

# Diseño de un prototipo de destilador solar con asistencia de intercambiadores eficientes de calor en múltiples fases

Bueno Cebada Salvador <sup>a</sup>, Manzanilla González Fernando O. <sup>b</sup> Ramírez Castillo Ma. Leticia <sup>c</sup>

a. Estudiante de Maestría en Ingeniería con terminal en Diseño de Bioprocesos Universidad Politécnica de Puebla, C. Bonilla, Puebla CP 72640 salbuce1@gmail.com,

b. Profesor Investigador de la Universidad Politécnica de Puebla, C. Bonilla, Puebla CP 72640 f-e-r-oz@hotmail.com

c. Profesor Investigador de la Universidad Politécnica de Puebla, C. Bonilla, Puebla CP 72640 letyram@gmail.com

## Resumen

*Una parte de la ciudad de Puebla utiliza agua dura, lo que ocasiona pérdidas en el gasto familiar debido a los depósitos que se forman como precipitado en los calentadores tradicionales a gas y/o eléctricos dañan los equipos. Los diseños de los prototipos que presentan diversos autores son de una o dos pendientes y con bandeja de acero que contiene al agua a evaporar, lo que presenta oportunidades de mejora para la producción del agua destilada. En este artículo se propone el diseño y construcción de un destilador solar con su modelo matemático que comprende diferentes partes: colectores de calor y el de transferencia de masa del destilador, que es la parte sustancial en donde radica el alcance inicial del proyecto. Constituye así una alternativa, en el contexto de la implementación de energías alternas, para producir agua sin sales, mediante el desarrollo y uso eficiente de las tecnologías para éste fin, al diseñar un equipo destilador de agua asistido con calentadores de energía solar.*

## Introducción

Actualmente el agua potable se encuentra en una situación comprometida, además que es cada vez más escaso debido a factores diversos entre los que destacan los usos que tiene el agua potable, es en las actividades productivas y domésticas donde se utiliza una gran parte de este preciado líquido.

Se afirma que la gran mayoría de los recursos hídricos de la tierra consisten en agua salada. “Solamente un 2.5% del agua de la Tierra se compone de agua dulce. Aproximadamente un 70% del agua dulce del planeta se encuentra encerrada en el hielo de Groenlandia y la Antártida, dejando tan sólo un 0.7% en forma líquida en el planeta. De este 0.7%, aproximadamente un 87% es utilizado por el sector agrícola” [1]. Estos porcentajes demuestran el problema de la escasez de agua para la raza humana (la escasez equivale al acceso a menos de 1700 m<sup>3</sup> por año por persona). Por lo que la acción del ser humano para evitar el desperdicio de agua por medio de la reutilización es una práctica que se debe realizar de manera cotidiana.

El uso de energía que no dañe al medio ambiente como los combustibles fósiles es una alternativa que cada vez está cobrando más auge a nivel mundial, y en México no es la excepción.

Las propuestas de aportaciones a la vivienda urbana en lo que al estrés hídrico refieren hay actualmente una serie de artefactos alternativos para el tratamiento de agua utilizando energía renovable, entre los que destacan los destiladores con asistencia de energía solar [2].

En los productos que resultan del reciclaje se han identificado una amplia gama de productos para el reciclaje de aguas grises que se comercializan en Estados Unidos y países de Europa [3], donde este recurso natural es altamente valorado y tiene un costo mucho mayor.

En la búsqueda de tecnologías y metodologías para tratar el agua por medio de destilación solar se encontraron los trabajos donde observan en los reportes de múltiples investigaciones con resultados satisfactorios en cuanto a sus objetivos de destilar agua mediante prototipos compactos y muestran rendimientos que van desde los 0.35 L/día [4], 6.7 L/día [5] hasta 10.05 L/día [6]. Asimismo las reportan temperaturas obtenidas en colectores y destiladores solares que se encuentran en el rango de temperaturas que van de 50 a 80 °C, y en algunos casos hasta los 95°C.

