



Revista AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica

Volúmen 1, número 3, año 2007 ISSN 0718-378X
PP

Destilación solar tubular una opción para obtener agua potable a partir de aguas salobres para comunidades rurales

TUBULAR SOLAR DISTILLATION: AN OPTION TO OBTAIN DRINKING WATER
FROM SALINE WATERS TO SUPPLY RURAL COMMUNITIES

Fuentes Díaz M.
González Herrera A.
Montellano Palacios L.
Chacón Castillo J. M.
Ramírez González A.
Garrido Hoyos S.E.

ABSTRACT

This study presents the development of two systems of tubular solar still based in works made by the University of California in the United States in the 50's, and by Japanese investigators in 2003 (Teruyuki et. al.). These distillers were evaluated and compared with the efficiencies obtained in the work of Teruyuki, to determinate, if these prototypes produce enough drinking water for supply five members of a family (2 liters per person per day, It is the minimum requirements for ingestion) which lives in rural areas with problems of brackish water. The objective of the present work was to design a solar desalination system of easy construction, installation, operation and little maintenance for rural communities (family level). The goal of these distillers is to obtain 10 liters of drinking water per day and it is for 5 members of one family. The evaluated reactors were: a modified tubular solar still (TSS), a concentrator parabolic compound (CPC) mounted in a TSS and a conventional stairway still (CSS). The material of the body of the TSS was of acrylic of 6 inch of diameter and one meter of length, the trough of the TSS and the stairs of the conventional distiller were cover with epoxy black paint of food type degree. The units of this system were: storage tank (450 L), solar heater (for preheated purposes) and the three distillers (TSS, CPC and CSS) which worked at the same time. In the storage tank was prepared an artificial solution of salt, sea salt was used in concentration of 5 to 12 g/L diluted with tap water. The distillers operated during 121 days; the preheated water was distributed in the 3 reactors at the same time. The measured parameters were: conductivity, % of salinity, total dissolved solids (TDS), pH, volume of distilled (fresh water), volume of brine and solar intensity. After 60 days of operation volatile organic compounds were analyzed.

The results showed that the best production in liters per day was the CSS, however the maximum production by occupied area per day was obtained with the DTS 5.6 L/m² d with preheating, and without preheating the production was reduced to 2.96 L/m² d. The arithmetic mode production for the DTS with preheating was of 1.79 L/m² d and 0.44 L/m² d for the CSS. It indicates that is necessary to build 36 DTS and there required 5.6 m² of area or 29 conventional stairway still with 24.36 m² occupied area. The construction and installation cost of each type of distiller would be of 3,507 USD for the DTS and 7,482 USD for the CSS, included the preheated, hydraulic installation, and the distillers (DTS or CSS respectability). In both case, the cost is very high for rural communities, for what other materials must be studied to build the distillers. Also volatile compounds in the fresh water were evaluated after 60 days of operation and it was found chloroform and Toluene at concentrations over the European Union norms for what it is necessary to monitor the water quality of the fresh water, once selected the materials for building them.

Key words: tubular solar, distillation equipment, composite parabolic concentrator, saline water

II-Fuentes-México-1

Destilación solar tubular una opción para obtener agua potable a partir de aguas salobres para comunidades rurales

Fuentes Díaz M. ⁽¹⁾

Maestro en Ingeniería Ambiental, UNAM. Actividades: investigación, desarrollo y transferencia de tecnología de tratamiento de agua; Tratamiento aerobio y anaerobio de aguas residuales, evaluación de plantas potabilizadoras, desalación de agua empleando energías no convencionales, remoción de contaminantes específicos para agua potable. Actualmente labora en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, como responsable del proyecto de desalación de agua empleando energías no convencionales.

González Herrera A.

Master en Contaminación Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Actividades: investigación, desarrollo y transferencia de tecnología de tratamiento de agua; Saneamiento básico; desinfección solar para pequeñas comunidades, filtración en múltiples etapas, evaluación de plantas potabilizadoras y desalación por radiación solar

Montellano Palacios L.

