

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESALINIZACIÓN SOLAR, TIPO CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO DE AGUA DE MAR

EVALUATION OF A SOLAR DESALINATION SYSTEM, TYPE CYLINDRICAL PARABOLIC CONCENTRATOR FOR SEA WATER

Carolina Mercado¹, Elizabeth Lam¹

(1) Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ingeniería Química,
Avda. Angamos 0610, Antofagasta - Chile
(e-mail: cmercado.zapata@gmail.com)

Recibido: 25/09/2015 - Evaluado: 13/10/2015 - Aceptado: 29/10/2015

RESUMEN

En este trabajo, se presenta la metodología para el diseño, construcción y puesta en marcha de un desalinizador solar, basado en un colector cilíndrico parabólico y un destilador solar. La energía es suministrada a través del colector solar, el cual se encuentra conectado al destilador. El equipamiento fue puesto en marcha en las dependencias de la Universidad Católica del Norte. Es de tipo compacto, modular, de bajo costo, de fácil mantención y con gran vida útil, con una capacidad promedio de producción de agua destilada de 2,37 l/d, no obstante, ha de considerarse que esta tasa se encuentra directamente relacionada con las condiciones climáticas y caudal de agua de mar que ingresa al sistema, generando una eficiencia porcentual promedio de 34,04%. Se analizaron los resultados obtenidos con las respectivas observaciones, conclusiones y recomendaciones para futuros proyectos de energías renovables relacionados al equipo diseñado.

ABSTRACT

In this work, the methodology for the design, construction and commissioning of a solar desalinator, based on a parabolic trough collector and a solar still occurs, is presented. The energy is supplied through the solar collector, which is connected to the distiller. The equipment was set up on the premises of the Universidad Católica del Norte. It is compact, modular, low cost, easy maintenance and long life, with an average production capacity of distilled water of 2.37 l / d, however, it has to be considered that this rate is directly related with weather conditions and sea water flow entering the system, generating an average percentage of 34.04% efficiency. The results obtained with the respective findings, conclusions and recommendations for future projects associated to renewable energy equipment designed analyzed.

Palabras clave: destilación solar, energías renovables, colector cilíndrico parabólico, agua destilada
Keywords: solar desalination, renewable energy, parabolic cylindrical collector, distilled water

INTRODUCCIÓN

La industria minera basa su desarrollo en tres elementos básicos: energía, agua y recursos humanos, los dos primeros elementos claves considerados en este trabajo. Debido a la importancia del recurso hídrico, el hombre históricamente, ha sido dependiente de fuentes de agua como lo son ríos, lagos y depósitos subterráneos, lo que le ha permitido cubrir sus necesidades hídricas en la vida doméstica, desarrollar la agricultura y aplicar procesos industriales.

La falta de agua es uno de los temas vinculados a los problemas que acarrea la minería puesto que sus yacimientos se encuentran principalmente en zonas áridas, como el desierto de Atacama, y la región de Antofagasta. Ambas regiones, enfrentan graves problemas por la escasez de agua para el consumo humano y la agricultura. En Antofagasta, existen grandes conflictos con las comunidades indígenas Aymará y Atacameña, debido a que las empresas mineras han extraído agua desde la parte alta de la cordillera y altiplano, secando los bofedales (humedales en altura) en los cuales pasaba su economía ganadera de camélidos. En la región de Atacama, existe una gran competencia y conflictos entre la minería y la agricultura de exportación, debido a la disminución local de los recursos hídricos, especialmente por impactos de la minería y por expansión de la actividad minera.

Respecto al agua, se ha llegado al límite de lo explotable de napas subterráneas. La demanda total nacional del sector minero del recurso hídrico durante el año 2011 (consumo medio) fue casi de $13 \text{ m}^3/\text{s}$, con una distribución aproximada del 42 % en la región de Antofagasta y un 10 % en la región de Tarapacá (Cortés, 2013).