Existe la propuesta del diseño y construcción de un calentador solar de tubos al vacío en el cual evalúa la eficiencia de éste, reporta que aproximadamente del 81,8 %, y se pudo comprobar que los calentadores con tecnología de vacío son superiores a los calentadores convencionales de acuerdo con su planteamiento del problema [7].

En cuanto a concentradores solares de tipo parabólico se hallan trabajos relacionados como es el de Vidriales [8] quien reporta como objetivo principal diseñar, construir y evaluar un sistema de concentrador solar de canal parabólico (CCP) para la producción directa de vapor de agua con baja entalpía. Es decir generar vapor a 120°C y con una presión absoluta cercana a 1.7 Bar a partir de energía solar.

Las tecnologías en la destilación de agua aplicadas para desalinización de ese líquido se pueden clasificar

como térmicas si logran la separación del agua y las sales mediante aporte de calor, o de membrana; existen diferentes técnicas de destilación de bajo coste pero que no se han utilizado en forma industrial [9] como son:

- Destilación flash multietapa (MSF).- En el proceso de destilación flash multietapa el agua de mar es evaporada mediante la reducción de la presión (por debajo de la temperatura de saturación) mientras se incrementa la temperatura, con lo que se consigue que la evaporación suceda de forma casi inmediata.
- Destilación multietapa (MED).- Es el sistema de evaporación más antiguo y está basado en los principios de evaporación y condensación.
- Destilación de vapor comprimido (VCD).- En este proceso el vapor de la última etapa es comprimido y transportado a la primera etapa, donde cede su calor a la corriente de alimentación, produciéndose simultáneamente la evaporación de la corriente de alimentación y la condensación del destilado.

El objetivo del presente trabajo construir de un prototipo de destilación que usará la asistencia de la energía solar para la depuración por evaporación de aguas duras, que servirá a los laboratorios de Ingeniería en Biotecnología y Posgrados de la Universidad Politécnica de Puebla. Por otro lado se explorará la utilidad de éste prototipo para recuperación de agua y/o solvente procedente de laboratorios de Biotecnología UPPUE con aguas contaminadas con solvente.

**Materiales y métodos**

En el presente trabajo se utilizaron cuatro fases de un sistema el cual consta de:

1. Calentador de agua por medio de tubos evacuados con recipiente vertical,
2. Concentrador parabólico de energía solar,
3. Evaporador de efecto simple y
4. Condensador.

Se espera que con el sistema propuesto se logre una eficiencia aceptable para obtener la desalinización de agua (Figura 1).

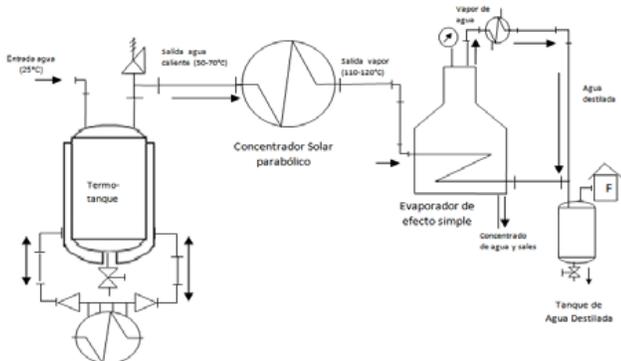


Figura 1 DTI del prototipo de Destilador Solar

**Calentador de agua por medio de tubos evacuados con recipiente vertical.**

Se realiza la construcción de un colector solar por medio de cuatro tubos evacuados con la características esenciales de tener una máxima eficiencia y rapidez de calentamiento, actúan con un sistema de termosifón y con un tanque de almacenamiento vertical de 29.5 Lt. La diferencia con los modelos comerciales es la inclinación de los tubos de 17° respecto a la horizontal y el recipiente vertical ya que permite una estratificación en la temperatura del agua contenida en su interior y el aislamiento de las tuberías de conexión. El área de captación por cada tubo de 0.575 m<sup>2</sup> y una capacidad de 1.2064 Lt, la separación entre tubos es de 0.07 m.

