
DESALINIZACIÓN DE AGUA EMPLEANDO UN DESTILADOR SOLAR TUBULAR

SUHER CAROLINA YABROUDI, CARMEN CÁRDENAS,
LEONARDO ALDANA, JOSÉ NÚÑEZ y LENIN HERRERA

RESUMEN

Un destilador solar tubular (DST) fue diseñado y operado bajo las condiciones ambientales del Estado Zulia, Venezuela, a fin de estudiar a escala piloto su eficiencia en la desalinización de agua y analizar su factibilidad para ser implementado a gran escala en comunidades rurales con problemas asociados a fuentes de agua salobre, y que cuentan con gran potencial de energía solar. Se preparó agua sintética con concentraciones de 3000, 10000 y 30000mg-l⁻¹ de cloruros, empleada como alimentación al DST durante 20 días de muestreo para cada concentración, con una duración total en la experimentación de cuatro meses. Se realizaron mediciones de volumen, cloruros, temperaturas, radiación solar y sólidos disueltos totales tanto para el agua producida como para

la alimentación y solución concentrada. Los resultados reflejan independencia de la calidad del agua producida con la naturaleza de la alimentación en todos los parámetros analizados, en tanto, las condiciones ambientales tienen un efecto directo en los volúmenes de agua destilada producida y en menor medida en la calidad de la misma, obteniéndose un volumen medio de 2,42 l·m⁻²/día, con máximo de 3,34 y mínimo de 0,93 l·m⁻²/día. La calidad del agua producida el DST muestra muy buen desempeño, con eficiencias en la remoción de cloruros y sólidos disueltos totales >99%, ubicándose todos los parámetros por debajo de los límites establecidos por las normas nacionales e internacionales para agua destinada al consumo humano.

La escasez de agua se ha convertido en un problema mundial debido a la creciente demanda que ha venido sufriendo en los últimos años, motivada por el aumento de la población, extensión de las áreas de cultivos y desarrollo industrial, entre otras causas. Este problema también se extiende a la calidad del agua disponible, que ha venido disminuyendo debido a su uso irracional, produciendo contaminación de ríos, lagos y mares, además de conllevar la sobreexplotación de acuíferos

y una mala distribución de los recursos hídricos en el espacio y el tiempo. Todo esto ha contribuido a incrementar los problemas de salud asociados a la poca disponibilidad o falta de agua potable. Algunos estudios indican que 3,5 millones de personas mueren cada año por enfermedades relacionadas con el agua (Tiwari y Tiwari, 2008; Vinothkumar y Kasturibai, 2008; Sampathkumar *et al.*, 2010).

Venezuela es un país rico en recursos hídricos, con una precipitación anual promedio de 2044mm que

suponen 1864km³/año sobre el territorio del país, contando con abundantes fuentes de agua superficiales en las grandes cuencas que conforman su hidrografía, con recursos internos renovables de 722km³/año, además de lagos y embalses que almacenan cerca de 157km³. Sin embargo, la mayor cantidad de estos recursos, se encuentran hacia la margen derecha del río Orinoco, alejados del eje Andino-Costero donde se concentra el 75% de la población del país y las grandes industrias consumidoras de agua, creando

PALABRAS CLAVE / Desalinización / Destilador Tubular / Energía Solar /

Recibido: 25/10/10; Modificado: 07/10/2011. Aceptado: 10/10/2011.

Suher Carolina Yabroudi. Ingeniera Química y Maestría en Ingeniería Química, Universidad del Zulia (LUZ), Venezuela. Estudiante de Doctorado, Univesidad de São Paulo, Brasil. Profesora Asociada, LUZ, Venezuela. Dirección: Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, LUZ, Apartado 526. Maracaibo, Edo. Zulia, Venezuela. e-mail: yabroudic@yahoo.com

Carmen Cárdenas. Ingeniera Química y Maestría en Ingeniería Ambiental, LUZ, Venezuela. Directora, Centro de Investigación del Agua, LUZ, Venezuela.

Leonardo Aldana. Ingeniera Química, LUZ, Venezuela.

José Núñez. Ingeniero Químico, LUZ, Venezuela.

Lenin Herrera. Ingeniero Químico, LUZ, Venezuela. Maestría en Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Texas University, EEUU. Profesor, LUZ, Venezuela.