La energía solar es el recurso energético de amplia disponibilidad en toda la zona norte del país, alcanzando los niveles de radiación más elevados del mundo, llegando a valores de radiación global horizontal del orden de $2,618 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$ en la región de Antofagasta, donde se enmarca este proyecto (Cortés, 2013). Este nivel de radiación es suficiente para la instalación a gran escala de proyectos de generación de energía eléctrica tomando como fuente la energía solar, tales como fotovoltaicos y de concentración solar de potencia.

El colector cilíndrico parabólico es en la actualidad el que presenta mejores posibilidades de aplicación para una amplia gama de casos. Son concentradores solares de foco lineal, que transforman la radiación solar directa en energía térmica, gracias al calentamiento de un fluido de trabajo que puede llegar hasta los 400 °C en casos muy favorables. Por lo tanto, están englobados dentro de los colectores solares de media temperatura (Paredes, 2012).

La desalinización, es un proceso de separación que busca la eliminación de sales que contiene el agua. La clasificación de los procesos de desalinización que existen actualmente se divide en dos grupos, aquellos procesos que realizan un cambio de fase para la obtención de agua pura y aquellos procesos que funcionan sin cambio de fase. Entre los procesos que implican un cambio de fase se encuentran los siguientes: 1) Destilación solar 2) Destilación en múltiple efecto 3) Congelación y 4) Compresión de vapor. Los procesos que no incluyen un cambio de fase se dividen en: 1) Osmosis inversa 2) Electrodiálisis (Delgado, 2007).

Los procesos de desalinización requieren cantidades significativas de energía para lograr la separación de sales del agua de mar, lo cual representa una gran desventaja de esta tecnología, inviable para muchos países. Sin embargo, países del Medio Oriente, debido a los ingresos generados por el petróleo, tienen los recursos económicos suficientes, que les permiten invertir en equipos y aplicar la tecnología de desalinización (Huezo & Morán, 2012).

Según la literatura, respecto a las plantas de destilación solar, se ha detectado que el total de la capacidad instalada a escala mundial no supera los $5.000 \text{ m}^3/\text{día}$, las cuales constan generalmente de colectores parabólicos acoplados a pequeñas unidades MSF o MED (Barraza, 2011). La mayor ventaja que presenta esta tecnología es el bajo costo (de instalación y de operación).

Este trabajo busca aportar con nuevas fuentes de recurso hídricos e implementación de nuevas tecnologías, para lo cual se enfoca en el diseño y construcción de un sistema desalinizador solar, para la obtención de agua. El sistema está conformado por un concentrador solar cilíndrico parabólico (CCP) de acero inoxidable, el cual refleja la radiación solar recibida, la que es absorbida por el eje focal y un destilador solar del mismo material.

El equipo CCP se construyó con una tubería de cobre, la cual fue aplanada y pintada de color negro, con el fin de disponer de una mayor superficie de absorción. También se utilizó una plancha de acero inoxidable, la cual se dispuso parabólicamente, permitiendo el reflejo de la radiación sobre el tubo absorbedor. El destilador fue construido de tal manera que en la parte inferior permite el ingreso de vapor de agua a través de un recipiente, donde luego por efecto refrigerante de un serpentín que se encuentra en la parte superior, el vapor se enfría y vuelve a la fase líquida, es decir, se condensa, obteniendo como producto final agua destilada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño Colector cilíndrico parabólico

El diseño del colector cilíndrico parabólico se basa en los estudios realizados y resultados obtenidos por el equipo de investigación liderado por el Dr. Nisar Shaikh, dos alumnos de programa de postgrado de la Universidad de Stanford quienes realizaron una pasantía de investigación en el departamento de Física de la Universidad Católica del Norte por dos meses, equipo al cual se invitó a participar a alumna memorista Carolina Mercado estudiante de Ingeniería Civil Ambiental. El objetivo fue el diseño y construcción de un colector cilíndrico parabólico (Figuras 1 y 2) y un destilador solar, con el fin de desalinizar agua de mar, utilizando únicamente como fuente energética la solar. En la Tabla 1 se detallan los materiales utilizados en su construcción. Además se exploró el concepto de desalinización solar a baja escala en beneficio de comunidades aisladas, tomando en cuenta la gran cantidad de éstas que se encuentran en la región de Antofagasta.