Para la construcción del calentador por tubos evacuados se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. A los tubos evacuados se les adaptó un mecanismo para conectarlos con reducciones tipo bushing al conector macho de PVC de uso hidráulico de 1.5, pulgadas; para conectar o desconectar para su mantenimiento preventivo, o reemplazarlos de forma más sencilla en caso de ser necesario.
2. Se fabricó una conexión con un niple de tubería de acero galvanizado de 2 pulgadas cédula 40, con dos entradas de 1 pulgada y cuatro salidas de 1 pulgada.
3. Se realizó la construcción del aislamiento del termotanque y las tuberías de conexión hacia los tubos evacuados (figura 2).



Figura 2. Calentador con tubos evacuados con separación de 0.07 m entre ellos y conectados al termotanque con aislamiento.

Se propone la siguiente Ecuación 1, con la que se busca calcular la eficiencia del calentador de tubos evacuados, con las temperaturas en el agua de entrada y salida del termotanque, empleando la ecuación que utiliza Soto [11]:

$$\eta = \frac{(m)(Cp)(T_2 - T_1)}{(I)(A_c)} \dots \text{Ecuación 1}$$

### Concentrador solar parabólico

Se utiliza un concentrador solar parabólico construido en la Universidad Politécnica de Puebla, mismo que estará conectado en la entrada de este con la salida del calentador solar de tubos evacuados, se busca que en ésta fase del proceso se consiga aumentar la temperatura del agua proveniente del calentador solar y generar vapor a temperaturas mínimas de 100°C, mismas que servirán de alimentación de vapor; medidas del evaporador son: 2.4 m de largo por 1 m de alto (Figura 3).

Pérez propone las siguientes expresiones matemáticas que describen el comportamiento de energía de un concentrador solar parabólico fabricado en la Universidad Politécnica de Puebla [12]. Y las ecuaciones de energía de entrada y salida del precalentador de agua y del canal parabólico del generador de vapor proporcionada por [13]:

$$E = V * C_p * \rho * \Delta T \dots \text{Ecuación 2}$$

Potencia instantánea en el canal parabólico.

$$P_{inst} = A * I * F_c \dots \text{Ecuación 3}$$

Se propone la Ecuación 4, para la eficiencia térmica “ $\eta$ ” de un Concentrador Solar Parabólico y al mismo tiempo la define como el cociente de la energía útil capturada o ganada, con la radiación incidente en el plano de apertura.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a S} \dots \text{Ecuación 4}$$



Figura 3. Concentrador parabólico con el que se trabajará para la generación de vapor

### Evaporador de paso simple

Se busca que el vapor generado por los sistemas de calentador y concentrador parabólico pasen a través de un evaporador de paso simple en un serpentín de tubo de cobre flexible de media pulgada en un solo paso y entre en contacto en forma rápida con el agua contenida en el evaporador a través del contacto del tubo con el vapor y el líquido concentrado para que este alcance la a la temperatura de evaporación y se

puede enfriar a en cuanto abandone el evaporador. Se ilustran los pasos descritos, para la limpieza y adaptación del intercambiador de calor (Figura 4).



Figura 4. Limpieza y adaptación del intercambiador de calor que servirá de evaporador de paso simple, montado sobre la estructura que lo soporta, incluye conexiones de tuberías necesarias y con un manómetro.

Se trabajará con las siguientes expresiones para el evaporador de paso simple. El balance de entalpía para el lado del vapor de agua es:

$$q_s = \dot{m}_s(H_s - H_c) = \dot{m}_s \lambda_s \dots \text{Ecuación 5}$$

El balance de entalpía para el lado de la disolución es:

$$q = (t_i - \dot{m}_s)H_v - \dot{m}_f H_f + \dot{m}H \dots \text{Ecuación 6}$$

En ausencia de pérdidas de calor, el calor transmitido desde el vapor de agua hacia los tubos es igual al transmitido desde los tubos hacia la disolución y, por tanto:

$$q_s = q \dots \text{Ecuación 7}$$

Igualando entonces las ecuaciones 7 y 8, se tiene:

$$q_s = \dot{m}_s \lambda_s = (\dot{m}_f - \dot{m})H_v - \dot{m}_f H_f + \dot{m}H \dots \text{Ecuación 8}$$

### Condensador

Para ésta parte del proceso se propone utilizar un condensador de carcasa y tubos, la carcasa será de 3 pulgadas, con 6 tubos de CPVC de 3/4 de pulgada una longitud de 1m y colocados en arreglo triangular; de aquí se espera obtener como producto el agua destilada que será captada en un recipiente de acrílico.