TABLA I
COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES TIPOS DE DESTILADORES SOLARES

Tipo	Autores	Especificaciones	Resultados experimentales	Comentarios
Destilador solar con colector de placa (circulación forzada)	Rai <i>et al.</i> , 1990 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m Ángulo de inclinación: 45° Flujo: 1,15kg·min ⁻¹	Máxima producción de destilado: 6,75kg·m ⁻²	Requiere bombas para suministro de agua Debe considerarse el consumo de electricidad para el funcionamiento de la bomba Problemas operacionales pueden ocurrir durante el proceso
Destilador solar con colector de placa (circulación natural)	Badran y Al-Tahameh, 2005 (Omán, Jordania)	Área: 1x1m Ángulo de inclinación: 35°	Máxima producción de destilado: 3,50kg·m ⁻² Ángulo óptimo de inclinación de 10° para la estación de otoño de Jordania	Fácil de operar Menor productividad en comparación con el de circulación forzada
Destilador solar de doble efecto	Kumar y Tiwari, 1996 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m Ángulo de inclinación: 15° Flujo: 40ml·min ⁻¹ Espacio entre las dos cubiertas de vidrio: 20cm Bomba: 0,2HP	Producción de destilado: 7,5L/día operando bajo el modo activo Alternando la operación con modo pasivo y activo, la producción de destilado fue de 2,2-3,9L/día.	Fácil operación y mantenimiento La operación bajo el modo 'doble efecto' no mejora la producción diaria de destilado por la dificultad para mantener caudales bajos y uniformes sobre las cubiertas de vidrio
Destilador solar de regeneración activa	Tiwari y Sinha, 1993 (Nueva Deli, India)	Área: 1m ² Flujo: 0,20kg·seg ⁻² Emplea intercambiador de calor	Rendimiento máximo: 1; 0,7; 0,3 y 0,02kg·m ⁻² para 13h de operación bajo modos de regeneración activa, no activa, pasiva y no pasiva, respectivamente	Alto costo inicial Diseño y operación compleja Requiere personal especializado Posibles pérdidas en el intercambiador
Destilador solar con colector de placa paralelo	Yadav y Prasad, 1995 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m Longitud del colector de placa páralelo: 1m	Producción máxima: 0,250kg·m ⁻² Se registró temperatura máxima del agua de 69°C	Diseño simple comparado con destilador acoplado a colector de placa, sin embargo su productividad es menor
Destilador solar vertical acoplado a colector de placa	Kiatsiroat <i>et al.</i> , 1987 (Bangkok, Tailandia)	Área: 1,52x1m Área de colección: 1,4m ² Ángulo de inclinación: 15°	Optimización del proceso con 5 placas de evaporación para una producción de destilado de 50kg·h ⁻¹	Requiere de bombas Alto costo de operación comparado con otros que emplean colectores de placa Pocas investigaciones reportadas
Destilador solar acoplado a concentrador parabólico	Zeinab <i>et al.</i> , 2007 (Giza, Egipto)	Diámetro tubo de cobre: 0,0095m Longitud tubo de cobre: 14,4m Área: 1m ² Área de colección: 80cm de largo y 0,04cm de espesor	Producción: 2,75L/día	Más económico que destilador de tipo convencional Posee un mayor número de partes en comparación con otros sistemas
Destilador de doble efecto acoplado a concentrador parabólico	Bhagwan y Tiwari, 1996 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m Área concentrador parabólico: 1x1m Longitud del concentrador: 1m Modo de circulación forzada Flujo: 0,0027kg·s ⁻¹	Rendimiento máximo: 14,7kg/día Disminución de la producción por pérdidas de agua Concentrador ajustable manualmente para aumentar la radiación solar	Mayor rendimiento en comparación con colectores de placa, por mayor concentración de la radiación solar Altos costos de mantenimiento y operación Mantener la temperatura de la cubierta de cristal es crucial para lograr alta eficiencia
Destilador solar de regeneración acoplado a concentrador parabólico	Kumar y Sinha, 1996 (Nueva Deli, India)	Área: 1m ² Espesor aislamiento: 0,004m Área concentrador parabólico 0,086m ² Flujo: 0,05kg·s ⁻¹ Velocidad del viento: 5m·s ⁻¹	Producción: 8,2L/día La eficiencia térmica del destilador con concentrador parabólico acoplado es mayor que el colector de placa plana	Proceso más complejo trabajando con flujo constante de agua Requiere bomba para recirculación de agua No es adecuado para ser aplicado en comunidades rurales Alto costo de capital en comparación con otros destiladores solares
Destilador solar acoplado a tubos colectores	Tiwari <i>et al.</i> , 2007 (Nueva Deli, India)	Área: 1m ² Masa de agua: 50kg Área tubo colector: 2m ² Flujo: 0,035 kg·s ⁻¹	Producción: 4,0kg·m ⁻¹ /día Eficiencia térmica: 17%	Opción más viable para calentamiento y destilación simultánea de agua
Destilador solar multietapa	Ahmed <i>et al.</i> , 2009 (Kualalumpur, Malasia)	Número de etapas: 3 Recirculación de agua salobre a través de una bomba	Producción máxima: 14,2kg·m ⁻² /día	Mayor productividad comparado con otros El diseño cilíndrico en términos de seguridad y flexibilidad es más ventajoso comparado con el diseño rectangular Costo del galón de agua destilada de \$0,026
Destilador solar multiefecto	Abdel, 2006 (Egipto)	Área de colección: 1m ² Dimensiones cámaras de destilación: 187x118x160cm.	La destilación se basa en procesos de humidificación/deshumidificación Se colectan 24L/día de destilado empleando dos cámaras de condensación	Aplicación en pequeñas unidades (hoteles, áreas rurales, industrias pequeñas) Costos de capital y operación altos Requiere de mano de obra calificada
Destilador tipo burbuja de aire	Pandey, 1984 (Nueva Deli, India)	Área: 0,67m ² Ángulo de inclinación: 10°	Incremento de producción de destilado: 7,1% empleando burbujas de aire; 34% con burbujas de aire seco; 48% con burbujas de aire seco más enfriamiento con cubierta de vidrio, y 31% empleando solo enfriamiento con cubierta de vidrio	Diseño y construcción simple Requerimientos de energía para el funcionamiento del motor
Destilador solar híbrido o de tipo invernadero	Voropoulos <i>et al.</i> , 2004 (Grecia)	Área de colección: 5x2,5m Tanque con capacidad de almacenamiento de 3750L Profundidad del agua: 5cm	Producción de 36, 57 y 75% de agua destilada para tanque de almacenamiento de 0,5; 0,25 y 1L, respectivamente, con suministro de energía de 1990, 3300 y 5200MJ	Producción simultánea de agua caliente y destilado Diseño y operación simple
Destilador con precalentamiento del agua	Tiwari y Madhuri, 1985 (Nueva Deli, India)	Área: 1x1m	Producción de destilado de 0,5kg·m ⁻² ·h ⁻¹ con flujo de 0,006kg·s ⁻¹ Aumento en la eficiencia de producción de destilado al incrementar la temperatura del flujo de agua	Fácil de operar y mantener Mayor tasa de producción en comparación con los destiladores simples

inconvenientes de distribución entre los sectores, y siendo las zonas rurales costeras y las islas de nuestro territorio las más afectadas, con problemas permanentes de suministro de agua potable. No obstante, estas zonas cuentan con fuentes alternas de agua (mar, lagunas o pozos) que no han podido ser aprovechadas por no ser aptas para consumo humano, debido fundamentalmente a sus altos niveles de salinidad, por lo que requieren la aplicación de procesos de desalinización (Chaibi, 2000; FAO, 2002; Fuentes y Ramírez, 2003; Hamed *et al.*, 1993; Rahman *et al.*, 1997; Hernández, 2003; Arjunan *et al.*, 2009).