Tabla 1: Materiales utilizados para construir el Colector Cilíndrico Parabólico

	COLECTOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO
Unidades	Materiales
(1)	Plancha de Acero Inoxidable 304 0.8mm (primera selección) 1,20 x 2 m
(2)	Terciado moldaje pino SM 15 mm 1,22 x 2,44 m
(1)	Pino dimensionado seco 1x3" x 3,2 m
(1)	Pino dimensionado seco 2x2" x 3,2 m
(1)	Cañería de cobre tipo M. 1/2" 6 m.- MADECO
(1)	Cañería de cobre 1" 2m.- MADECO
(1)	Válvula de retención 1/2" BRONZZO
(2)	Unión americana de bronce SO HE. 1/2".- NIBSA
(5)	Codos de cobre 1/2"
(5)	Tubo de aislación 1/2" 1 m.
(5)	Tubo de aislación esponja. 1/2" 1 m.
(12)	Tornillo madera cabeza plana. 6mm 1/2"
(20)	Tornillo madera soberbio. 3/16 x 1. 1/2"
(10)	Clavo acero liso 3,0x63. (10 unid)
(1)	Manómetro de presión
(1)	Termómetro análogo bimetálico
(1)	Terciado moldaje pino SM 15 mm 1,22 x 2,44 m



Fig. 1: Diseño Colector cilíndrico parabólico.



Fig. 2: Colector cilíndrico parabólico.

Para evaluar la eficiencia del colector se debe tener en cuenta los parámetros de temperatura ambiente, temperatura de las muestras de agua de mar y la presión que alcanza el agua dentro del sistema, este parámetro indicará cuando la temperatura irá aumentando o disminuyendo, y si es necesario ir moviendo el espejo reflectante, se pueden apreciar las variaciones de acuerdo al horario en las Figuras 3 y 4. Este punto es muy importante, ya que el movimiento del sol varía a cada instante y eso influye en el ángulo de incidencia al espejo reflectante, si la ubicación del espejo reflectante no es la correcta las pérdidas serán mayores, por lo tanto la energía almacenada para calentar el agua será mínima. En ocasiones los parámetros temperatura y presión eran muy bajas para la radiación que se percibía, pero también hay que tomar en cuenta que las deformaciones del espejo reflectante, el ángulo de incidencia y la temperatura y velocidad del viento influyen en la eficiencia del CCP.



Fig. 3: Parámetros medidos del Colector Cilíndrico Parabólico.

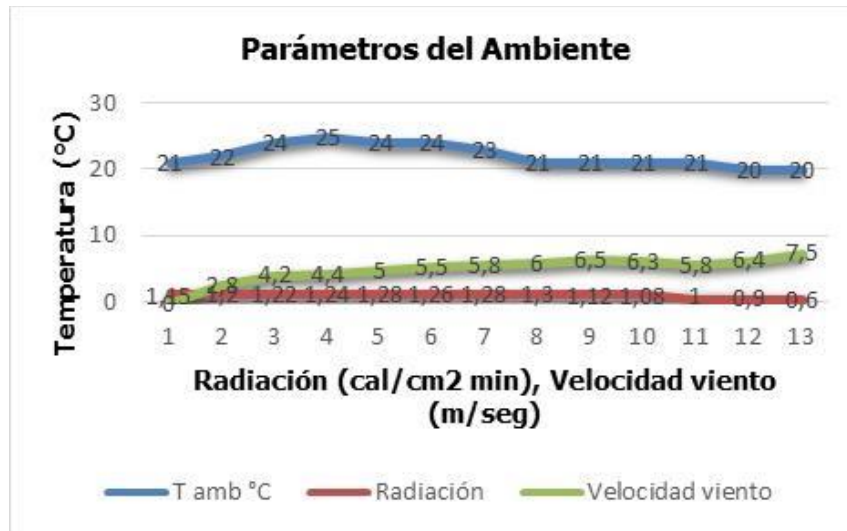


Fig. 4: Parámetros del ambiente obtenidos del Departamento de Física de la Universidad Católica del Norte.

