

DESALACIÓN DE AGUA MARINA: NUEVAS ALTERNATIVAS UTILIZANDO CONCENTRADORES SOLARES

Erich Saettone Olschewski
Instituto de Investigación Científica (IDIC)
Universidad de Lima

SUMILLA

Se presenta una síntesis de la investigación desarrollada en la Universidad de Lima durante los tres últimos años, orientada a buscar alternativas para obtener agua desalada aprovechando la energía solar. Para este fin, se utilizaron los dos concentradores solares más eficientes: el de geometría cilíndrica parabólica y el de tipo Fresnel lineal. El trabajo experimental se orientó a dos aspectos: primero, verificar si el uso de aislante térmico en el colector de calor mejora el rendimiento del destilador y, segundo, comparar el desempeño del destilador utilizando los dos tipos de concentradores solares antes mencionados. Todas las pruebas experimentales se realizaron en Cocayalta (Provincia de Canta) en los meses de invierno y, en la Universidad de Lima, durante el verano.

Como resultado de los experimentos, se verificó que el colector de calor con aislamiento térmico mejora el rendimiento del destilador casi al doble. Además, al comparar el desempeño entre ambos concentradores solares, se observó que mientras el cilíndrico parabólico es un 20% más eficiente que el Fresnel lineal, este es un 20% más barato.

A pesar de la eficiencia de ambos equipos, alrededor de 46% para el cilíndrico parabólico y 38% para el Fresnel lineal, la producción es aún pequeña, alrededor de 5 litros diarios de agua desalada, por lo tanto, es necesario combinar las técnicas utilizadas por los destiladores clásicos y los concentradores solares para incrementar la productividad y pueda ser realmente una alternativa que permita paliar el problema económico y social que genera la escasez de agua en nuestra costa.

Finalmente, el análisis fisicoquímico del agua obtenida con estos equipos, muestra que prácticamente se encuentra libre de sales disueltas, ya que los valores de salinidad y conductividad obtenidos son mucho menores que los permitidos por la ley nacional.

PALABRAS CLAVES: Energía solar, radiación solar, desalinización de agua marina, energía termosolar, concentradores cilíndrico parabólicos, concentradores Fresnel lineal, destiladores solares, escasez de agua.

ABSTRACT

It is presented a synthesis about a research developed at the University of Lima for the past three years, guided to find alternatives to obtain fresh water using solar energy. For this purpose, the two more efficient solar concentrators are used: the parabolic-trough concentrator and the linear Fresnel one. The experimental work was focused on two aspects: First, to check an increase on distiller efficient with using thermal isolation on the heat collector and second, to compare the performance of the distiller using the two types of solar concentrator mentioned above. All experiments were realized in Cocayalta (Canta's province, Lima's region) during winter months and in the University of Lima, during summer.

As a result of experiments, it was verified that a heat collector with thermal isolation almost doubled the distiller efficiency. Moreover, comparing the performance between the two solar concentrators, it was observed that while the parabolic trough is 20% more efficient than the linear Fresnel, the last one is 20% cheaper.

Despite the efficiency of both solar concentrators, about 46% for the cylindrical parabolic and 38% for the linear Fresnel, the production is still small, about 5 liters per day of fresh water, therefore, it is necessary to combine both techniques utilized by classical distillers and solar concentrators to increase productivity and can be really an alternative that can overcome the economic and social problems generated by water scarcity in our coast.

Finally, physicochemical analysis of fresh water obtained by solar desalting, shows that is almost free of dissolved salts, as the salinity and conductivity values obtained are much lower than those permitted by national law.

KEYWORDS: *Solar energy, solar radiation, seawater desalination, solar thermal energy, parabolic-trough concentrator, linear Fresnel concentrator, solar distillers, water scarcity.*

INTRODUCCIÓN

¿Existe escasez de agua dulce en nuestro país?

Nuestro país es uno de los países que cuenta con la mayor cantidad de agua dulce por habitante, comparado con el resto de países en el mundo, por lo que aparentemente es absurdo pensar en que se deba invertir tiempo y dinero en investigación sobre desalación de agua marina. En efecto, según UNESCO, cada peruano puede contar con 74500 m³ de agua dulce anualmente. Sin embargo, esta cifra no refleja realmente la situación de nuestro país, ya que la distribución de la población en nuestro territorio no es homogénea, siendo su mayor concentración en las zonas desérticas. Actualmente, alrededor del 70% de la población reside en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, la cual cuenta con solo el 1,8% del total de agua dulce disponible en nuestro país; mientras que el 26% de la población dispone del 97,7% en la vertiente oriental. El 100% se completa con la población que vive en la vertiente del Titicaca (Servindi 2013).

Como consecuencia, se tiene una acentuada desigualdad en la distribución de los recursos acuíferos, y es la población de bajos recursos la que termina sufriendo más este problema. Por ejemplo, solo en Lima y Callao, el 9% de la población no cuenta con conexión a la red de agua, es decir alrededor de 1,5 millones habitantes, la mitad de la cual se abastece por camiones cisterna, y la otra mitad por agua de pozo, acequia, etc. que no cuentan con ningún tratamiento. El 10% de la población ha sufrido enfermedades por el consumo de agua contaminada (CIT Perú 2013) por lo que acaban pagando hasta diez veces más por un agua muchas veces contaminada. En consecuencia, esta población es más vulnerable a enfermedades como infecciones, diarreas, cólera, malaria, dengue, etc., principalmente los niños menores de cinco años y los adultos mayores de 65.