Químico Industrial, UAEM, Facultad de Ciencias Químicas e Industriales. Maestría en Administración, UAEM, Facultad de Contaduría y Administración. Proyectos: Disposición final de los lodos producidos en la potabilización del agua, eliminación de precursores de trihalometanos mediante adsorción específica en minerales que contienen calcio, evaluación de plantas potabilizadoras.

Chacón Castillo J. M.

Maestro en Ingeniería Ambiental. Publicación de 7 artículos en revistas arbitradas, congresos internacionales y nacionales. Especialista en diseño, evaluación y modelación de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Línea de investigación, degradación de compuestos recalcitrantes por procesos fotocatalíticos empleando energía solar como fuente de energía.

Ramírez González A.

Maestro en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. 27 años de experiencia en diversas actividades de Ingeniería Civil, 21 de ellos en el sector agua. Actividades docentes: Profesor y Coordinador de la Maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM, Campus Morelos; Instructor de curso cortos de capacitación (30), en Ingeniería Ambiental.

Garrido Hoyos S.E.

Dra en Ciencias Químicas por la Universidad de Granada (España). Diversas publicaciones en revistas internacionales, nacionales, congresos, capítulos de libro, libros electrónicos, libro, etc., en temas relacionados con plantas potabilizadoras para comunidades rurales, captación y tratamiento de agua de lluvia, eliminación de arsénico; tratamiento de aguas residuales urbanas por sistemas biológicos e industriales

Dirección (1): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532 Edificio 9 PB, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550-México Tel +52(777) 329-36-00 ext. 157 – Fax +52(777)319-43-81. e-mail: mfuentes@tlaloc.imta.mx o fuentesd2003@yahoo.com

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue el diseñar un sistema de desalación de fácil instalación y poco mantenimiento, que utilice energía solar para este propósito, pensado para comunidades rurales a nivel familiar, y obtener 10 litros del agua potable al día. Los reactores evaluados fueron: un destilador tubular solar (DTS) modificado, un concentrador solar parabólico (CPC) con un DTS acoplado y un destilador convencional de escalera. El material del DTS fue de acrílico con diámetro

de 6" y longitud de un metro, las canaletas tanto del CPC como del DTS y las escaleras del destilador convencional fueron pintadas con pintura epóxica color negro grado alimenticio. Los reactores fueron alimentados con agua artificial preparada con sal de mar a concentraciones de 5 a 12 g/L diluida con agua de la llave, esta fue conducida a un calentador solar. Los destiladores operaron durante 121 días, el agua precalentada era distribuida en los 3 reactores conectados en paralelo. Los parámetros medidos fueron: conductividad, % de salinidad, sólidos disueltos totales, pH, volumen de destilado, volumen de salmuera e intensidad solar. Después de 60 días de operación se analizaron compuestos orgánicos volátiles. Los resultados mostraron que la mayor producción la obtiene el destilador convencional de escalera, sin embargo la mayor producción por metro cuadrado ocupado se obtuvo con el DTS con 5.6 L/m² d con precalentamiento y sin precalentamiento con 2.96 L/m² d. La producción empleando la moda con calentamiento fue de 1.79 L/m² d para el DTS y de 0.44 L/m² d para el destilador de escalera, lo indica que se requieren 36 reactores tipo DTS que ocuparían un área de 5.6 m² o 29 destiladores convencionales de escalera que utilizarían un área de 24.36 m². El costo de construcción e instalación de cada tipo de destilador sería de 3,507 USD para el DTS y de 7,482 USD para el destilador convencional, considerando los materiales utilizados. El costo es muy elevado en ambos caso por lo que se estudiarán otros materiales para construir los DTS. También se evaluaron compuestos volátiles en el destilado y se encontraron concentraciones de cloroformo y tolueno (66 y 55.5 µg/L respectivamente) fuera de las normas internacionales de la Unión Europea (44 y 24 µg/L), por lo que es necesario vigilar la calidad del agua destilada una vez seleccionados los materiales para construir los destiladores solares.