La cantidad de calor necesaria para condensar una masa dada de un fluido a temperatura de saturación [14]:

$$Q_h = \dot{m}_h C_{p_h} \Delta T_h \dots \text{Ecuación 9}$$

Área del intercambiador ( $m^2$ ):

$$A_o = (NTU * C_{min}) / U \dots \text{Ecuación 10}$$

Razón máxima de transferencia de calor en el intercambiador:

$$Q_{max} = C_{min} (T_{h ent} - T_{c ent}) \dots \text{Ecuación 11}$$

Número de tubos en Intercambiador de tubo y coraza con un Largo de 1 m:

$$n = A_o / \pi DL \dots \text{Ecuación 12}$$

### Resultados y pruebas preliminares

Se construyó el colector solar por tubos evacuados y se conectó al concentrador parabólico para dirigir posteriormente el flujo de vapor hacia el evaporador de paso simple, y después se conecta al condensador de recto, finalmente se recibe el condensado en el recipiente de acrílico, se muestra en la Figura 6 el Prototipo del de destilación solar, enumeradas las partes que lo componen:

1. Calentador de tubos evacuados,
2. Concentrador solar parabólico,
3. Evaporador de paso simple,
4. Condensador, y
5. Recipiente receptor de destilado.

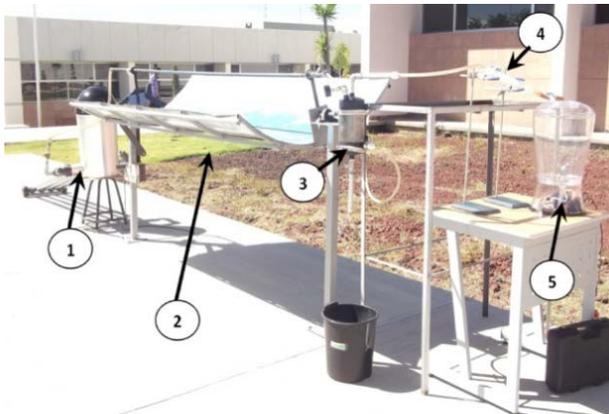


Figura 5. Prototipo de destilador solar

### Pruebas en el Colector solar de tubos evacuados

Se realizaron dos pruebas con el colector solar de tubos evacuados:

- a. Prueba de calentamiento en condiciones de ausencia de aislamiento
- b. Prueba de calentamiento en condiciones de aislamiento.

La prueba consistió en calentar el agua en el colector solar y registrar las temperaturas alcanzadas en cada condición de operación del dispositivo.

En ambas pruebas se verificó la temperatura con un termómetro de mercurio y la incidencia de la radiación

solar, por medio de un Piranómetro (Mac Solar), que tiene la capacidad de medir la radiación solar, la humedad relativa y la temperatura ambiente (figura 6).



Figura 6. Ejemplo de medición de la irradiación solar incidente en los tubos evacuados.

### a. Prueba de calentamiento en condiciones de ausencia de aislamiento

En esta prueba se conectaron los tubos de vacío al tanque de almacenamiento, esto permitió observar si existían fugas en las tuberías y al mismo tiempo hallar valores experimentales acerca del calentamiento en los tubos evacuados y la temperatura que alcanzaba el agua en el dispositivo, en la Figura 7 se puede apreciar el colector solar por tubos evacuados sin aislamiento, esto se llevó a cabo el 14 de octubre de 2013, en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Puebla.



Figura 7. Colector solar de tubos evacuados sin aislamiento

### b. Prueba de calentamiento en condiciones de aislamiento

En esta prueba se conectaron los tubos de vacío al tanque de almacenamiento, para hallar valores experimentales acerca del calentamiento en los tubos evacuados y la temperatura que alcanzaba el agua en el dispositivo, en la figura 2 se observa el colector solar por tubos evacuados tanto el termotanque como las tuberías que lo conectan a los tubos evacuados cuentan con aislamiento térmico del medio ambiente, esto se llevó a cabo el 29 de octubre de 2013, en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Puebla.