Un indicador del nivel de desarrollo de un país es la desnutrición crónica que sufren los niños menores de cinco años de edad, la cual se obtiene al comparar la talla del niño respecto a la esperada para su edad y sexo. Una población de baja estatura es consecuencia de los efectos acumulados de una alimentación precaria y de episodios repetitivos de infecciones estomacales y respiratorias. Esta condición de vida afecta severamente el desarrollo de la capacidad, no solo física, sino también intelectual, emocional y social del 18% de la población infantil de nuestro país, correspondiendo al 31% de los niños de las áreas rurales y 10% en áreas urbanas. Las dos variables que más influyen en la desnutrición infantil son: la educación de la madre y la disponibilidad de agua tratada. La cuarta parte de los niños que sufren desnutrición crónica en el Perú no cuentan con acceso a agua tratada (INEI 2011).

Este problema no solo afecta a la población, sino también al sector productivo del país. Por ejemplo, según la Autoridad Nacional de Agua, en los próximos diez años, el 75% de las áreas de cultivo en la región Ica será afectado por la escasez de agua extrema. De esta forma, la escasez de

agua dulce para riego y consumo humano en la costa peruana es un problema que se viene acentuando paulatinamente, no solo como consecuencia del cambio climático, sino también por la deficiente infraestructura en su almacenamiento y distribución, además de no contarse aún con una cultura de su ahorro, principalmente en las grandes ciudades (Grau 2011). Para enfrentar en parte esta situación, existen varias alternativas para obtener nuevas fuentes de agua dulce: (i) aprovechar las aguas subterráneas almacenadas en el interior de la Cordillera de Los Andes, que se comporta como una esponja debido a las filtraciones causadas por las lluvias, lagunas y ríos; (ii) reciclar aguas servidas; (iii) construcción de trasvases y microcuencas, y; (iv) desalación de agua marina.

Respecto a la desalación, existen varios procesos que se utilizan actualmente en diversos países, y se pueden clasificar en: (i) métodos por separación de agua, entre los cuales se encuentra la destilación (como la *flash* multi-etapas – MSF, la de múltiple efecto – MED, la solar) y la ósmosis inversa; (ii) métodos por separación de sales, por ejemplo el intercambio iónico y la electrodiálisis. Todos ellos presentan ventajas y desventajas respecto al rendimiento, costo de inversión y operativo, impacto ambiental, etc.

En nuestro país, dos factores decisivos que impiden la implementación de la mayoría de estas técnicas (aparte de que no contamos con la tecnología ni desarrollado la investigación que permitan adaptarlas a nuestro país) son la fuerte inversión económica y el alto requerimiento de energía eléctrica. Sin embargo, las plantas desalinizadoras solares, a pesar de tener una productividad mucho menor frente a las otras tecnologías, tienen la ventaja de no depender de la red eléctrica, por lo tanto se pueden instalar hasta en lugares remotos donde la radiación solar sea adecuada. Además, como resultado de varias décadas de investigación, sus costos han disminuido notablemente y su eficiencia ha ido mejorando gradualmente, con un impacto ambiental mínimo.

¿Es posible aprovechar la energía solar en el Perú?

La energía solar es una fuente de vida y origen de la mayoría de las demás formas de energía en la Tierra. Cada año la radiación solar aporta a la Tierra la energía equivalente a 4 mil veces la cantidad de energía que consume la humanidad. Felizmente, el Perú es uno de los países más privilegiados respecto a la incidencia de radiación solar en todo el planeta. Nuestra región andina, principalmente en Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno, reciben una de las mayores cantidades de radiación solar, de 7 a 7,5 kWh/m² en promedio, comparable a las que inciden en el oeste australiano, el Sahara, la costa oeste norteamericana y la península Arábiga. Por este motivo, una alternativa para paliar el problema del agua implica desarrollar, aún más, la tecnología solar para aplicarla a la desalación del agua marina.

Así como en la región andina, también se tienen zonas costeras privilegiadas con este recurso, como las regiones Tumbes, Piura, Lambayeque e Ica, sobre las cuales se recibe la radiación solar

alrededor de $6,5 \text{ kWh/m}^2$ en promedio (SENAMHI 2003) y cuentan con brillo solar alrededor de 300 días anualmente. En la figura 1 se observa que en las regiones de Lambayeque, Piura y Tumbes (especialmente en las provincias de Lambayeque y Sechura), incide una cantidad de radiación un poco menor que en Arequipa, con máximos de 6 a $6,5 \text{ kWh/m}^2$ en promedio, y en las regiones de Ica, Tacna y La Libertad, esta radiación incide con un poco menos intensidad todavía. Sin embargo, es importante recalcar que la diferencia entre la costa norte y la región surandina es que la incidencia de radiación es más constante durante todo el año en el primer caso. Obsérvese que valores de radiación solar menores a 5 kWh/m^2 suceden sólo en el mes de junio para las regiones de Lambayeque y Tumbes, mientras que para Arequipa suceden para los meses comprendidos entre abril y setiembre.

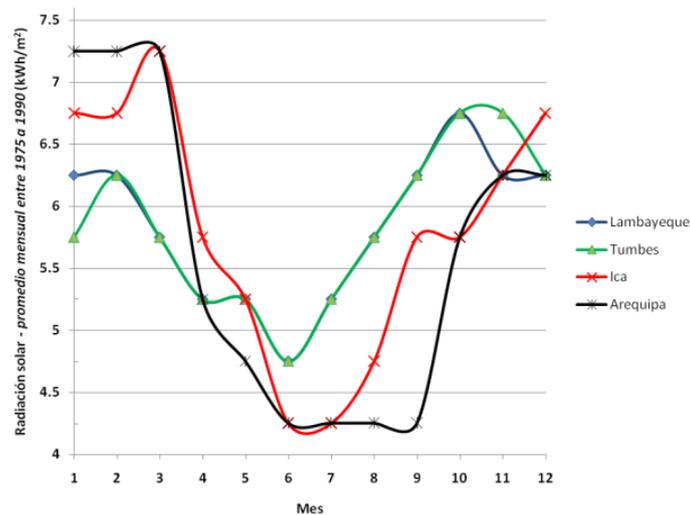


Figura 1. Gráfica que muestra la radiación solar promedio respecto a los meses del período 1975 – 1990 de las regiones con mayor incidencia en el Perú. Fuente: SENAMHI 2003, elaboración propia.