Esquema del destilador

Para el esquema del destilador se tomó como referencia el diseño preliminar que realizó el Dr. Nisar durante su pasantía, el cual fue modificado. Este primer diseño se basaba en el principio de condensación, donde ingresa agua al destilador por un serpentín, actuando como alimentación y refrigerante a la vez, esta agua pasa por el concentrador cilíndrico parabólico y luego de convertirse en vapor vuelve a ingresar al destilador y el producto final es agua destilada. Para evitar futuras incrustaciones por la salinidad del flujo de agua en el segundo diseño que se muestra en la Figura 5 se utilizó una cañería de acero inoxidable para el serpentín, además el interior y cubierta del segundo destilador se construyó con una plancha de acero inoxidable (de primera calidad), luego se recubrió con lana mineral para aislar y finalmente se recubrió con una chaqueta de acero galvanizado. El resultado final se puede apreciar en la Figura 6.

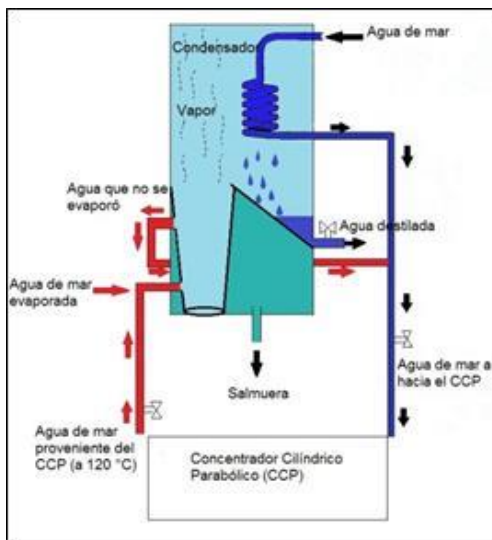


Fig. 5: Diseño del equipo implementado y funcionamiento.



Fig. 6: Destilador solar.

Mejoras para puesta en marcha de equipo integral

Se efectuaron diversas mejoras con el fin de incrementar la operatividad del equipo. Primero se cambió del lugar físico donde se encontraba instalado, ya que la temperatura y velocidad del viento influía demasiado en los resultados del CCP. Luego que se trasladó a un lugar más protegido (Figura 7) se obtuvo mejoras en el funcionamiento. Con respecto a la alimentación del sistema (bidón y conducto de alimentación) se recubrió el conducto de alimentación con poliestireno expandido como se observa en la Figura 8, debido a que la radiación aumentaba demasiado la temperatura del agua de entrada o alimentación y esto afectaba negativamente al proceso, puesto que esta agua actuaba como refrigerante dentro del destilador y si su temperatura era muy alta, el gradiente de temperatura en el interior del condensador era mínimo, con esto la eficiencia del destilador disminuye al no condensarse el vapor de agua que proviene del CCP, por lo tanto



Fig. 7: Equipo integral.



Fig. 8: Mejoras en equipo integral.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se consideraron diversos puntos muestrales, a los cuales se les midió pH, temperatura y conductividad eléctrica. Los puntos fueron: Muestra madre (agua de mar), agua obtenida del equipo a partir de agua salada (condensada), agua de la llave y salmuera (agua de residuo del sistema).