Algunas técnicas disponibles, tales como destilación multietapa flash, destilación multiefecto, termocompresión y compresión mecánica de vapor, membranas, electrodiálisis y la más difundida a nivel mundial, la ósmosis inversa, requieren de gran cantidad de energía y mano de obra calificada para su operación y mantenimiento, además de sus altos costos de instalación, razones por las que no resultan de interés para su implementación en comunidades rurales, a pesar de su elevado rendimiento (Joseph *et al.*, 2005; Zhani y Ben Bacha, 2010).

La energía solar está disponible en abundancia en la mayoría de las zonas rurales y por lo tanto, la destilación solar es una solución atractiva y de fácil implementación en regiones áridas y comunidades rurales de pocos recursos que se encuentran alejadas de las grandes ciudades (Rahim, 2003; Nafey *et al.*, 2010).

El principio básico de la desalinización solar es del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un área de material transparente, en cuyo fondo se encuentra agua salada en reposo; dependiendo de la radiación solar y la velocidad del viento, una fracción del agua salada se condensa en la cara interior y por medio de una determinada inclinación, el agua libre de sales cae en un recipiente para ser almacenada (Zeinab y Ashraf, 2007; Sampathkumar *et al.*, 2010). En la Tabla I se presenta un resumen de diversos sistemas de destilación solar estudiados en los últimos años.

En base a esto fue seleccionado el destilador tubular, por ser uno de los diseños que ofrece mayor productividad, facilidad de construcción y de operación, así como problemas menores de acumulación de sales cuando operan de manera continua. Se estudió su eficiencia y la factibilidad de ser implementado, considerando las condiciones ambientales del Estado Zulia, Venezuela, caracterizado por un clima semiárido con

TABLA II
ANÁLISIS REALIZADOS Y MÉTODOS SEGÚN APHA (2005)

	Análisis	Nº de método	Frecuencia
Mediciones diarias	Cloruro	4500-Cl-B	Diario
	pH	4500-H ⁺	Diario
	Temperatura	2550-B	Diario
	SDT	2540-B	Diario
Mediciones al finalizar cada concentración	Alcalinidad	2320-B	Una vez por concentración
	Color real und Pt-Co	2120-C	Una vez por concentración
	Dureza total	2340-C	Una vez por concentración
	Nitrato	4500-NO ₃ -B	Una vez por concentración
	Nitrito	4500-NO ₂ -B	Una vez por concentración
	Turbidez	2130-B	Una vez por concentración

precipitación anual de 676mm, temperatura promedio de 29°C y evaporación de 5-10mm/día. Para ello se efectuaron mediciones de laboratorio y análisis de las condiciones ambientales para distintas concentraciones de alimentación del destilador, de forma de determinar las variables de operación del equipo y validar los resultados obtenidos (Nafey *et al.*, 2001; Fuentes y Ramírez, 2003; Teruyuki *et al.*, 2003; Amimul y Teruyuki, 2010).

Materiales y Métodos

Destilador solar tubular (DST)

El material de construcción para el destilador fue un tubo de vinilo transparente de 92,5cm de longitud, diámetro exterior de 10cm, diámetro interior de 9,4cm y espesor de pared de 0,3cm. El tubo es transparente, con la finalidad de permitir el paso de la mayor parte de la radiación solar de distintas longitudes de onda hacia una canaleta donde se encuentra el agua a destilar. Este tubo, es por donde circula el destilado producido y es recogido a un extremo del mismo (Nafey *et al.*, 2001; Teruyuki *et al.*, 2003; Amimul y Teruyuki, 2010).

El interior del tubo cuenta con una canaleta con un diámetro de 5,1cm, 92cm de longitud y un espesor de 0,5cm. Posteriormente se acoplaron semicírculos de PVC transparente en los extremos del canal, uno de los semicírculos fue perforado con el propósito de conectar la manguera para la salida de la salmuera concentrada. La canaleta interior es de color negro para absorber la mayor cantidad de radiación solar transmitida desde el tubo transparente, además de poseer una baja conductividad térmica, minimizando las pérdidas de calor al ambiente, y proporcionando al destilador un área útil de 0,0735m².

Fue necesario construir una base para el destilador, que consistió en un soporte de hierro de 100cm de ancho y altura de 60cm, cuyas bases poseen unas platinas de 25cm para brindar esta-

bilidad al soporte. El sistema de desalinización fue completado con un tanque de almacenamiento que alimenta al destilador, una bomba para el transporte del agua del tanque hacia el destilador y un regulador de flujo para controlar el caudal de alimentación. Las condiciones de operación del reactor se ajustaron a un caudal de 5ml·min⁻¹, tiempo de retención de 11min e inclinación de 1,54° con respecto al suelo.

Alimentación

Se empleó agua sintética preparada a nivel de laboratorio con concentraciones de 3000, 10000 y 30000mg·l⁻¹ de cloruros, lo que permitió dejar a un lado los análisis de naturaleza bacteriológica, toxicológica y de metales (variables de interferencia) facilitando un mejor control de las variables principales objeto de estudio (cloruros, salinidad y sólidos disueltos totales) y brindar validez y confiabilidad a los datos reportados, en especial al no existir antecedentes del comportamiento del DST bajo las condiciones climáticas en el país, específicamente del Estado Zulia.