El promedio anual de radiación solar en el mismo periodo de años se muestra en el gráfico de barras mostrado en la Figura 2. En este gráfico se aprecia mejor que las cuatro regiones del Perú que recibieron mayor radiación solar promedio durante estos años fueron Piura, Tumbes y Lambayeque, seguido de Ica con una intensidad intermedia, y en Arequipa, Moquegua y Tacna con menor intensidad.

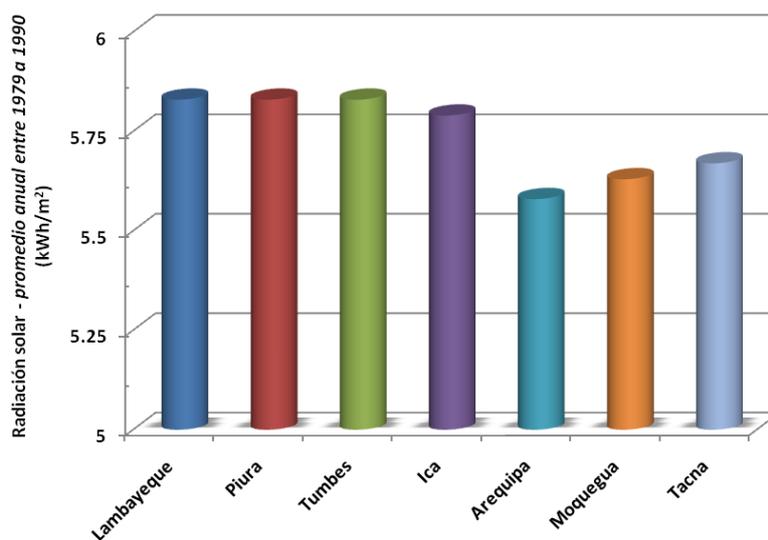


Figura 2. Gráfica que muestra la radiación solar promedio diaria, comprendida en el período 1975 – 1990, de las regiones con mayor incidencia en el Perú. Fuente: SENAMHI 2003, elaboración propia.

A pesar que esta información ha sido calculada con datos dentro del periodo comprendido entre 1979 y 1990, la tendencia en los años actuales se ha mantenido.

¿De qué se trata la desalación con energía solar?

En la actualidad se cuenta con diversos equipos desalinizadores solares que utilizan el mismo principio, la destilación, pero sus geometrías y materiales son muy variados, de forma que sus rendimientos y productividad son muy diversos. La destilación es un proceso por el que el agua marina debe ser evaporada, para luego ser condensada, de esta forma se obtiene agua pura sin residuos de sales ni gérmenes. La evaporación se produce a partir de los 60°C aproximadamente, para lo cual se utilizan recintos sellados herméticamente. Los equipos más simples operan al ser colocados bajo el Sol, los cuales pueden ser fijos o acompañando el movimiento solar, y constan de uno o varios recipientes donde se coloca el agua marina, la cual se evapora en un ambiente cerrado calentado por los rayos solares que provocan el efecto invernadero dentro del recinto, y se condensa en una o varias superficies más frías. La producción de agua destilada depende directamente de la intensidad de la radiación solar recibida, también de la profundidad del agua marina en el contenedor, lo cual se explica por la baja conductividad térmica del agua marina, la temperatura ambiental, temperatura inicial del agua, geometría del recipiente, materiales aislantes utilizados, cubiertas absorbedoras de calor, entre otros (Bradán 2005). Pruebas experimentales muestran que la cantidad de agua destilada obtenida en estos equipos bajo radiación solar intensa ($> 1 \text{ kW/m}^2$), alcanzan diariamente desde $1,4 \text{ lt/m}^2$ (bandeja plana y fija, Figura 3-a), $1,8 \text{ lt/m}^2$ (bandeja plana con seguidor solar, Figura 3-b), $1,8 \text{ lt/m}^2$ (bandeja plana fija con espejos interiores, Figura 3-c), $4,3 \text{ lt/m}^2$ (bandeja escalonada y fija, Figura 3-d) y $5,2 \text{ lt/m}^2$ (bandeja escalonada con seguidor solar, Figura 3-

e) (Muslih 2010). Los equipos con seguimiento solar son más productivos pero también más caros. El hecho de que los equipos de bandeja escalonada sean mucho más eficientes que los de bandeja plana se debe a que, a pesar de que el aire es un pésimo conductor de calor, puede transferir calor por corrientes de convección, efecto que se puede minimizar reduciendo el espacio entre el material absorbedor de calor y el vidrio.

