

# Análisis Paramétrico de un Nuevo Sistema Para la Destilación Solar de Agua Mediante Simulación Dinámica

Armando Juárez-Trujillo, Ignacio R. Martín-Domínguez<sup>1</sup> y María T. Alarcón-Herrera

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C (CIMAV)  
Departamento de Energía Renovable y Protección del Medio Ambiente  
Miguel de Cervantes 120. Complejo Industrial Chihuahua. 31109 Chihuahua, Chih. México.  
+52 (614) 439-1148 [ignacio.martin@cimav.edu.mx](mailto:ignacio.martin@cimav.edu.mx)

## RESUMEN

En éste trabajo se presentan resultados de la simulación y análisis paramétrico del funcionamiento de un sistema de destilación de agua mediante energía solar. El sistema está dotado de colectores solares y un tanque de almacenamiento térmico, consta también de dos intercambiadores de calor, un evaporador de torre empacada y un condensador a base de tubos de calor. Mediante el uso de colectores solares se calienta el aceite térmico, y la energía es almacenada en un termo tanque estratificado térmicamente. La energía almacenada en el termo-tanque se utiliza para calentar la corriente de agua y aire que entran a la torre de evaporación mediante los intercambiadores de calor. La torre de evaporación trabaja a contra flujo, entrando agua por la parte superior y aire por la parte inferior, en este sistema se tiene intercambio de calor y masa por contacto directo, humedeciendo el aire que posteriormente entrara al condensador para separar el agua destilada. Se modeló el sistema descrito en la plataforma de simulación TRNSYS, incorporando la modelación del funcionamiento de la torre de evaporación y la del condensador. Utilizando las condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua, México, se realizó un estudio paramétrico del sistema para determinar el efecto de utilizar diferente número de colectores solares, volumen de termo tanque y diferentes flujos de agua. Se simula el comportamiento del sistema a lo largo de un año de operación continua, contabilizando la cantidad de condensado que se logra producir durante ese periodo de tiempo. El objetivo del análisis es determinar cómo varía la producción de destilado, en kilogramos de agua destilada por año y por metro cuadrado de colectores utilizados. Con ello se determinan las características del diseño óptimo del sistema de destilación propuesto.

## INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento esencial para todas las formas de vida, incluida la humana, pero tal y como se encuentra en la naturaleza para ser utilizada sin riesgo para el consumo humano requiere ser tratada, para eliminar las partículas y organismos que pueden ser dañinos para la salud [Boucheikima, 2003]. Para llevar a cabo el proceso de potabilización es necesario contar con una fuente de energía que promueva la separación de los contaminantes del agua, un método muy útil para la potabilización del agua es la destilación. El proceso de destilación es altamente eficaz en remover los contaminantes, ya que al pasar el agua del estado líquido al gaseoso, todas las impurezas se quedan en el agua líquida [Bermudez, et al., 2008]. No obstante es importante señalar que el proceso de destilación requiere la utilización de grandes cantidades de energía térmica, necesaria para ocasionar el cambio de fase en el agua. En la actualidad el principal suministro de energía para estos procesos se obtiene a partir de la combustión de combustibles fósiles, derivados del petróleo. Sin embargo, esto tiene fuertes consecuencias ambientales por la contaminación e incremento de los gases con efecto de invernadero que provoca, además de que las fuentes de energía fósil son cada día más caras y escasas. Una alternativa energética sustentable es la utilización de energías renovables, que adicionalmente no contribuyen al incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Tal es el caso de la energía solar, que además es más abundante en donde más se requiere contar con agua potable [Jiang, 2010; Peidong, et al., 2009]. Por lo tanto, la potabilización de agua por destilación mediante el uso de energía solar térmica es una opción viable técnicamente, que no contribuye al aumento en la concentración de gases de invernadero en la atmósfera terrestre, y que puede ser económicamente viable y de amplia aplicación si se diseñan adecuadamente los sistemas requeridos para su implementación [Bermudez, et al., 2008].

### *Objetivo del trabajo*

Diseñar mediante simulación dinámica en TRNSYS un sistema de destilación solar de agua basado en humidificación - dehumidificación más eficiente que los ya existentes.

