYD H. y HANSON A., 2000.** *Application of Solar Still for Drinking Water in Border. SWTDI-NMSU*, EDA Project No. 08-39-03086, Austin, Texas.

**FOSTER R.E. y CORMIER M., 1999.** "Solar Distillation Water Problems, Solar Solutions, EPSEA". en *solar still construction and operation manual*, El Paso Solar Energy Association, Texas.

**SAKTHIVEL, M AND SHANMUGASUNDARAM, S., 2008.** Effect of Energy Storage Medium (Black Granite Gravel) on the Performance of a Solar Still. *Int. J. Energy*, 32: 68-82.

**FONSECA, S., ABDALA, J., GRIÑÁN, P., y SÁNCHEZ, J., 2005.** Prototipo de destilador solar de fibra de vidrio, Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES). *Tecnología química*, 15(3): 1-9.

**SALUM, G., IPIÑA, A. Y PIACENTINI R., 2007.** Desarrollo de un algoritmo para la modelización de radiación solar global y el control de datos. *Mecánica Computacional*, 26(1): 1774-1787.