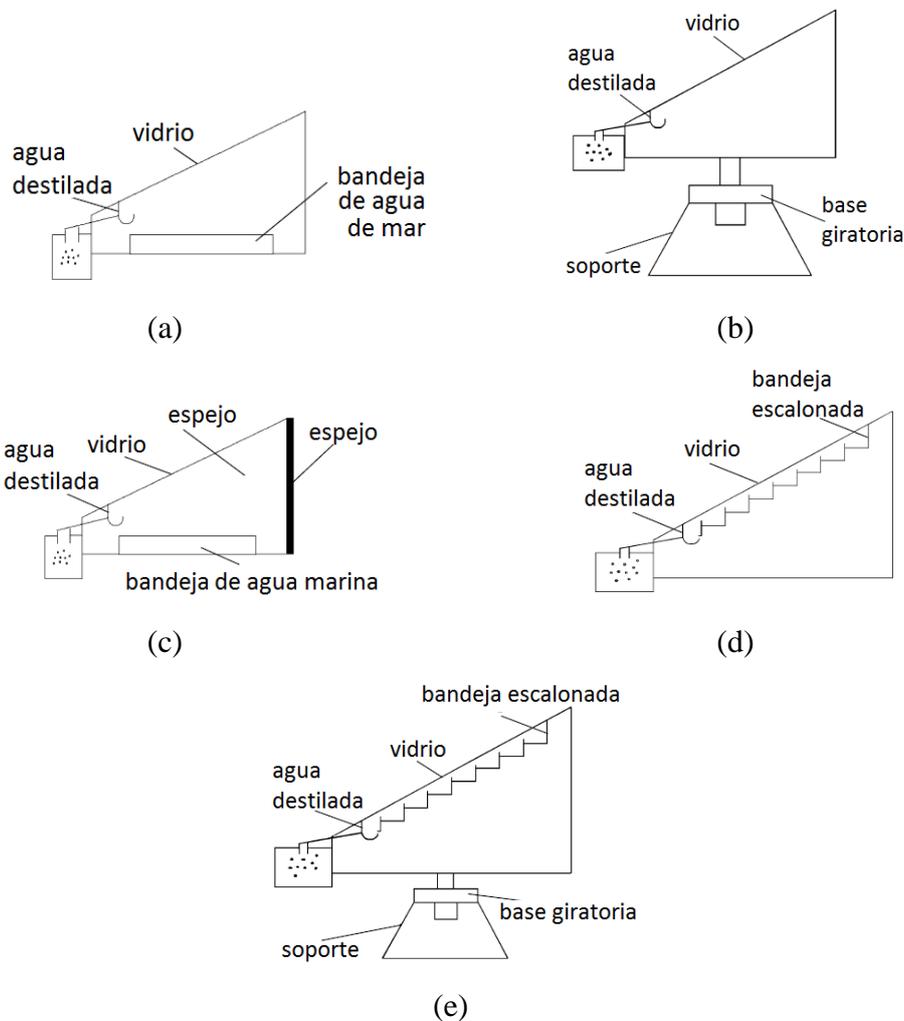


Figura 3: Esquema de los tipos de destiladores solares más comunes. Fuente: traducido al español de Muslih 2010.

Por otro lado, los equipos mencionados en el párrafo anterior son más productivos y eficientes si se les acopla a un colector solar, de forma que el agua que ingrese al destilador sea previamente calentada (Cipollina 2005). De esta forma se pueden utilizar varios tipos de colectores, como los planos simples con cubierta absorbidora de calor, que llegan a incrementar la producción en un 36% (Bradán 2005); los colectores planos con tubos al vacío, que incrementan la producción en 60% (Abdallah 2009). A este nivel existen los destiladores de múltiples etapas, donde el agua marina reposa en bandejas dispuestas horizontalmente una sobre otra, de forma que se aprovecha

más el calor cedido durante la condensación; estos necesariamente deben operar acoplados a un colector solar (plano o de tubos al vacío), y alcanzan un mayor rendimiento, pudiendo alcanzar, en teoría, hasta 11 lt/m^2 (Mahmoud 2010). Se ha reportado también la utilización de un concentrador cilíndrico parabólico incorporado en el interior de un destilador simple, verificándose un incremento de 25 a 35% en la producción de agua destilada (Minasian 1997). Los equipos descritos en este párrafo combinan tecnologías solares, que además de aumentar el rendimiento, disminuyen costos (Cipollina 2005). El bajo rendimiento de los equipos solares descritos se debe principalmente a las excesivas pérdidas de calor al ambiente.

Otra forma de obtener agua desalada es por el proceso de la ebullición, el cual requiere alcanzar una mayor temperatura y mayor energía para producir el cambio de estado. Para lograr este proceso se pueden utilizar concentradores de radiación que constan de superficies reflectoras que presentan una enorme variedad de formatos, geometrías y materiales. En la figura 4 se muestra una clasificación de las diferentes formas de concentrar la radiación solar con espejos.