### *Justificación*

Se han desarrollado sistemas de destilación solar "integrales", en los cuales dos o más procesos termodinámicos diferentes ocurren en un mismo componente físico del sistema. Esto ocasiona que la eficiencia de cada proceso termodinámico sea menor a la que podría alcanzarse si ocurriera en un dispositivo diseñado específicamente para él. Las modificaciones de

diseño introducidas en un componente afectan, por lo tanto, a dos o más procesos termodinámicos simultáneamente, pudiendo beneficiar a uno, pero afectando posiblemente a otros. Éste tipo de sistemas tienen por lo tanto bajas eficiencias de operación, y son inherentemente difíciles de mejorar. Los sistemas de destilación solar más comunes, tipo caseta, han mostrado tener una baja eficiencia de producción de destilado, y están limitados a capacidades pequeñas debido a que su costo se incrementa fuertemente con el tamaño, haciéndolos incosteables (Thomas, 1997). Escobedo-Bretado (2010) analizó el comportamiento de un sistema de destilación solar dotado de una torre de evaporación, en el cual cada proceso termodinámico ocurre en un componente diseñado específicamente para su función, y detecto que la variable más importante para conseguir una alta eficiencia de operación es la temperatura del flujo de agua de entrada a la torre. En el presente trabajo se reportan los resultados obtenidos al modificar el diseño de Escobedo-Bretado (2010), para controlar la temperatura del agua de alimentación a la torre de evaporación y maximizar la producción de destilado.

## METODOLOGÍA

Se presenta un nuevo sistema para la destilación solar de agua, en el cual cada proceso ocurre en un dispositivo diseñado específicamente para tal fin. El sistema propuesto consta de un campo de colectores solares de tubos evacuados, un tanque de almacenamiento de aceite térmico, dos intercambiadores de calor para el calentamiento del agua y el aire, una torre de evaporación por contacto directo y un condensador (Figura 1). En el sistema propuesto el aceite térmico se calienta en el campo de colectores, se almacena en el termo tanque y posteriormente se utiliza para calentar las corrientes de agua y aire que entran a la torre de evaporación, utilizando para ello los dos intercambiadores de calor. Mediante un controlador de flujo se mantiene constante en 90°C la temperatura del agua que entra a la torre de evaporación. La torre de evaporación de contacto directo trabaja a contra flujo, entrando agua caliente por la parte superior y aire caliente por la parte inferior. De la torre sale aire saturado y caliente, que es conducido hacia un condensador, para la obtención del destilado. El funcionamiento del sistema se simula en la plataforma TRNSYS, y se analizan en cada corrida periodos de operación continua de un año, con un paso de simulación de 15 minutos. Las condiciones climáticas utilizadas en éste trabajo corresponden a la ciudad de Chihuahua, Chih., México. Se realizó un análisis paramétrico considerando sistemas dotados de diferente número de colectores solares, diferentes volúmenes de almacenamiento térmico, y diferentes flujos de agua, analizando el comportamiento anual de cada diferente diseño resultante. La variable que se pretendía optimizar es la producción anual de agua destilada, por unidad de área de colección solar utilizada,  $\text{kg}/(\text{año} \cdot \text{m}^2)$ . En la Tabla 1 se muestran los parámetros analizados y sus rangos de variación. El número de configuraciones de diseño analizadas resulta del número de combinaciones de parámetros considerados. De los resultados obtenidos se determina el sistema óptimo de destilación solar de agua.

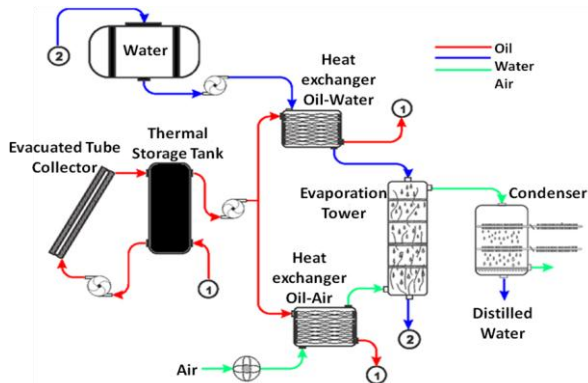


Figura 1. Sistema de destilación.

Numero de colectores	2, 4, 6, 8, 10 y 12
Volumen de termo-tanque ( $\text{m}^3$ )	1, 2, 3, 4, 5 y 6
Flujo de agua de entrada al evaporador ( $\text{kg}/\text{h}$ )	De 1 a 220

Tabla 1. Parámetros analizados.