Tomas de muestras

Las mediciones abarcaron un horario de muestreo de 8:00am hasta las 5:00pm (cada hora desde las 08:00am hasta las 12:00pm; cada media hora desde las 12:30am hasta las 04:00pm, y el último muestreo a las 05:00pm), para cada una de las concentraciones de cloruros de alimentación consideradas (3000, 10000 y 30000mg·l⁻¹), durante un total de 60 días. Los análisis se realizaron según la metodología descrita en APHA (2005). En la Tabla II se indican los ensayos realizados y en la Tabla III se resume la frecuencia de muestreo para cada parámetro. El estudio abarcó al inicio el periodo de lluvias (octubre-noviembre) y el de sequía (enero-marzo), registrándose el último mes marcadas variaciones ambientales.

TABLA III
FRECUENCIA DE TOMA DE MUESTRA

Punto de muestreo	Parámetro	Horario de muestreo		
		8:00am a 12:00pm	12:30pm a 4:00pm	05:00pm
Alimentación	Temperatura	Cada hora	Cada ½ hora	Cada hora
	Cloruro	Una vez al día	-	-
	pH	Una vez al día	-	-
	STD	Una vez al día	-	-
Destilado	Temperatura	Cada hora	Cada ½ hora	Cada hora
	Cloruro	Cada hora	Cada ½ hora	Cada hora
	pH	Cada hora	Cada ½ hora	Cada hora
	STD	Una vez al día	-	-
Concentrado	Temperatura	Cada hora	Cada ½ hora	Cada hora
	Cloruro	Cada hora	Cada ½ hora	Cada hora
	pH	Cada hora	Cada ½ hora	Cada hora
	STD	Una vez al día	-	-

transparente y absorbente de la radiación solar. En el presente caso, la mayor parte de la radiación solar se transmite a través del tubo del destilador, para luego ser absorbida por la canaleta, que es de baja conductividad térmica, minimizando las pérdidas al ambiente. La Figura 2 muestra la variación de la radiación total medida (directa y difusa) en $W \cdot m^{-2}$ para los 60 días de muestreo, siendo los valores más elevados registrados durante el período de estudio ($513W \cdot m^{-2}$) con la concentración de $10000mg \cdot l^{-1}$, seguidos por los de 30000 (477) y $3000mg \cdot l^{-1}$ ($513W \cdot m^{-2}$). Es de suponer que los días soleados sean los de mayor radiación solar y viceversa, verificándose grandes oscilaciones de un día a otro (entre 200 y $600W \cdot m^{-2}$).

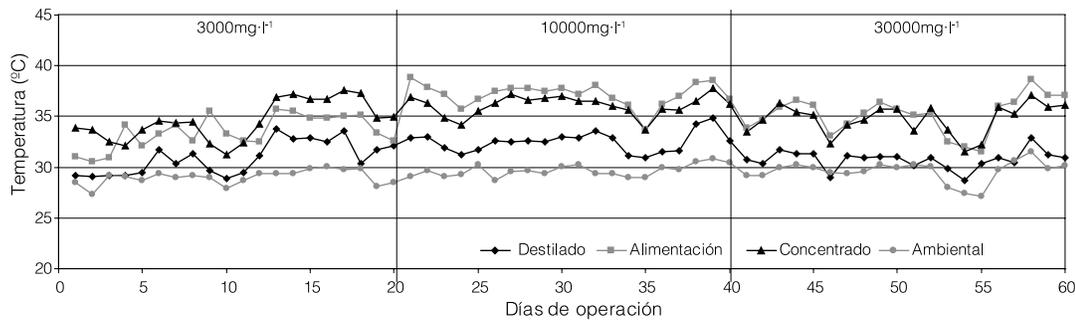


Figura 1. Comportamiento de la temperatura promedio diaria.

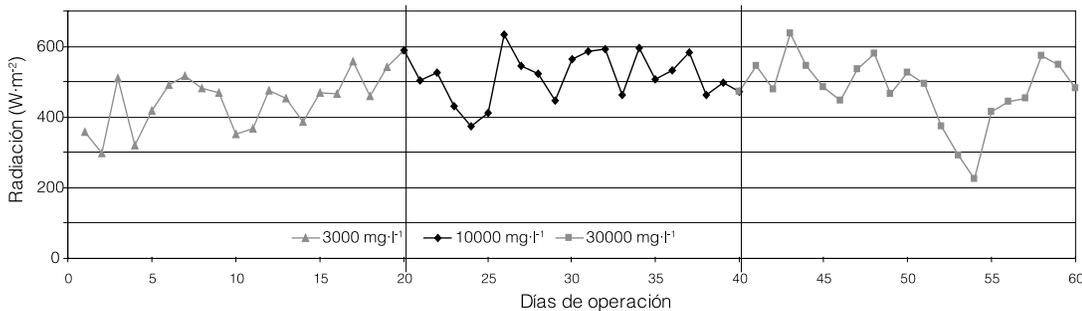


Figura 2. Comportamiento de radiación solar total que llega a la superficie del suelo para las tres concentraciones evaluadas.