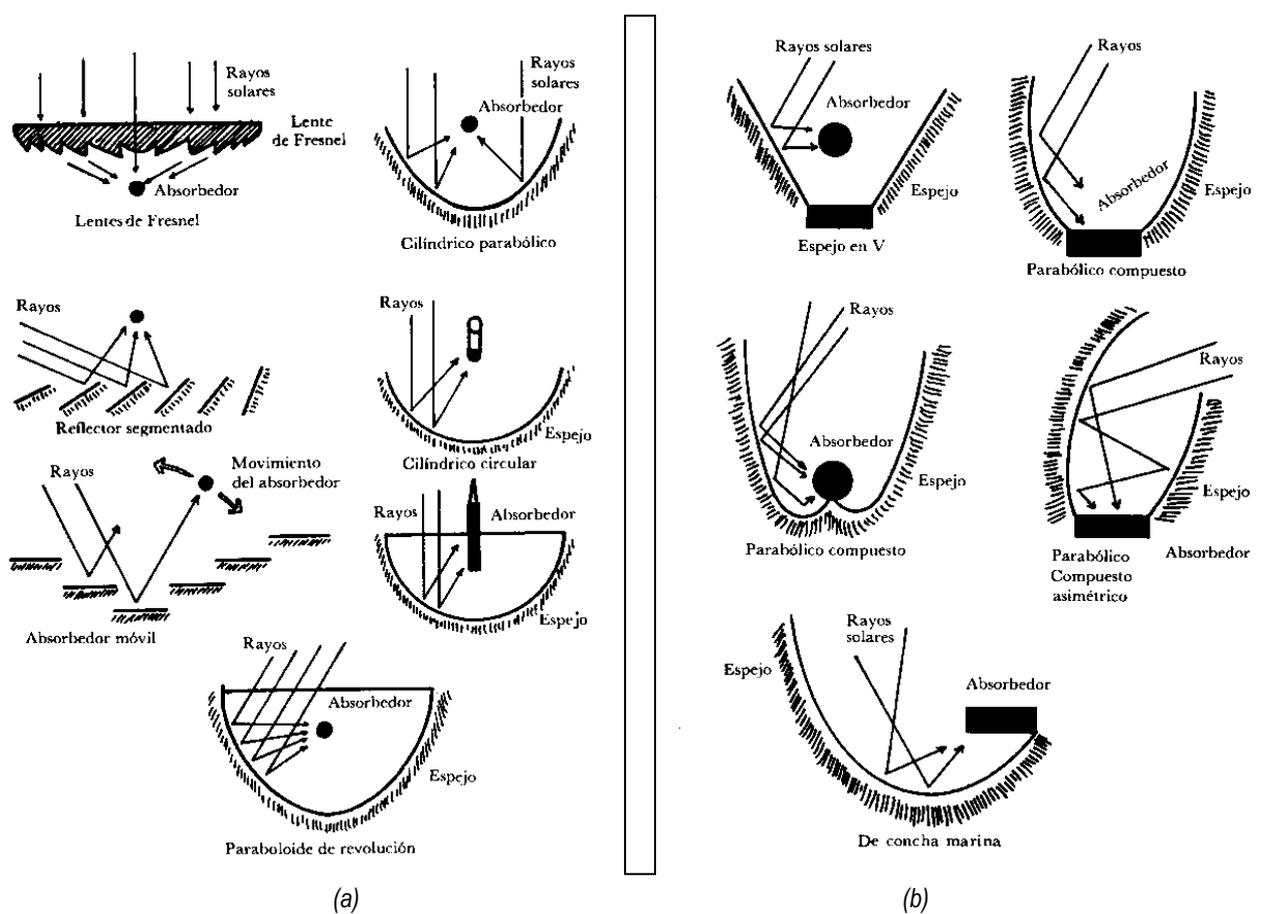


Figura 4. Esquema que clasifica a los concentradores solares según su geometría, con seguimiento del Sol (a) y los estáticos o fijos (b). Fuente: Tonda 1993.

Como se puede observar, se tiene una buena cantidad de opciones que se pueden aprovechar para aplicar en el proceso de la desalación. Estos concentradores presentan una mayor eficiencia en

la concentración de la radiación solar permitiendo alcanzar altas temperaturas, aproximadamente 300°C, ya que poseen una pequeña área de pérdida de calor (absorbedor o colector de calor) frente a una gran área de captación de energía solar. Por este motivo, esta tecnología se viene desarrollando rápidamente en diversos lugares del mundo principalmente como fuente de energía eléctrica (Fernández-García 2010).

Los concentradores que se han escogido para las pruebas experimentales son los dos más eficientes que se han reportado en publicaciones científicas: el concentrador de geometría cilíndrica parabólica (CCP), que ha demostrado ser en los últimos 30 años, el que ha permitido desarrollar la energía termosolar a niveles tan competitivos como lo son otras fuentes de energía, con proyectos exitosos en el desierto de Mojave (California) con 350 MW. El otro concentrador escogido es el de tipo Fresnel lineal (CFL) (Mathur 1991), que a pesar de no tener tanta eficiencia, ha demostrado ser más barato y presenta algunas ventajas frente al cilíndrico parabólico. En efecto, mientras que el CCP tiene una mayor eficiencia óptica debido a que se le inclina “observando” directamente al sol, el CFL no tiene esta capacidad, sin embargo compensa esta deficiencia con su menor costo de construcción. Se ha reportado que para generar la misma potencia eléctrica, una planta con CFL costaría 55% menos que una con CCP, a pesar que necesita cubrir un área 36% mayor (Morín 2012). La diferencia radica en la geometría de las superficies reflectoras: el CCP necesita grandes espejos curvos de perfil parabólico, tecnológicamente difícil y caro de construir y mantener, además de estar soportados por grandes estructuras mecánicas y móviles; sin embargo el CFL utiliza espejos pequeños y planos instalados sobre una superficie plana, como se muestra en la Figura 5.

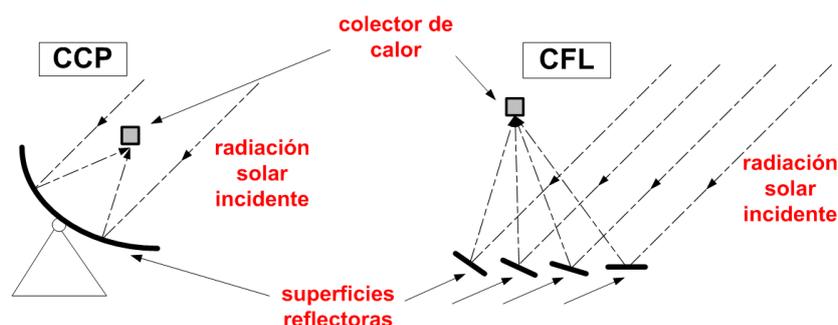


Figura 5 – A la izquierda se muestra en el esquema de un CCP. A la derecha el correspondiente a un CFL. Las líneas discontinuas indican la dirección de la radiación solar incidente y la reflejada sobre el recipiente colector de calor.