PALABRAS CLAVE

Destilador tubular solar (DTS), concentrador parabólico compuesto (CPC), aguas salobres, destilado, intensidad solar, salmuera

INTRODUCCIÓN

La distribución del agua potable en México no es la suficiente para abastecer gran parte de las zonas rurales, principalmente en las costas del país. El tipo de suelo y la sobre explotación es la principal causa de que los acuíferos de agua dulce se contaminen con agua marina y ocasiones la intrusión llega de dos a cinco kilómetros tierra adentro en temporada de estiaje, inclusive en zonas donde la lluvia es abundante como es el caso de toda la rivera Maya en el estado de Quintana Roo. Actualmente, las poblaciones rurales que se encuentran en dicho corredor únicamente cuentan con agua salobre para todos sus usos y cuando hay recursos, compran el agua de garrafón para beber o cocinar. En las costas de la zona norte, principalmente en el pacifico mexicano, además de la intrusión salina la escasez es otro factor que complica el problema. En el centro del país, existen comunidades y municipios que además de la escasez, el agua contiene altas concentraciones de sales en forma de carbonatos, bicarbonatos y algunos metales como el arsénico. Figura 1

Figura 1.- Zonas de escasez y/o intrusión salina

Los primeros destiladores solares fueron desarrollados en la Universidad de California en el año de 1952 y operaron hasta el año 1956, estos fueron elaborados con material de vidrio y tapas de madera, obteniendo eficiencias de $8.14 \text{ L/m}^2 \text{ d}$, considerando únicamente el área útil del reactor y con precalentamiento. En el año 2003, un grupo de japoneses desarrollaron un proyecto trabajo en Arabia Saudita retomando los destiladores solares tubulares, pero el material empleado fue el PVC, el estudio estuvo enfocado a parámetros termodinámicos del reactor y se obtuvieron eficiencias de $2.5 \text{ L/m}^2 \text{ d}$, sin precalentamiento. La ventaja de estos reactores es el poco espacio que ocupan y el bajo mantenimiento que requieren para producir agua baja en sales a partir de agua salobre (concentraciones hasta $10,000 \text{ mg/L}$ como sólidos disueltos) Figura 2.

Figura 2.- Destiladores solares tubulares (TSS en ingles)

OBJETIVO

Desarrollar y construir un destilador tubular solar con un material resistente, de bajo mantenimiento, para determinar el número de reactores requeridos para producir 10 litros de agua baja en sales al día, utilizando como fuente de abastecimiento agua salobre y considerando un consumo de dos litros por habitante al día.

METODOLOGÍA

Se desarrollaron dos tipos de destiladores solares; el primero denominado DTS (destilador tubular solar), el cual se fabricó a partir de un tubo de acrílico de 6" de diámetro y 1 m de longitud, en su interior se colocó una canaleta de acero galvanizado recubierto con pintura epóxica curada con poliamida grado alimenticio (para uso en agua dulce o salada o para ambientes severos). El concentrador parabólico compuesto (CPC) es un tubo de las mismas dimensiones que el DTS pero éste se montó en un concentrador parabólico solar. En ambos casos se colocaron a desnivel para recibir el destilado, manteniendo la canaleta en el interior del reactor en forma recta para darle salida a la salmuera como se muestra en las Figuras 3 y 4.