La eficiencia que se obtuvo en la prueba de calentamiento del colector por tubos evacuados se muestra en la siguiente figura 9, y se compara con las eficiencias que reporta para colectores de tubos evacuados y de placa plana.

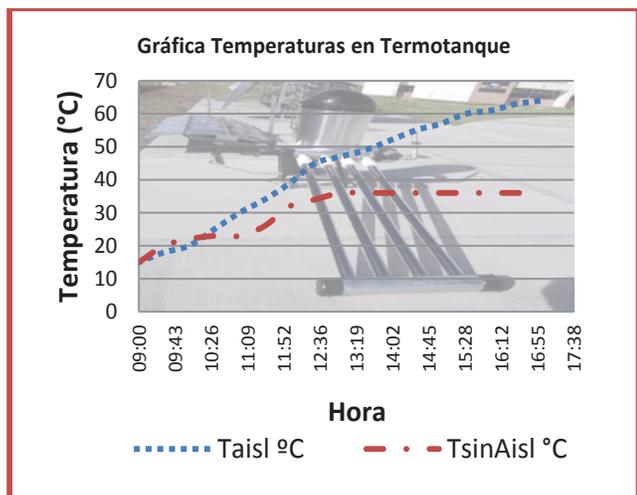


Figura 8. Temperaturas obtenidas en la prueba empírica del colector solar por tubos evacuados en diferentes condiciones de aislamiento.

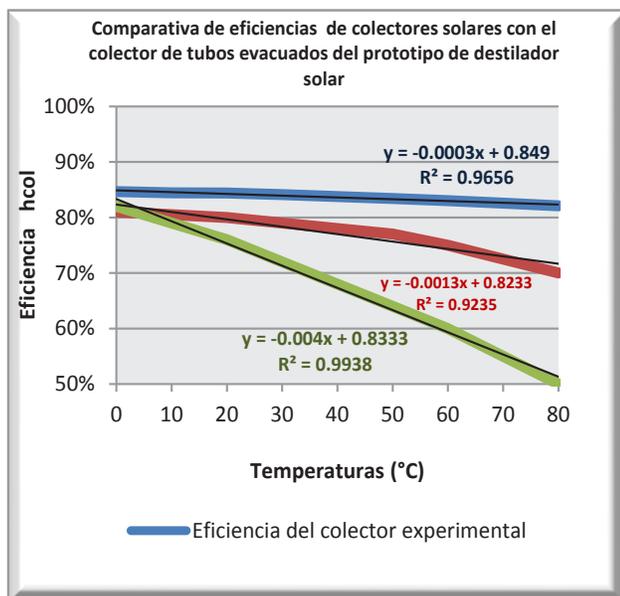


Figura 9 Comparativa de eficiencia de colectores solares con el colector de tubos evacuados del prototipo de destilador solar

## Referencias

[1] Climate, Institute. [Online]. <http://www.climate.org/topics/water-espagnol.htm>

[2] G. J.F., Soriano, P. N.J y Arista, G. Madrigal, *Agua potable, disponibilidad en México, estrés hídrico, aportaciones a la vivienda urbana.*: Ide@s CONCYTEG, 2012, vol. 7.

[3] L. D. F. Pinzón, *Plan de negocios para la creación y constitución de una empresa que fabrique y comercialice un sistema doméstico de reciclaje de aguas grises. Tesis de Grado.* Bogotá, D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Carrera, 2011.

[4] F. S, Abdala, R. J. L y Villafane, G. Fonseca, "Prototipo de destilador solar de fibra de vidrio.", vol. XXV, 2005, pp. 57-64.

[5] C. I y Rosales, C. J. Chinnapi, "Destilador de agua solar alternativa para potabilizar agua en zonas rurales. Determinación de costos.", vol. VI, pp. 70-76, 2007.

[6] J., Galimberti, P., Tobar, N., Adaro, J., Amílcar, F. Marchesi, "Determinación experimental de la producción de un destilador solar.", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 13, pp. 105-111, 2009.