## RESULTADOS

De los resultados obtenidos se confirma, que la utilización de colectores solares de tubos evacuados permite alcanzar las temperaturas de aceite suficientes, para lograr mantener la temperatura del agua de entrada a la torre de evaporación a la temperatura deseada de 90°C, en forma continua. La figura 2 muestra las variaciones de la temperatura del aceite almacenado, debidas a la combinación de la variabilidad diaria en la disponibilidad de radiación solar, y al uso variable de su energía térmica para mantener el flujo de agua de alimentación a la temperatura constante de 90°C. La temperatura del aceite almacenado en el termo tanque es función de la tasa de colección de energía solar en los colectores, y de la tasa de utilización de dicha energía para el calentamiento de las corrientes de agua y aire en los intercambiadores de calor. Empleando un control de flujo de agua se logra mantener controlada la temperatura del agua de alimentación a la torre de destilación en 90°C como se muestra en la figura 2. Con ello la tasa de producción de destilado se mantiene constante en el más alto valor de posible (figura 3).

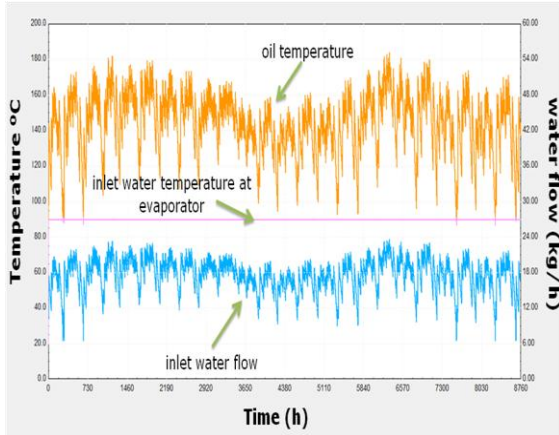


Figura 2. Temperatura del aceite, del agua y flujo de agua que entra al sistema

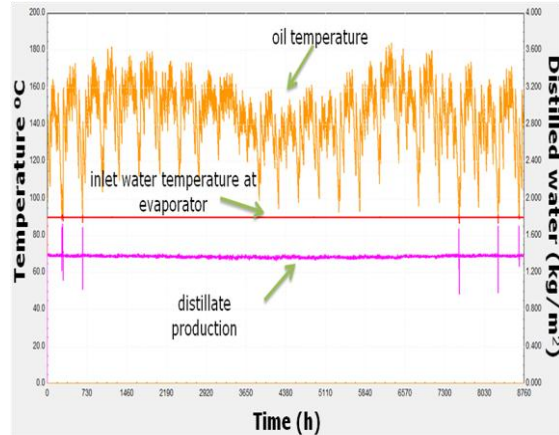


Figura 3. Temperatura del aceite, del agua y producción de destilado.

La producción anual de destilado está directamente relacionada con la cantidad anual de energía solar colectada. La colección de energía solar ocurre durante el periodo diurno, pero el subsistema de evaporación trabaja mientras tiene energía disponible en el almacenamiento térmico, y puede llegar a ser las 24 h del día. En la figura 4, se puede ver que conforme aumenta el volumen del almacenamiento térmico y el número de colectores solares, la cantidad de destilado anual aumenta significativamente. También puede notarse que para pocos colectores solares ( 2, 4 y 6 ), al aumentar el volumen de termo-tanque, la producción de destilado baja, esto debido a que entre más grande sea el termo-tanque se necesita más energía térmica para mantener caliente el aceite y con poco colectores la energía recolectada es insuficiente. Un dato importante es la relación que se tiene entre la cantidad de destilado por metro cuadrado de colector solar utilizado, ya que la máxima eficiencia del sistema se tiene cuando la cantidad de destilado en un metro cuadrado de colector solar sea la más alta. En la figura 5, se puede ver que para un volumen de termo-tanque utilizado corresponde un número óptimo de colectores solares. Al ir aumentando el volumen del termo-tanque el número óptimo de colectores solares requerido también aumenta. Como ejemplo de lo anterior, para un volumen de almacenamiento de 6 m<sup>3</sup>, el número de colectores óptimo está entre 10 y 12. Un aspecto importante es que la producción máxima de destilado, por m<sup>2</sup>, es similar para cualquier arreglo de volumen de termo-tanque y colectores solares. Como ejemplo se tiene que, para volúmenes de termo-tanques de 3, 4 y 5 m<sup>3</sup>, el número de colectores óptimo es 6, 8 y 10 respectivamente, pero la producción anual de destilado, por m<sup>2</sup>, es la misma para los tres casos, aproximadamente 2,800 kg/(año·m<sup>2</sup>). La decisión final deberá basarse en cuál de las combinaciones representa la mejor opción económica.