Otro aspecto importante es la eficiencia óptica y térmica anual promedio. Para un CCP, la eficiencia óptica está alrededor del 58% y la térmica en un 85%. Para un CFL estas eficiencias son de 43% y 76%, respectivamente. La eficiencia global anual de una planta generadora de electricidad con CCP está en 15%, mientras que una con CFL solo alcanza el 9,3% (Morín 2012).

Otra ventaja de los CFL frente a los CCP, es que el tubo utilizado como colector de calor no gira junto con las superficies reflectoras, evitando así el uso de uniones móviles por donde circule el líquido portador de calor, lo que lo hace más atractivo para la construcción de plantas generadoras de electricidad (Velásquez 2010). También es importante mencionar que el mantenimiento y limpieza de las superficies reflectoras es más sencillo y económico. Inclusive, algunas modificaciones a la geometría original se han incorporado para mejorar su eficiencia óptica, como por ejemplo utilizar espejos de superficie reflectora curva, sea esférica o parabólica (Abbas 2012).

En este artículo se presentan los resultados experimentales obtenidos, con financiamiento de la Universidad de Lima durante los tres últimos años, respecto a la desalación de agua marina, utilizando los dos tipos de concentradores más eficientes: el cilíndrico parabólico y el Fresnel lineal. Se comparan la cantidad de agua destilada producida, la eficiencia del equipo, los costos de inversión para, de esta forma, poder analizar la viabilidad de su uso como una nueva opción para el tratamiento del agua marina. Así, promoviendo la investigación, la Universidad contribuye a alentar la utilización de energías renovables de forma que el país se encuentre mejor preparado para enfrentar las consecuencias del cambio climático en los próximos años.

DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

Los concentradores fueron diseñados y construidos entre los años 2010 y 2013, con el objetivo de alcanzar altas temperaturas que permitan producir vapor a partir del agua marina. Este vapor, al ser condensado, proporciona agua destilada que puede ser mineralizada para su consumo. Ambos equipos han sido desarrollados bajo los siguientes criterios: (i) no depender de la red eléctrica, (ii) ser construidos con los materiales más simples de forma que puedan ser adquiridos en cualquier ciudad del país y, (iii) prescindir de un sistema electromecánico de seguimiento solar.

El principio de funcionamiento de los equipos de desalación utilizados, un concentrador Fresnel lineal (CFL) y un concentrador cilíndrico parabólico (CCP), es la reflexión de la radiación solar con el uso de superficies reflectoras, concentrándola sobre un recipiente colector de calor de geometría lineal, con el propósito de calentar el líquido en su interior y evaporarlo. La diferencia entre ambos equipos es la geometría de la superficie reflectora: en el CCP se trata de una superficie curva de perfil parabólico, y en un CFL se trata de espejos planos dispuestos sobre una superficie plana, como se muestra en la Figura 5.

En ambos casos, el equipo está formado por tres partes principales:

- (i) Superficie reflectora.
- (ii) Recipiente colector de calor.
- (iii) Sistema hidráulico.

A continuación se describen ambos equipos.

El concentrador cilíndrico parabólico (CCP)

Para su construcción se utilizó un soporte metálico que sostiene los perfiles de madera previamente cortados con la curvatura parabólica, los que a su vez, soportan la superficie reflectora (formada por dos planchas de aluminio de 85% de reflectancia y 2,5 m de largo, 1,25 m de ancho y 0,4 mm de espesor). El perfil lateral de la superficie reflectora tiene la curvatura de una función parabólica, cuya ecuación es:

$$y = \frac{x^2}{4p} \quad (1)$$

En esta expresión se utilizó $p = 0,7$ m, y las coordenadas x e y son las que se muestran en la Figura 6. De esta forma, el área total de la superficie reflectora es de $5,5 \text{ m}^2$, correspondiente a 2,5 m de longitud (en el eje z), 2,2 m de ancho (en el eje x) y 0,47 m de altura (en el eje y).

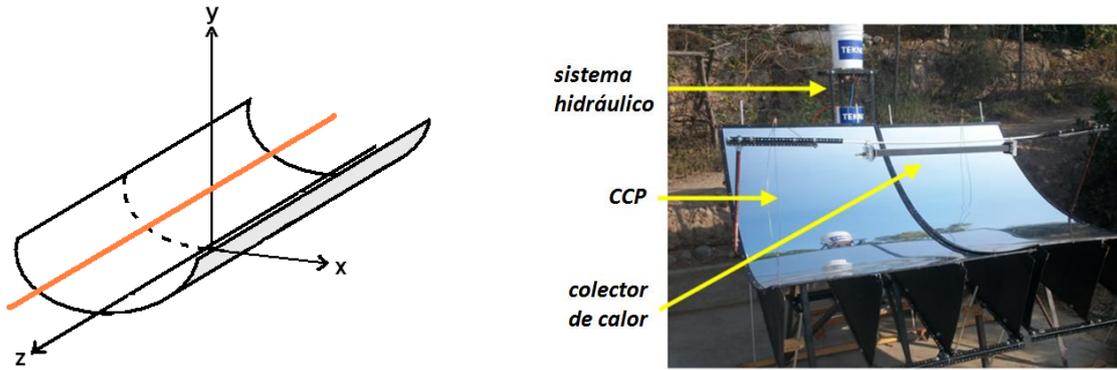


Figura 6 – Izquierda: Esquema que muestra las coordenadas utilizadas en la Ec. (1) del CCP. La línea anaranjada muestra la posición de la línea focal de esta geometría, a una distancia p del vértice (origen de coordenadas). Derecha: Fotografía del CCP instalado en Cocayalta (Provincia de Canta, Lima) en 2011.