Figura 3 Destilador tubular solar Figura 4 Concentrador parabólico compuesto

Así mismo se construyó un calentador solar, el cual tendrá tres funciones; mejorará la eficiencia del sistema, proporcionará de agua caliente a la familia durante el día para bañarse y ayudará a obtener agua baja en sales durante la noche. Los reactores fueron alimentados en continuo, utilizando un tanque de abastecimiento con un volumen de 450 L, en este se preparó una solución salina artificial a una concentración promedio de 10 g/L , utilizando sal de mar mezclada con agua potable de la llave. El agua salobre del tanque fue alimentada a un calentador solar y de ahí fue conducido a los 3 destiladores; DTS, CPC y a un destilador de escalera que sirvió como testigo, este fue construido de acero recubierto con pintura epóxica grado alimenticio y con una cubierta de vidrio en la zona de condensación, recubierto en la zona inferior de las escaleras con laminas de unicel para disminuir las pérdidas de calor. Las figuras 5 y 6 muestran el calentador solar y el arreglo de los reactores respectivamente.

Figura 5 Calentador solar Figura 6 Arreglo del calentador solar, DTS yCPC

Los destiladores operaron en continuo durante 121 días (otoño e invierno), se analizaron los siguientes parámetros; A la entrada a los destiladores, destilado (producto) y salmuera: temperatura, conductividad, pH, porcentaje de salinidad, sólidos disueltos totales (SDT). Al destilado y a la salmuera: volumen obtenido. Así mismo, se tomó lectura cada 10 minutos de la

intensidad solar iniciando a las 9:30 y finalizando las lecturas a las 17:30. A la mitad del estudio (día 60) se analizaron compuestos volátiles por cromatografía al destilado.

RESULTADOS

Después de 121 días de operación, el reactor que obtuvo los mejores resultados fue el DTS, alcanzando una producción de agua de 5.4 L/m² d, utilizando el precalentamiento, sin precalentamiento la máxima producción para este reactor fue de 2.96 L/m² d. La producción máxima alcanzada por Teruyuki et al, 2003 fue de 2.5 L/m² d, sin precalentamiento. La producción máxima se alcanzó con intensidades solares promedio de 600 W/m² lo que equivale a 0.96 L/m² h, considerando precalentamiento. Con lo anterior se demuestra que el precalentamiento mejora en casi un 100% la producción de agua desalada. El reactor de escalera que funcionó como testigo y CPC, obtuvieron producciones menores a 2 L/m² d. La producción promedio que se obtuvo durante todo el experimento considerando precalentamiento y que será base de de calculo para determinar el número de reactores es de 2.8 L/m² d, esto equivale a que un reactor tubular solar produce 0.27 L de agua baja en sales por día. Con base en lo anterior se requieren de 36 reactores para producir 10 L de agua al día, requiriendo un área total de 5.6 m², considerando un calentador solar para precalentamiento. Las temperaturas alcanzadas en éste último fueron mayores a 60°C. La calidad del agua obtenida en el destilado del DTS cumple con la norma mexicana para agua potable para sólidos disueltos totales que en promedio fue de 60 mg/L, para el pH fue de 6.5 a 7.0, La figura 7 presenta la producción de cada reactor considerando el área útil de trabajo, con y sin precalentamiento.

Figura 7 Producción de los destiladores solares con base en área útil

La producción de agua desalada por metro cuadrado por día fue mayor durante todo el experimento en el DTS respecto a los otros dos reactores, inclusive sin calentador solar. En la gráfica se divide la producción utilizando el calentador solar y la otra sin calentador, se puede observar como disminuye drásticamente la producción en los tres destiladores.

La siguiente gráfica, muestra los compuestos volátiles detectados a la mitad del experimento (día 60) en el destilado de los tres destiladores y su comparación con la norma mexicana y con algunas normas internacionales. En esta se observa que el destilado cumple con la norma mexicana para 4 compuestos principales; Cloroformo Tolueno, m y p-Xyleno, sin embargo de acuerdo a algunas normas internacionales no cumpliría para Cloroformo y Xyleno.