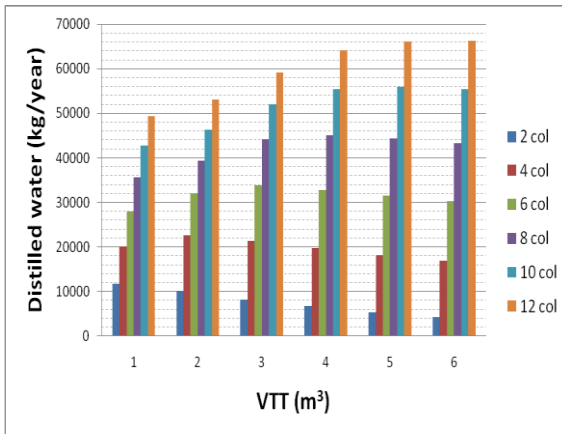


Figura 4. Producción anual de destilado.

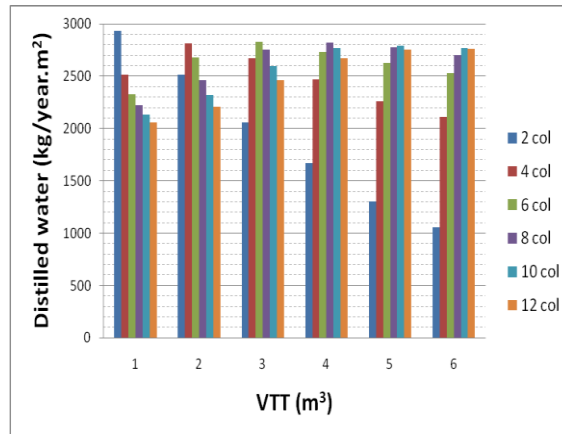


Figura 5. Producción anual de destilado por metro cuadrado de colector solar utilizado

Otro factor que influye en la producción del destilado, es la cantidad de agua que se introduce a la torre de evaporación. Pudiera pensarse que entre más agua se alimente al sistema, se obtendrá más agua destilada, pero no es así. En la figura 6 puede verse que para determinado número de colectores hay un flujo de agua óptimo que se representan por los máximos en la gráfica. Demasiada agua al sistema produciría que el sistema se enfriara y la producción de destilado bajara. Para un caso en particular en un sistema que tiene un termo-tanque de 6 m<sup>3</sup> la máxima cantidad de destilado se obtiene para un

flujo de 70 kg/h de agua y 12 colectores solares. Si se suministra un flujo mayor, la producción de destilado empieza a bajar significativamente. Para obtener volúmenes grandes de agua destilada, se necesita tener sistemas dimensionados apropiadamente, que tengan la capacidad de almacenar la energía suficiente para poder trabajar eficientemente. Para sistemas pequeños se necesita pocos colectores solares, volúmenes de termo-tanques pequeños y poco flujo de agua, pero si se desea incrementar la cantidad de flujo que se introduce al sistema, se tiene que buscar el arreglo adecuado de colectores solares y volumen de termo-tanque. La figura 7 muestra el efecto de utilizar diferentes números de colectores solares, para un volumen de almacenamiento fijo. Se observa que la mayor producción de destilado, en los máximos de las curvas. Puede notarse que al aumentar el número de colectores solares, el máximo de producción ocurre a flujos cada vez mayores, y la producción máxima tiende a estabilizarse. Como ejemplo se observa que, para un sistema dotado con un termo-tanque de 6 m<sup>3</sup> y 10 colectores solares, el flujo de agua de entrada óptimo es de 60 kg/h, obteniendo una producción de destilado de 2,770 kg/m<sup>2</sup>. De lo anterior se observa que la herramienta de simulación aquí presentada permite dimensionar y optimizar un destilador solar con mejor eficiencia teórica que los reportados en la literatura hasta ahora.