Eficiencia del desalinizador solar

La eficiencia del equipo integral se definirá como la razón entre el agua de mar ingresada y la producción de agua condensada diaria, esto es:

$$\eta = 100 \times \frac{\text{agua condensada}}{\text{agua de mar ingresada}} \quad \text{Eficiencia del desalinizador} \quad (1)$$

Para determinar la eficiencia del desalinizador se realizaron pruebas durante 6 días entre las 09:00 y 17:00 horas en el mes de Febrero del año 2014 (ver Tabla 2). Se utilizó un bidón cuya capacidad máxima es de 20 litros, el cual fue llenado diariamente al comenzar cada fase de experimentación, para mantener las mismas condiciones en todas las pruebas. Se midió cada día cuánta agua de mar ingresó al sistema y cuánta agua destilada se obtuvo, con el fin de calcular el rendimiento del desalinizador solar. Durante los días de prueba se midió cada 30 min el agua destilada obtenida. El día de mayor producción fue el 18 de Febrero y en la Tabla 3 se puede apreciar los horarios en que más aumenta la eficiencia del equipo.

Tabla 2: Rendimiento del equipo

Fecha	Temperatura Promedio (°C)	Radiación h/m2 día	kW	Producción agua destilada (ml)	Eficiencia %
18-02-2014	22,3	6,63		2,37	46,47
19-02-2014	22	6,24		1,91	41,52
20-02-2014	21,5	6,13		1,57	32,04
21-02-2014	21	6,05		1,33	30,93
22-02-2014	20,2	5,98		1,25	28,41
23-02-2014	19,7	5,88		1,17	24,89

En la Tabla 2, se muestran las condiciones climáticas en las que se realizó el experimento y los resultados de la producción del desalinizador solar. Los datos de la radiación solar global se obtuvieron del Centro Tecnológico Nuevos Horizontes, Chile.

Tabla 3: 18/02/14 día de mayor producción de agua destilada.

Hora (min)	T bidón °C	T amb °C	P Psi	T salida CCP °C	Agua destilada l
10:00 - 10:30	20	20	7	34	0,032
10:30 - 11:00	20	20	10	40	0,044
11:00 - 11:30	21	21	15	48	0,068
11:30 - 12:00	21	23	20	68	0,081
12:00 - 12:30	21	24	30	80	0,119
12:30 - 13:00	21	24	40	94	0,205
13:00 - 13:30	21	24	68	122	0,338
13:30 - 14:00	21	24	75	124	0,355
14:00 - 14:30	21	23	66	120	0,326
14:30 - 15:00	21	21	60	118	0,254
15:00 - 15:30	21	21	58	98	0,191
15:30 - 16:00	21	21	55	96	0,132
16:00 - 16:30	21	21	50	92	0,126
16:30 - 17:00	21	20	40	89	0,106
					2,377

Determinación de parámetros

La muestra de agua de mar fue tomada de la costa de la ciudad de Antofagasta, específicamente a un costado del balneario municipal, en la zona rocosa. Las concentraciones iniciales del agua de mar antes de la destilación solar se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros del agua de mar a analizar

pH	7,8
Conductividad Eléctrica	53,2 <i>mS/cm</i>
Temperatura	16,5 °C

Tabla 5: Parámetros 4 muestras.

Tipos de muestras	pH	Temperatura °C	Conductividad Eléctrica <i>mS/cm</i>
Agua de mar (bidón)	7,5	20	46,7
Agua destilada (equipo diseñado)	6,6	21	0,2459
Agua potable	7,4	17	4,1258
Salmuera (residuo equipo)	7,49	24,5	47,4

Determinación de los parámetros en distintas muestras

Se realizó la medición de pH, temperatura y conductividad en las 4 muestras de agua, conforme a la técnica descrita anteriormente (ver Tabla 5).

El agua obtenida de la destilación presenta una baja conductividad eléctrica, lo que estaría indicando la baja concentración de sales disueltas, a tal punto que su salinidad se asemeja al "agua potable". Esta "agua pura" debería tener un pH de 7, pero no es así. Su pH es ácido. La razón de este fenómeno se atribuye a que el "agua pura" absorbe monóxido de carbón de la atmósfera, habiendo por ende perdido la mayor parte del carbónico disuelto. A pesar de que su pH es ácido no contiene minerales ácidos. El valor obtenido 6,6 se encuentra dentro del rango de pH observado en agua destilada que es 5,8 a 7.