[7] C. V. M. Salcedo, *Influencia del estudio de la tecnología de vacío en tubos sobre la eficiencia para el calentamiento de agua usando la energía solar. Tesis. Carrera de Ingeniería Mecánica.* Ambato, Ecuador.: Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, 2011.

[8] E. L. G. Vidriales, *Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para Calor de Proceso. Tesis de Posgrado.* México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigación en Energía, 2007.

[9] B. P. Díaz, *Materiales de carbono para desalinización de aguas mediante des ionización capacitiva. Tesis de Grado Master.* Oviedo, España: Universidad de Oviedo. Departamento de Química Orgánica e Inorgánica, 2012.

[10] G. W. Puente, H. R y Gutiérrez, M. V. Soto, "Eficiencia térmica de un calentador solar de agua con tubos evacuados", Guadalajara, Jalisco, México., 2010.

[11] C. A. Pérez, (2012). *Diseño e implementación de un medidor de energía aplicado al generador de vapor de la Universidad Politécnica de Puebla. Proyecto final de investigación (Tesis Profesional).* San Mateo Cuanalá, Mpio. Juan C. Bonilla, Pue.: Universidad Politécnica de Puebla, 2012.

[12] M. F. O. González, *Generador de vapor por medio de energía solar.* UPPUE. Juan C. Bonilla, Puebla: Universidad Politécnica de Puebla, 2012.

[13] M. D., López, O. M. Bravo, "Modelo matemático de un tubo intercambiador de calor.", vol. 4, no. 2, pp. 520-523, 2009.

[14] I. De Bustamante, "La reutilización de aguas regeneradas en España: ejemplos de aplicación en el marco del proyecto Consolider-Tragua.", vol. 2, no. 1, pp. 1-17, Marzo 2010.

[15] CONAGUA. (2011, Marzo) Estadísticas del agua en México. [Online]. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)

## Nomenclatura:

- $\eta$  = Eficiencia térmica (adimensional)
- $m$  = masa (kg)
- $C_p$  = Calor específico a presión constante en (Calor específico (KJ/Kg°C)
- $T_1$  = Temperatura absoluta de entrada al termotanque (°C)
- $T_2$  = Temperatura absoluta de salida del termo tanque (°C)
- $I$  = Irradiancia solar en (W/m<sup>2</sup>)
- $A_c$  = Área del colector solar (m<sup>2</sup>)
- $E$  = Energía (KJ)
- $V$  = Volumen (Lts)
- $\rho$  = Densidad (lbm/ft<sup>3</sup>, kg/m<sup>3</sup>)
- $\Delta T$  = Diferencia de temperaturas
- $P_{inst}$  = potencia instantánea
- $A$  = Área (m<sup>2</sup>)
- $F_c$  = Factor de corrección
- $Q_u$  = potencia útil (J).
- $A_a$  = Área de apertura del colector (m<sup>2</sup>).
- $S$  = Radiación solar absorbida en el plano de apertura (W/m<sup>2</sup>)
- $q_s$  = velocidad de transmisión de calor a través de la superficie de calefacción desde el vapor de agua ( lb/h)
- $\dot{m}_g$  = Velocidad de flujo del vapor de agua ( lb/h)
- $H_s$  = Entalpía específica del vapor de agua (Btu/lb)
- $H_c$  = Entalpía específica del condensado (Btu/lb)
- $\lambda_s$  = Calor latente de condensación (Btu/lb)
- $H_v$  = Entalpía específica del vapor (Btu/lb)
- $H_f$  = Entalpía específica de la disolución diluida (Btu/lb)
- $H$  = Entalpía específica de la disolución concentrada (Btu/lb)
- $t_i$  = Velocidad de flujo del concentrado (lb/h)
- $Q_L$  = Cantidad de energía (J).
- $h_{fg}$  = Calor latente de vaporización (J/Kg)
- $L$  = Largo del condensador (m)
- $D$  = Diámetro del tubo condensador ( m)
- $Q_s$  = Calor cedido (J)
- NTU = Número de Unidades de Transferencia