Producción de destilado en función de las condiciones climáticas

En la Figura 3 se aprecia la producción de destilado para las diferentes concentraciones de solución alimentada al DST según las condiciones climáticas. Se han dividido las condiciones climáticas en soleado, nublado y nubosidad parcial. Esta figura es relevante en el presente trabajo debido a que se reportan los volúmenes máximos obtenidos para diferentes condiciones ambientales predominantes en el día, donde independientemente de las condiciones ambientales se produce agua destilada, aunque la cantidad disminuye a medida que lo hace la radiación solar. Para los días en que se registró nubosidad parcial, continúa la evaporación de una pequeña porción del agua que circula por

Resultados y Discusión

Temperatura

La Figura 1 muestra el comportamiento de la temperatura diaria ambiental, de la alimentación, del destilado y de la solución concentrada durante todo el período de muestreo. No sigue una misma tendencia en todos los casos; para un determinado día puede ser alta y en otro muy baja, dado que depende directamente de las condiciones ambientales predominantes durante el día. Las menores temperaturas corresponden a la ambiental, seguido por la del destilado y concentrado (en la mayoría de los casos) y las más elevadas a la alimentación. Estos datos son de interés por su incidencia

directa en la producción del destilado, aspecto que será explicado al comparar ambas variables.

Radiación solar

Para cualquier proceso que utilice como fuente de energía el sol, la radiación solar representa un parámetro importante, debido a que cuantifica la cantidad de energía que puede ser transferida hacia un determinado cuerpo u objeto por unidad de área y tiempo. A partir de este dato, se podrían realizar balances de energía para evaluar los materiales a utilizar como medio

la canaleta debido a la radiación difusa, que en esos momentos gobierna el fenómeno de la radiación dado que la directa es absorbida

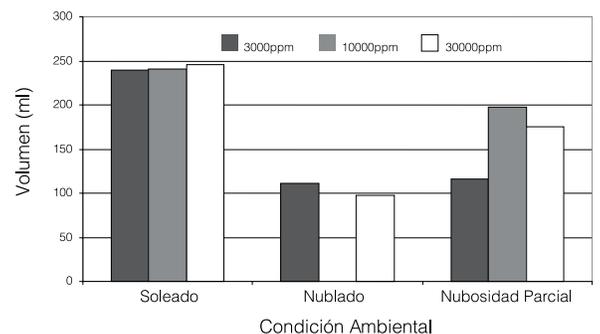


Figura 3. Producción de destilado para las diferentes concentraciones de salmuera alimentada al DST según las condiciones climáticas.

en mayor proporción por las nubes. La mayor producción de destilado para los días soleados es para la alimentación de $3000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de cloruros, alcanzando un volumen de destilado de $246\text{ml}/\text{día}$, seguido de la concentración de $10000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ con $241\text{ml}/\text{día}$, y por último la de $3000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ con un volumen de destilado producido de $240\text{ml}/\text{día}$. Por su parte, para los días con nubosidad parcial la mayor producción fue para la alimentación de $10000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de cloruros con un valor de $198\text{ml}/\text{día}$, seguida de la de 30000 y $3000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, con un volumen de destilado producido de 175 y $116\text{ml}/\text{día}$, respectivamente. Estos resultados indican que la producción de agua desalinizada con condiciones ambientales distintas de la soleada no depende de la concentración, sino de la radiación solar difusa que incide sobre el equipo.

Cloruros

Como principal constituyente del agua de mar y de la salobre, ésta ha sido considerada como una de las variables de interés para evaluar la calidad del agua producida. La Figura 4 muestra el comportamiento promedio diario de los cloruros del destilado, alimentación y concentrado para las tres concentraciones evaluadas. Existe una diferencia apreciable entre la concentración de la alimentación y el destilado, lográndose la desalinización del agua, ubicándose por debajo de los límites establecidos en las normas de la OMS ($<250\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$; Fuentes y Ramírez, 2003) y de Venezuela ($<300\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$; Gaceta, 1998). Este fenómeno ocurre ya que los sólidos presentes en el agua de alimentación poseen un punto de ebullición muy por encima del agua y, por lo tanto, cuando tiene lugar la evaporación de parte del agua que se alimenta al DST, esa fracción de vapor está esencialmente libre de sales, motivo por el cual la conductividad en el agua destilada disminuye considerablemente en comparación con la alimentada. Claramente se observa la independencia entre la calidad del destilado producido y de la alimentación, por lo que la remoción de cloruros es independiente de la concentración del agua tratada en el DST. En este punto, es difícil explicar la razón de la variación de la concentración de cloruros en cada día de muestreo. A medida que aumentan las concentraciones de alimentación, la diferencia entre ésta y la de la salmuera concentrada se hace mayor, como consecuencia de producir una corriente de agua destilada de igual calidad. En el destilado se alcanzaron

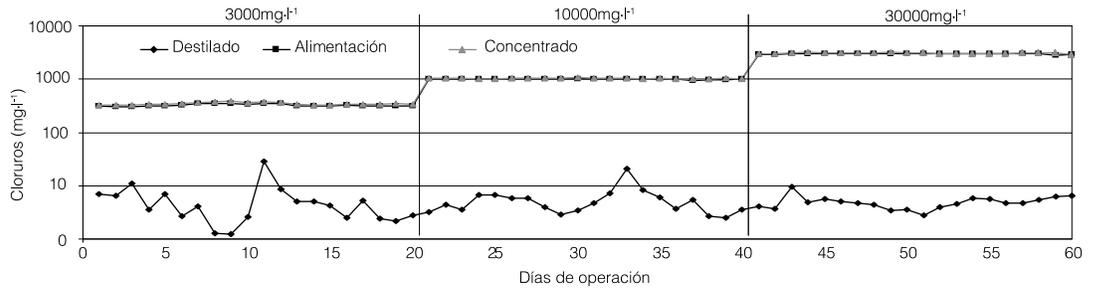


Figura 4. Comportamiento promedio diario de la concentración de cloruros de la alimentación, destilado producido y salmuera concentrada, para las tres concentraciones.

valores medios de 57 , 56 y $50\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ para las concentraciones de 3000 , 10000 y $30000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, respectivamente.