El concentrador Fresnel lineal (CFL)

A pesar de que un CFL es más fácil de construir que un CCP, tiene la desventaja de tener menor eficiencia óptica. Por este motivo, el CFL que se diseñó tuvo en cuenta varios aspectos que permitan minimizar las pérdidas por la eficiencia óptica, como:

- (i) El tamaño de los espejos debe ser tal que la radiación solar reflejada no exceda las dimensiones del recipiente colector de calor (efecto de dispersión).
- (ii) La distancia de separación entre cada espejo debe ser la mínima suficiente, para que no se obstruyan entre sí la radiación reflejada. Si la separación es mayor, el área por cubrir con espejos aumentaría y el tamaño del espejo debería disminuir, aumentando su número considerablemente (efecto de traslape).

Teniendo en cuenta estos efectos, así como las dimensiones del recipiente colector de calor y el ángulo de incidencia de la radiación solar (en este caso Lima), se minimiza el número de espejos, lo que implica menos material y costos.

En la Figura 7 se pueden observar los ángulos formados entre AC y DC (reflejado) y, BC y DC (incidente), donde se ha utilizado la siguiente nomenclatura:

- α : ángulo de incidencia solar, se mantiene constante a lo largo del día.
- β : ángulo formado entre la altura y distancia del espejo respecto al colector de calor.
- γ : ángulo de inclinación del espejo respecto a la horizontal.
- $\beta+2\gamma$: ángulo de elevación solar.
- θ : ángulo de reflexión.

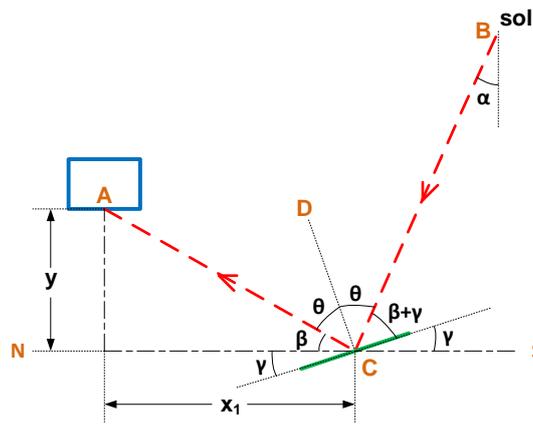


Figura 7– Esquema que representa el trayecto de la radiación solar (línea roja) cuando es reflejada por un espejo plano (línea verde) sobre la base del colector de calor (rectángulo azul).

De esta figura, se cumple la siguiente relación angular:

$$\gamma = \frac{90^\circ - \beta + \alpha}{2} \quad (2)$$

Un valor positivo de γ significa que el espejo ha sido girado en sentido anti horario respecto a la horizontal, y negativo indica giro horario. Además, el ángulo de incidencia solar (α) es constante durante todo el día, y depende del ángulo de inclinación de la Tierra respecto al plano de su órbita (δ), y de latitud de la localidad (φ), y se calcula a partir de $\alpha = \delta + \varphi$. Siendo la latitud de Lima $\varphi \approx -12^\circ$, se tiene que α varía entre $-35,45^\circ$ y $11,45^\circ$ durante un año. En este caso α negativo significa una trayectoria solar inclinada hacia el norte respecto a Lima, y α positivo inclinado hacia el sur (Figura 8).

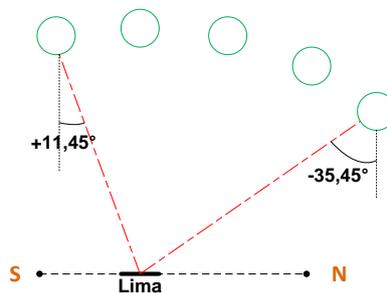


Figura 8 – Representación esquemática de la posición del Sol a lo largo del año desde el punto de vista de un observador en Lima. La inclinación máxima hacia el norte ($-35,45^\circ$) sucede el día 20 de junio y la máxima hacia el sur ($+11,45^\circ$) el 21 de diciembre del año 2012.

Finalmente, el diseño del equipo queda de la forma que se muestra en la Figura 9. Cada espejo tiene 0,07 m de ancho y 2,5 m de largo, además está separado del siguiente espejo 0,08 m. De esta

forma, se tienen 16 espejos hacia el norte, cubriendo una distancia desde 0 m (justo debajo del colector de calor) hasta 0,13 m (alejado del colector de calor). Lo mismo ocurre con los 16 espejos ubicados al sur del recipiente colector de calor. Todos estos espejos cubren un área total de $5,6 \text{ m}^2$. Por último, la altura del recipiente colector de calor es de 2,5 m respecto a los espejos.

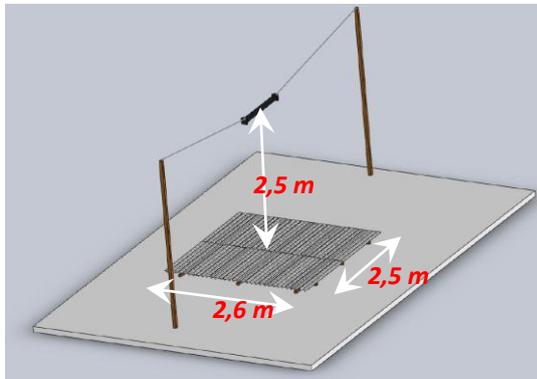


Figura 9 – Izquierda: Esquema y dimensiones del CFL. Derecha: Fotografía del CFL instalado en la Universidad de Lima en 2013.