Grafico 1 Compuestos volátiles presentes en el destilado de los reactores

Compuesto	DTS	Escalera	CPC	NORMATIVIDAD
Cloroformo (µg/L)	66	ND	66	44 (UE) 200 (THM) NOM-127-SSA1-1994 80 (EPA)
Tolueno (µg/L)	55.5	55	55.5	700 NOM-127-SSA1-1994 24-170 (UE)
M-Xyleno (µg/L)	52	52	52	500 NOM-127-SSA1-1994 200 (EH)

ND: no detectado, UE: Unión Europea, EH, enviroment health, NOM-127-SSA1-1994: Norma mexicana que establece los límites permisibles para agua para consumo humano

Con lo anterior se demuestra que es necesario evaluar la calidad del destilado producido, ya que en la mayoría de los destiladores solares se utiliza pintura negra en la base para mejorar la eficiencia de los reactores. Sin embargo, la pintura elaborada a base de solventes, ésta se volatiliza por efecto de los rayos solares y los compuestos volátiles se incorporan al destilado, lo que provocaría un problema

de salud a largo plazo. No existen estudios al respecto por lo que será necesario estudiar más a detalle el material utilizado para recubrir la canaleta o bases de los destiladores convencionales, así como el material utilizado para construir el DTS.

Realizando el análisis de costo para producción de 10 L de agua al día empleando los DTS o los destiladores convencionales de escalera. El primero ocupa un área de 5.6 m^2 y el costo utilizando los materiales arriba mencionados sería de 3,507 USD. El segundo ocuparía un área de 24.36 m^2 y tendría un costo de 7,482 USD.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El CPC no presenta resultados favorables debido al área que ocupa y lo complicado de su construcción, por lo que éste no cumple con el objetivo del presente trabajo y no se recomienda.

El corte, armado y alineado de las canaletas son fundamentales para que el sistema funcione adecuadamente, la mala alineación de las mismas provocaran cortos circuitos en el sistema.

Todos los destiladores solares requieren de un periodo de curado que puede ser de una semana o más. Sin embargo es necesario evaluar la calidad del destilado, después de largos periodos de operación, debido a que en este trabajo se encontraron rastros de compuestos volátiles como el cloroformo y Tolueno después de 121 días de operación y estarían fuera de norma de acuerdo a algunas normas internacionales (Unión Europea y Environment Health)

El DTS demostró obtener las mejores eficiencias de producción por área útil, obteniendo valores máximos de $5.4 \text{ L/m}^2 \text{ d}$ y en promedio $2.8 \text{ L/m}^2 \text{ d}$, mejorando la eficiencia obtenida por Teruyuki que fue de $2.5 \text{ L/m}^2 \text{ d}$ como máximo y con respecto a los reactores de vidrio desarrollados en la Universidad de California, el DTS resulta ser menos eficiente en un 33%, sin embargo el material empleado es mas resistente y tiene una vida útil mayor que el vidrio.

El acrílico va perdiendo transparencia durante la operación del sistema, en la zona de condensación y por tanto disminuye su eficiencia, por lo que será necesario evaluar otros materiales resistentes, que no pierdan transparencia y más económicos

Los mejores resultados se obtienen utilizando el precalentamiento por lo que se recomienda su uso ya que duplica la eficiencia de los reactores, el agua precalentada en el día, puede aprovecharse para contar con agua caliente para la ducha, ya que no todo el volumen del agua se utiliza para los destiladores.

Para evitar pérdidas de temperatura del agua precalentada durante su conducción del calentador solar a los destiladores es necesario aplicar un recubierto térmico a las tuberías para evitar la pérdida de energía.

Respecto a los sólidos disueltos, estos sistemas remueven un 99.4% (disminuye SDT de 10 g/l a 60 mg/L).

Para producir 10 litros de agua, es necesario instalar 36 reactores de este tipo y estos ocuparían un área de 5.6 m^2 y un costo 3,507 USD, lo cual es muy elevado para aplicarlo en comunidades rurales, por lo que será necesario estudiar otros materiales más económicos y resistentes para fabricar los DTS.