El DST construido a escala piloto proporcionó un buen desempeño, obteniendo casi la totalidad de remoción de las sales. Se apreció cierta disper-

sión en los datos reportados, debido a las variaciones en las condiciones climáticas. Sin embargo, se alcanzaron valores medios en la remoción de sales de $98,6$ y 92% como valores extremos $99,6$ y 92% para una concentración de $3000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Para el caso de $10000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ se obtuvo un valor

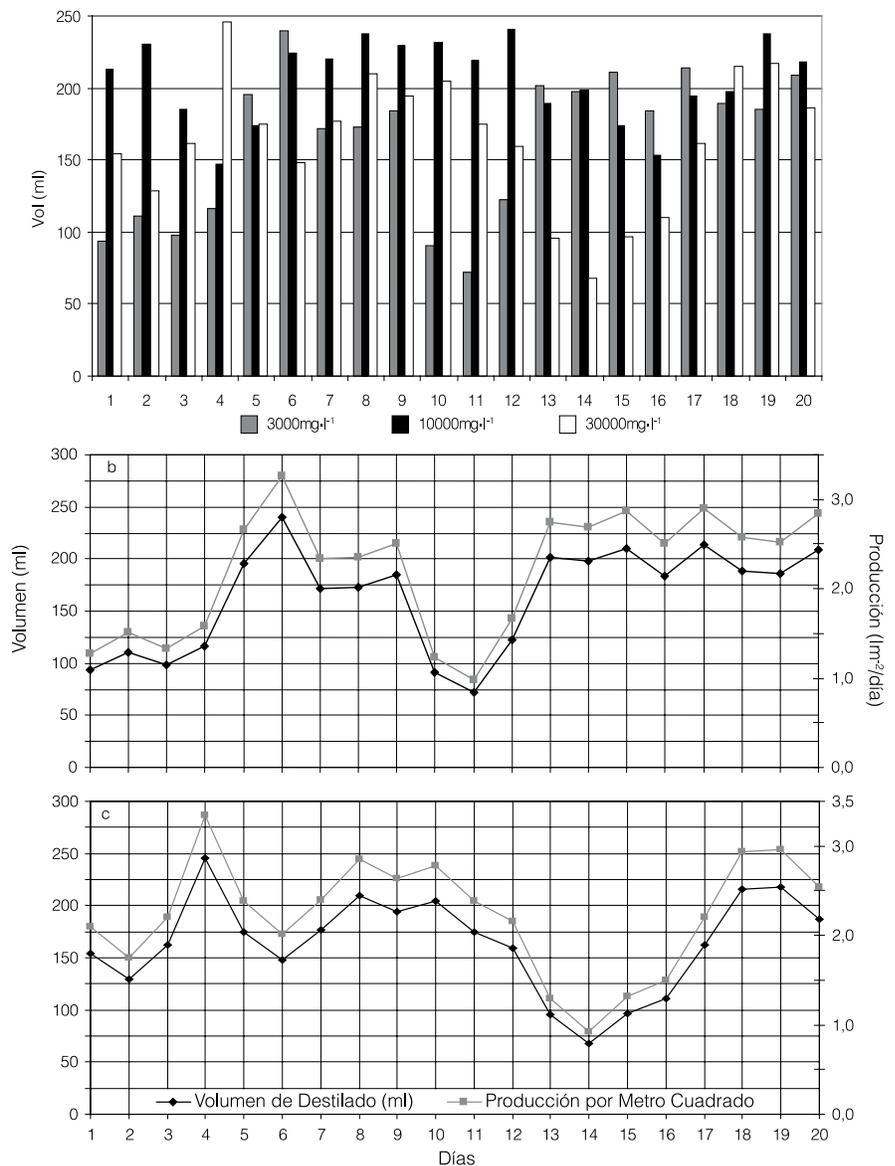


Figura 5. a: Producción de destilado para las distintas concentraciones alimentadas al DST. b: Concentración de $10000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$; c: Concentración de $30000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

medio de 99,4%, con extremos de 99,8 y 98%. Por último, para 30000mg·l⁻¹, con una media de 99,8% con valores extremos de 99,9 y 99,7%. De igual forma, los mayores porcentajes de remoción se registraron para días soleados casi en su totalidad (días 9, 39 y 51) y los valores más bajos para días nublados (días 11, 33 y 43). Finalmente, cabe destacar que el DST alcanzó una elevada eficiencia independientemente de las condiciones climáticas, demostrando ser un equipo confiable desde el punto de vista de calidad del destilado producido. El promedio en la remoción de cloruros para las tres concentraciones fue de 99,2% (Hanson *et al.*, 2004; Aybar *et al.*, 2005).

Salinidad

El destilado posee una salinidad promedio de 133, 131 y 120mg·l⁻¹ para las concentraciones de 3000, 10000 y 30000mg·l⁻¹, respectivamente. El comportamiento es similar al de los cloruros por la proporcionalidad que estas dos propiedades presentan; sin embargo, para este parámetro resulta ser mayor debido a que se considera el efecto de las otras sales. Es importante destacar que durante el estudio no se observó acumulación de sales en el destilador.

Sólidos disueltos totales

Al representar la masa de las sales totales disueltas en el agua producida (tanto aniones como cationes) su comportamiento es proporcional al de la salinidad y cloruros, donde los valores medios para el destilado producido cumplen con los límites fijados para agua potable (<1000mg·l⁻¹), siendo estos de 121, 125 y 197mg·l⁻¹ para las concentraciones de 3000, 10000 y 30000mg·l⁻¹, demostrando independencia de la calidad del agua producida respecto de la alimentación, resultado comparable al reportado en otras investigaciones (Teruyuki *et al.*, 2003; Hanson *et al.*, 2004; Soteris, 2005; Amimul y Teruyuki, 2010; Sampathkumar *et al.*, 2010).