Respecto a la calidad del agua obtenida por el equipo, la conductividad es el doble del valor del agua potable, y disminuye notablemente del valor del agua madre, como era de esperar, encontrándose este dentro de los rangos de la norma de calidad del agua.

CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- ✓ La obtención de agua destilada mediante un destilador solar es viable. Aunque el volumen obtenido es totalmente dependiente de las condiciones climáticas, especialmente de la radiación solar, la cual es variable. Otros factores climáticos incidentes son la nubosidad y la velocidad del viento. Se comprobó que a mayor radiación solar mayor es el volumen de agua destilada obtenida.
- ✓ Se concluye que la desalinización de agua de mar con energía solar es un método factible para obtener agua con baja conductividad eléctrica. Afortunadamente queda comprobado que las muestras de agua se encuentran por debajo de los parámetros medidos en la muestra inicial. Desalinizar el agua de mar mediante éste método, tiene la ventaja de que no hay costo de operación ni mantenimiento, ya que los destiladores solares son resistentes a los factores climáticos que se puedan presentar.
- ✓ Si el equipo es utilizado en zonas cercanas a las aguas a tratar se evitará el problema de trasladar el agua, además se obtendrán mejores resultados, debido a que el agua de mar al ingresar al sistema de alimentación vendrá con una temperatura menor a la que tenían las muestras analizadas en esta memoria.

Al sacar muestras de agua a poca profundidad y además trasladarla a otro lugar genera variaciones en los parámetros a analizar, es por esto que estando en zona costera como por ejemplo la Isla Santa María, donde las muestras no estén con gran contaminación ni altas temperaturas, el agua obtenida puede utilizarse para riego o distintas actividades como el "pre-limpieza" de los productos del mar que se extraen día a día, hidroponía de diversos vegetales y riego.

- ✓ La puesta en marcha de un prototipo como el presentado, dado que la tasa de producción de agua es baja, servirá como un aporte para el uso de viviendas, sin embargo, no tendrá la capacidad de suplir al 100 % las necesidades del recurso hídrico.

REFERENCIAS

1. Barraza, R. (2011). *Solar Desalination Systems Research and Modeling Process*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias de Ingeniería Mecánica. University of Wisconsin, Madison. 230, 35. [fecha consulta: 8 Abril 2013] Disponible en <http://sel.me.wisc.edu/publications-theses.shtml>
2. Cortés, M.C. (2013). La Energía Solar en el Norte de Chile. Desafíos y Oportunidades. *ÁREAMINERA* [en línea]. Mayo 2013, n° 77 [fecha consulta: 12 Junio 2013]. Disponible en http://www.aminera.com/pdf_revistas/am077.pdf
3. Delgado, D.V. (2007). *Análisis Comparativo De Los Procesos De Desalinización Del Agua: Destilación Súbita Por Efecto Flash (MSF) Frente Osmosis Inversa (OI), Bajo La Metodología De Evaluación De Ciclo De Vida*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico. Guayaquil. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. 131, 13. [fecha consulta: 29 Octubre 2013] Disponible en <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/13424/1/Tesis.pdf>
4. Huezó, F.R. & Morán, J. I. (2012). *Diseño, construcción y validación de un destilador solar para uso en los laboratorios de la planta piloto de la Escuela de Ingeniería Química*. Tesis para optar al título de Ingeniero Químico. Ciudad Universitaria, Universidad de El Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. 209, 45. [fecha consulta: 3 Marzo 2014] Disponible en <http://ri.ues.edu.sv/2066/>
5. Paredes, C. (2012). *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*. Tesis para optar al título de Ingeniero Técnico de Minas, Especialidad en Recursos Energéticos, Combustibles y Explosivos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Minas. Departamento de Física Aplicada a los Recursos Naturales. 83, 23. [fecha consulta: 5 Marzo 2014] Disponible en http://oa.upm.es/14011/1/PFC_CARMEN_PAREDES_VELASCO.pdf