Los reactores convencionales de escalera son eficientes, pero el costo y el área que ocupan no compiten con el DTS

Agradecimientos: Evelin K. Martínez Espíndola por su trabajo en el seguimiento de los reactores, Dr. Erick Bandala por su apoyo en la elaboración de análisis de compuestos volátiles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ÁLVAREZ M. La Destilación Solar [en línea]. Cuba, 2000. [citado el 8 de diciembre del 2004]. Disponible para World Wide Web: <http://www.eyt.cubasolar.cu/energia/Energia16/HTML/articulo03.htm>

2. BLANCO J. Desarrollo de colectores solares CPC para aplicaciones fotoquímicas de degradación de contaminantes persistentes en agua. Plataforma Solar de Almería. CIEMAT. 277 p. 2002.
3. CARVALHO M, COLLARES M, GORDON J, RABL A. Truncation of CPC solar collectors and its effect on energy collection. *Solar Energy*; Vol. 35: 393-399. 1985.
4. COLLARES M. The relevance of non-imaging optics for solar energy: a review. *Revista de Ingeniería Técnica. IST. No. 3.* 1995.
5. HERMOSILLO J., GUDIÑO D. Y MENDOZA. M. *Notas sobre el curso de Energía Solar* [en línea]. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente Tlaquepaque, Jalisco, Febrero de 1995. [citado el 8 de diciembre del 2004]. Disponible para World Wide Web: http://www.solartronic.com/Sistemas_Fotovoltaicos/Curso_Breve/curso_iteso.pdf
6. LÓPEZ A. M. MEJÍAS. *Los acuíferos costeros y las desaladoras*, Almería [en línea]. Club del agua, Julio / 2000 [citado el 8 de diciembre del 2004]. Disponible para World Wide Web: http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/art_2linea_5.htm
7. MCINTIRE W. Truncation of nonimaging cusp concentrators. *Solar Energy*; Vol. 23: 351-355. 1979.
8. RABL A. Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators. *Solar Energy*; Vol. 18: 497-511. 1976
9. RABL A. Solar concentrators with maximal concentration for cylindrical absorbers. *Applied Optics*; Vol. 15: 1871-1873. 1976.
10. RABL A, GOODMAN N Y WINSTON R. Practical design considerations for CPC solar collectors. *Solar Energy*; Vol. 22: 373-381. 1979.
11. RODRÍGUEZ, G.. *Desalación de Aguas* [en línea]. Fuente ITC, 2000. [citado el 8 de diciembre del 2004]. Disponible para World Wide Web: <http://www.airelibrepalma.org/itc6-desalacion.pdf>.
12. TABOR H. Stationary mirror systems for solar collectors. *Solar Energy*; Vol. 2: 27-33. 1958.
13. Universidad de Chicago. The nonimaging optics page; en: <http://hep.uchicago.edu/solar/Nloptics.html>. Fecha de consulta: 23 de septiembre de 2004.
14. TERUYUKI F, FUMIO, A., MUTAWA, H., NIRO, N. AND ITO YOSHIO. *Production Mechanism and Performance of Tubular Solar Still*. IDA World Congress, Bahamas, 2003
15. WELFORD W. WINSTON R. The optics of non-imaging concentrators. *Light and Solar Energy*. New York. Academic Press. 283 p. 1978.
16. WELFORD W, WINSTON R. High collection nonimaging optics. New York. Academic Press. 283 p. (1989).
17. WINSTON R. Principles of solar concentrators of a novel design. *Solar Energy*; Vol. 16: 89-95. (1974).
18. WINSTON R. Light collection within the framework of geometrical optics. *Journal of the Optical Society of America*; Vol. 60: 245-247. 1970.
19. ZARZA E. *Desalación del Agua Mediante Energías Renovables* [en línea]. CIEMAT-Plataforma Solar de Almería, 1999. [citado el 8 de diciembre del 2004]. Disponible para World Wide Web: <http://www.gem.es/materiales/document/document/g01/d01204.htm>