Volumen de agua destilada producido

La Figura 5a muestra la producción de destilado durante el tiempo de estudio, alcanzando una producción media de 162ml/día para una alimentación de 3000mg·l⁻¹ de cloruros, con una máxima producción de 240ml/día para el sexto día, el cual fue soleado en su totalidad, y una mínima producción de 73ml/día para el décimo primer día, con nubosidad abundante. La producción media por área de destilación fue de 2,22l·m⁻²/día.

Para una alimentación de 10000mg·l⁻¹ de cloruros (Figura 5b) la producción media de destilado para el DST fue de 206ml/día, con una máxima producción de 241ml/día para el día 12, soleado en su totalidad, y una mínima producción de 147ml/día para el día 16 el cual fue un día soleado con nubosidad parcial en algunas ocasiones, La producción media por metro cuadrado fue de 2,8l·m⁻²/día.

Al estudiar la alimentación de 30000mg·l⁻¹ de cloruros (Figura 5c), la dispersión entre los datos fue más acentuada, debido a la irregularidad del clima para los días de muestreo, registrando una producción media de destilado de 163ml/día, con un máximo rendimiento de 246ml/día para el día 4, soleado en su totalidad, y una mínima producción de 68ml/día para el día 14, día nublado con nubosidad parcial en algunas ocasiones. La producción media por área fue de 2,23l·m⁻²/día.

Las variaciones en el volumen de destilado producido son resultado de cambios en las condiciones ambientales locales, siendo éste el mayor inconveniente del uso de una fuente de energía renovable, por incidir directamente en el volumen de destilado producido en el DST. Sin embargo, se debe acotar que esto no incide en la calidad del efluente tratado, comportamiento que hace necesario aumentar la eficiencia de producción incrementando la captación de la energía solar y de absorción de la radiación, minimizando las pérdidas al ambiente mediante el estudio de diferentes tipos de materiales y de la posibilidad de incrementar el volumen mezclando el agua producida con porciones de agua de alimentación o agua de lluvia, siempre y cuando se cumpla con los límites establecidos por la normas sanitarias (Welty *et al.*, 1999; Hanson *et al.*, 2004; Aybar *et al.*, 2005; Bouguecha *et al.*, 2005).

Conclusiones

El destilador solar tubular diseñado muestra un desempeño favorable para ser operado bajo las condiciones ambientales del sitio del estudio, el Estado Zulia, Venezuela, con eficiencias de remoción de cloruros y sólidos disueltos totales de 99%, siendo una alternativa simple y eficiente para ser aplicada en procesos de desalinización de agua en comunidades rurales.

REFERENCIAS

Abdel Dayem A (2006) Experimental and numerical performance of a multieffect condensation evaporation solar water distillation system. *Energy*. 31: 2710-2717.

Ahmed MI, Hrairi M, Ismail AF (2009) On the characteristics of multistage evacuated solar distillation. *Renew. Energy*. 34: 1471-1478.

Amimul A, Teruyuki F (2010) Mass and heat transfer model of a tubular solar still. *Solar Energy* 84: 1147-1156.

APHA (2005) *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 21^a ed. APHA-AWWA-WEF. Nueva York, EEUU. 1325 pp.

Arjunan TV, Aybar HS, Nedunchezian N (2009) Status of solar desalination in India. *Renew. Sust. Energy Rev*. 13: 2408-2418.

Aybar H, Egeliofllu F, Atikol U (2005) An experimental study on an inclined solar water distillation system. *Desalination* 180: 285-289.

Badran OO, Al-Tahaineh HA (2005) The effect of coupling a flat plate collector on the solar still productivity. *Desalination* 183: 137-142.

Bhagwan P, Tiwari GN (1996) Analysis of double effect active solar distillation. *Energy Conv. Manag.* 37: 1647-1656.

Bouguecha S, Hamrouni B, Dhahi M (2005) Small scale desalination pilot powered by renewable energy sources: case studies. *Desalination* 183: 151-165.

Chaibi MT (2000) An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas. *Desalination* 127: 119-133.

FAO (2002) *El Riego en Venezuela*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. www.fao.org/Regional/LAmerica/paises/h2o/venezuela.htm

Fuentes M, Ramírez A (2003) Desalación del agua: Una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la República Mexicana. *Agua Latinoam*. 5: 1-6.

Gaceta (1998) *Norma Sanitaria de Calidad del Agua Potable*. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 (13 de Febrero de 1.998). Caracas, Venezuela. pp. 216-219.

Hamed OA, Eisa EI, Abdalla WE (1993) *Overview of solar desalination*. *Desalination* 93: 563-579.

Hanson A, Zachritz W, Stevens K, Mimbela L, Polka R, Cisneros L (2004) Distillate water quality of a single-basin solar still: laboratory and field studies. *Solar Energy* 76: 635-645.

Hernández M (2003) Problemas de sostenibilidad: Cara y cruz de la desalación. *Arts. Técn.* 242: 56-58.

Joseph J, Saravanan R, Renganarayanan S (2005) Studies on a single-stage solar desalination system for domestic applications. *Desalination* 173: 77-82.

Kiatsiriroat T, Bhattacharya SC, Wibulswas P (1987) Performance analysis of multiple effect vertical solar still with a flat plate solar collector. *Solar Wind Technol.* 4: 451-457.

Kumar S, Sinha S (1996) Transient model and comparative study of concentrator coupled regenerative solar still in forced circulation mode. *Energy Conv. Manag.* 37: 629-636.

Kumar S, Tiwari GN (1996) Performance evaluation of an active solar distillation system. *Energy* 21: 805-808.

Nafey AS, Abdelkader M, Mabrouk AA (2001) Solar still productivity enhancement. *Energy Conv. Manag.* 42: 1401-1408.