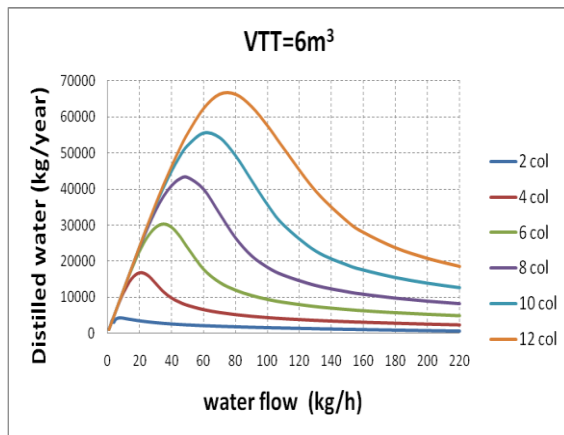


Figura 6. Producción anual de destilado para un volumen de termo-tanque de 6 metros cúbicos.

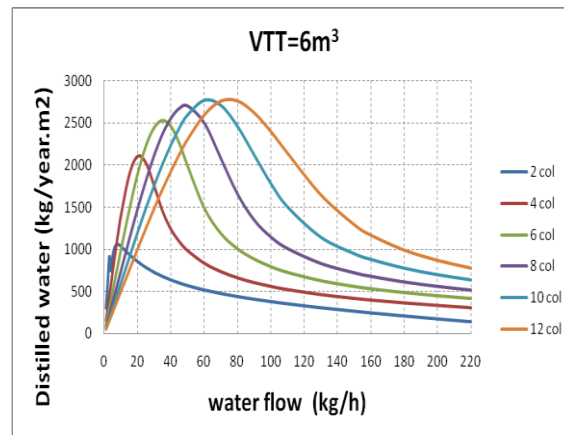


Figura 7. Producción anual de destilado por metro cuadrado de colector solar para un volumen de termo-tanque de 6 metros cúbicos.

## CONCLUSIONES

Se muestra objetivamente que la simulación dinámica permite conocer el comportamiento detallado de cualquier sistema térmico, y en base a ese conocimiento es posible tomar decisiones de diseño que permitan optimizar el funcionamiento del mismo. El proceso de diseño de sistemas térmicos, el comportamiento de la sustancia de trabajo debe ser el objetivo principal de atención, y los dispositivos físicos se deben de seleccionar y dimensionar para que permitan a la sustancia de trabajo comportarse como se desea. El uso de la energía solar ofrece una perspectiva prometedora para la cobertura de las necesidades fundamentales de agua potable en regiones remotas, donde la conexión a la red eléctrica no es factible y donde la escasez de agua potable es grave.

## REFERENCIAS

- Bermudez C., Thomson M., Infield D., (2008). Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico. *Desalination*, v.220, n.1-3, pp.431-440.
- Boucekima B., (2003). A small solar desalination plant for the production of drinking water in remote arid areas of southern Algeria. *Desalination*, v.159, n.2, pp.197-204.
- Escobedo-Bretado, J.A. (2010). Desalinización solar de agua por humidificación-dehumidificación de aire simulado en TRNSYS. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
- Jiang H., (2010). Promotional policy for renewable energy development in Taiwán, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.14, n.3, pp.1079-1087.
- Thomas, K.E. (1997). Overview of village scale, renewable energy powered desalination. National Renewable Energy Technical Report NREL/TP-440-22083. UC Category: 1210. DE97000240.
- Peidong Z., Yanli Y., Jin S., Yonghung Z., Lisheng W., Xinrong L., (2009). Opportunities and challenges for renewable energy policy in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.13, pp.439-449.
- Qiblawey H., Banat F., (2008). Solar thermal desalination technologies. *Desalination*, v.220, n.1-3, pp.633-644.

3<sup>er</sup> Congreso Internacional de  
**energías**  
alternativas

EL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
Y EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA  
Y TECNOLOGÍA AVANZADA UNIDAD QUERÉTARO

Extiende el Presente

# RECONOCIMIENTO

A:

**Ignacio Ramiro Martín Domínguez, Armando Juárez  
Trujillo, María Teresa Alarcón Herrera**

Por su conferencia titulada:

**“Análisis paramétrico de un nuevo sistema para la  
destilación solar de agua mediante simulación dinámica”**

Santiago de Querétaro, 31 de mayo al 3 de junio de 2011.

**Dr. Martín de Jesús Nieto Pérez**

Comité Organizador

**Dr. Jorge Adalberto Huerta Ruelas**

Director

“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”