- Nafey AS, Sharaf MA, García L (2010) A new visual library for design and simulation of solar desalination systems (SDS). *Desalination* 259: 197-207.
- Pandey GC (1984) Effect of dried and forced air bubbling on the partial pressure of water vapour and performance of solar still. *Solar Energy*. 33: 13-18.
- Rahim N (2003) New method to store heat energy in horizontal solar desalination still. *Renew. Energy*. 28: 419-433.
- Rahman MH, Mamtaz R, Ferdousi SA (1997) Pilot solar desalination plants in Bangladesh. 23rd WEDC Conf. *Water and Sanitation for All*. Durban, South Africa. pp. 178-181.
- Rai SN, Dutt DK, Tiwari GN (1990) Some experimental studies of single basin solar still. *Energy Conv. Manag.* 30: 149-153.
- Sampathkumar K, Arjunan TV, Pitchandi P, Senthilkumar P (2010) Active solar distillation-A detailed review. *Renew. Sust. Energy Rev.* 14: 1503-1526.
- Soteris K (2005) Seawater desalination using renewable energy sources. *Progr. Energy Combust. Sci.* 31: 242-281.
- Teruyuki F, Fumio A, Al Mutada H, Niro Y (2003) Production mechanism and performance of tubular solar still. *IDE World Cong. on Desalination and Water Reuse*. Bahamas. pp. 1-6.
- Tiwari GN, Madhuri G (1985) Effect of water flow over the glass cover of a single basin solar still with an intermittent flow of waste hot water in the basin. *Energy Conv. Manag.* 25: 315-322.
- Tiwari GN, Sinha S (1993) Parametric studies of active regenerative solar still. *Energy Conv. Manag.* 34: 209-218.
- Tiwari GN, Tiwari AK (2008) *Solar Distillation Practice for Water Desalination Systems*. Anamaya. Nueva Delhi, India. 270 pp.
- Tiwari GN, Dimri V, Singh U, Chel A, Sarkar B (2007) Comparative thermal performance evaluation of an active solar distillation system. *Int. J. Energy Res.* 31: 1465-1482.
- Vinothkumar K, Kasturibai R (2008) Performance study on solar still with enhanced condensation. *Desalination* 230: 51-61.
- Voropoulos K, Mathioulakis E, Belessiotis V (2004) A hybrid solar desalination and water heating system. *Desalination* 164: 189-195.
- Welty J, Wicks C, Wilson R (1999) *Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa*. 2^a ed. Limusa-Wiley. México. pp. 513-517.
- Yadav YP, Prasad AS (1995) Performance analysis of a high temperature solar distillation system. *Energy Conv. Manag.* 36: 365-374.
- Zeinab A, Ashraf L (2007) Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo, Egypt. *Desalination* 217: 52-64.
- Zeinab S, Abdel R, Ashraf L (2007) Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo-Egypt. *Desalination* 217: 52-64.
- Zhani K, Ben Bacha H (2010) Experimental investigation of a new solar desalination prototype using the humidification dehumidification principle. *Renew. Energy*. 35: 2610-2617.

WATER DESALINATION BY MEANS OF A SOLAR TUBULAR DISTILLER

Suher Carolina Yabroudi, Carmen Cárdenas, Leonardo Aldana, José Núñez and Lenin Herrera

SUMMARY

A solar tubular distiller (TSD) was designed and operated under the environmental conditions of Zulia State, Venezuela, in order to carry out a pilot scale study of its efficiency in desalinating water and to analyze its large scale implementation feasibility in rural communities with problems associated to brackish water sources while having great solar energy potential. Synthetic water was prepared with chloride concentrations of 3000, 10000 and 30000mg·l⁻¹, and used it to feed the TSD during 20 sampling days for each concentration, with a total experiment duration of four months. Volume, chloride, temperature, solar radiation and total dissolved solids were measured both for the

produced water as for the one fed and the concentrated solution. Results show that the produced water quality is independent of the nature of the material fed in all the analyzed parameters, while environmental conditions have a direct effect on the volumes of distilled water produced, and to a lesser degree in its quality, yielding an average volume of 2.42 l·m⁻²/day, with a maximum of 3.34 and a minimum of 0.93 l·m⁻²/day. Produced water quality reveals a very good performance, with removal efficiencies for chlorides and total dissolved solids >99%, all parameters being below the limits established by national and international standards for human consumption.

DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA EMPREGANDO UM DESTILADOR SOLAR TUBULAR

Suher Carolina Yabroudi, Carmen Cárdenas, Leonardo Aldana, José Núñez e Lenin Herrera

RESUMO

Um destilador solar tubular (DST) foi desenhado e operado sob as condições ambientais do Estado Zulia, Venezuela, a fim de estudar como teste piloto sua eficiência na dessalinização de água e analisar sua factibilidade para ser implementado em grande escala em comunidades rurais com problemas associados a fontes de água salobra e que contam com grande potencial de energia solar. Preparou-se água sintética com concentrações de 3000, 10000 e 30000mg·l⁻¹ de cloretos, empregada como alimentação ao DST durante 20 dias de amostra para cada concentração, com uma duração total na experimentação de quatro meses. Realizaram-se medições de volume, cloretos, temperaturas, radiação solar e sólidos dissolvidos totais, tan-

to para a água produzida como para a alimentação e solução concentrada. Os resultados refletem independência da qualidade da água produzida com a natureza da alimentação em todos os parâmetros analisados, no entanto, as condições ambientais têm um efeito direto nos volumes de água destilada produzida e em menor medida na qualidade da mesma, obtendo-se um volume médio de 2,42 l·m⁻²/dia, com máximo de 3,34 e mínimo de 0,93 l·m⁻²/dia. A qualidade da água produzida o DST mostra muito bom desempenho, com eficiências na remoção de cloretos e sólidos dissolvidos totais >99%, situando-se todos os parâmetros por baixo dos limites estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais para a água destinada ao consumo humano.