Ambos equipos, CCP y CFL, utilizaron el mismo colector de calor, que es el recipiente que recibe el calor reflejado por la superficie reflectora y dentro del cual hierve el agua marina. Está hecho de un tubo de aluminio anodizado negro, de sección rectangular con 0,08 m de ancho, 0,04 m de altura y 1 m de longitud, con dos tapas de acrílico de 0,1 m x 0,1 m x 0,025 m de espesor, uno para cada extremo, con entrada de agua en uno y salida de vapor en el otro. Las tapas de acrílico (transparentes) permiten comprobar visualmente el nivel de agua. Adicionalmente, la parte superior está aislada térmicamente con lana mineral de roca (conductividad térmica de $0,035 \text{ W/m.k}$ a 70°C), ver Figura 10. Este recipiente se coloca en la línea focal, a 70 cm del vértice de la parábola, para el caso del CCP (Figura 6), o a 2,5 m de altura respecto a la superficie de los espejos, suspendido por una estructura metálica, para el caso del CFL (Figura 9).



Figura 10 – Fotografía del recipiente colector de calor con una cubierta de aislante térmico en la parte superior y vidrios laterales.

El control del nivel de agua de mar en el recipiente colector de calor está formado por dos recipientes, uno de almacenamiento del agua de mar y el otro mantiene el nivel del agua en 1 cm dentro del colector de calor, con una válvula de boya. Finalmente, el vapor obtenido circula por

tuberías de cobre desde el colector de calor hasta un condensador (intercambiador de calor), donde el vapor se convierte en agua destilada (Figura11).



Figura 11 – Fotografía del condensador (intercambiador de calor). No necesita un sistema de refrigeración.

TRABAJO EXPERIMENTAL

Las pruebas experimentales se realizaron en dos lugares: (i) el CCP se instaló en la localidad de Cocayalta (Provincia de Canta, distrito de Santa Rosa de Quives, a 48 km de Lima en la carretera a Canta, 930 m.s.n.m., latitud $11,56^\circ$ sur, longitud $76,72^\circ$ oeste, valle del río Chillón) durante el invierno de 2011; (ii) el CFL se instaló en la Universidad de Lima (distrito de Surco, 207 m.s.n.m., latitud $12,08^\circ$ sur, longitud $76,97^\circ$ oeste) durante el verano de 2013.

Para las medidas experimentales con ambos equipos se utilizaron los siguientes instrumentos: la temperatura ambiental se midió bajo la sombra con un termómetro de mercurio marca BOECO (graduado desde -20°C hasta $+250^\circ\text{C}$); la temperatura del colector de calor fue medida en su parte inferior con un pirómetro RAYTEK Minitemp; la potencia de irradiación solar se midió con un radiómetro artesanal de fotodiodo (construido y calibrado en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería) y, el volumen de agua, con un recipiente graduado en ml.

Ninguno de los equipos cuenta con un sistema de seguimiento solar, por lo tanto, para su buen funcionamiento, fueron alineados paralelos a la trayectoria solar de Este a Oeste. Esta dirección se halla un día antes del experimento, marcando las sombras a las 9:00 am y a las 3:00 pm (en la Figura 12, s_1 y s_2 , respectivamente) formados por una varilla vertical (punto de referencia "1"). Sobre la proyección de s_1 , se prolonga una línea desde "1" hasta "2" de longitud L_1 . Sobre la proyección de s_2 , se prolonga una línea desde "1" hasta "3" de longitud L_2 , donde se debe cumplir que $L_1 = L_2$. La línea punteada que une los puntos "2" y "3" corresponde a la dirección buscada.

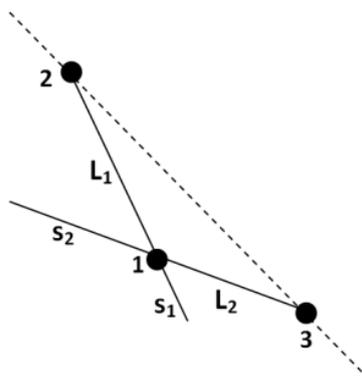


Figura 12 – La línea punteada indica la dirección Este – Oeste de la trayectoria solar.

Ambos equipos se alinean en la dirección Este – Oeste, pero en el caso del CFL, luego de alineado, se deben girar cada uno de sus 32 espejos para que la reflexión de la luz solar incida en la base del colector de calor; en el caso del CCP, solo debe inclinarse este hasta que el colector de calor proyecte su sombra a lo largo del vértice de la parábola cilíndrica.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Experimentos con el colector de calor

Antes de tratar los resultados obtenidos con ambos equipos, es importante mencionar que se realizaron experimentos para determinar si el aislamiento térmico que tiene el colector de calor, mostrado en la Figura 13, influye en la producción de agua desalada. Para este fin se utilizó el mismo recipiente de aluminio anodizado negro de tres formas: el llamado tipo 1, está compuesto solo del tubo rectangular de aluminio y las tapas de acrílico en los extremos (Fig. 13-a); el de tipo 2, además de la configuración anterior, consta de un aislamiento térmico en su parte superior, con un molde de vidrio para fijación, (Fig. 13-b); y el de tipo 3, además del aislamiento térmico de la configuración anterior, tiene paredes de vidrio laterales (Fig. 13-c).



Colector tipo 1



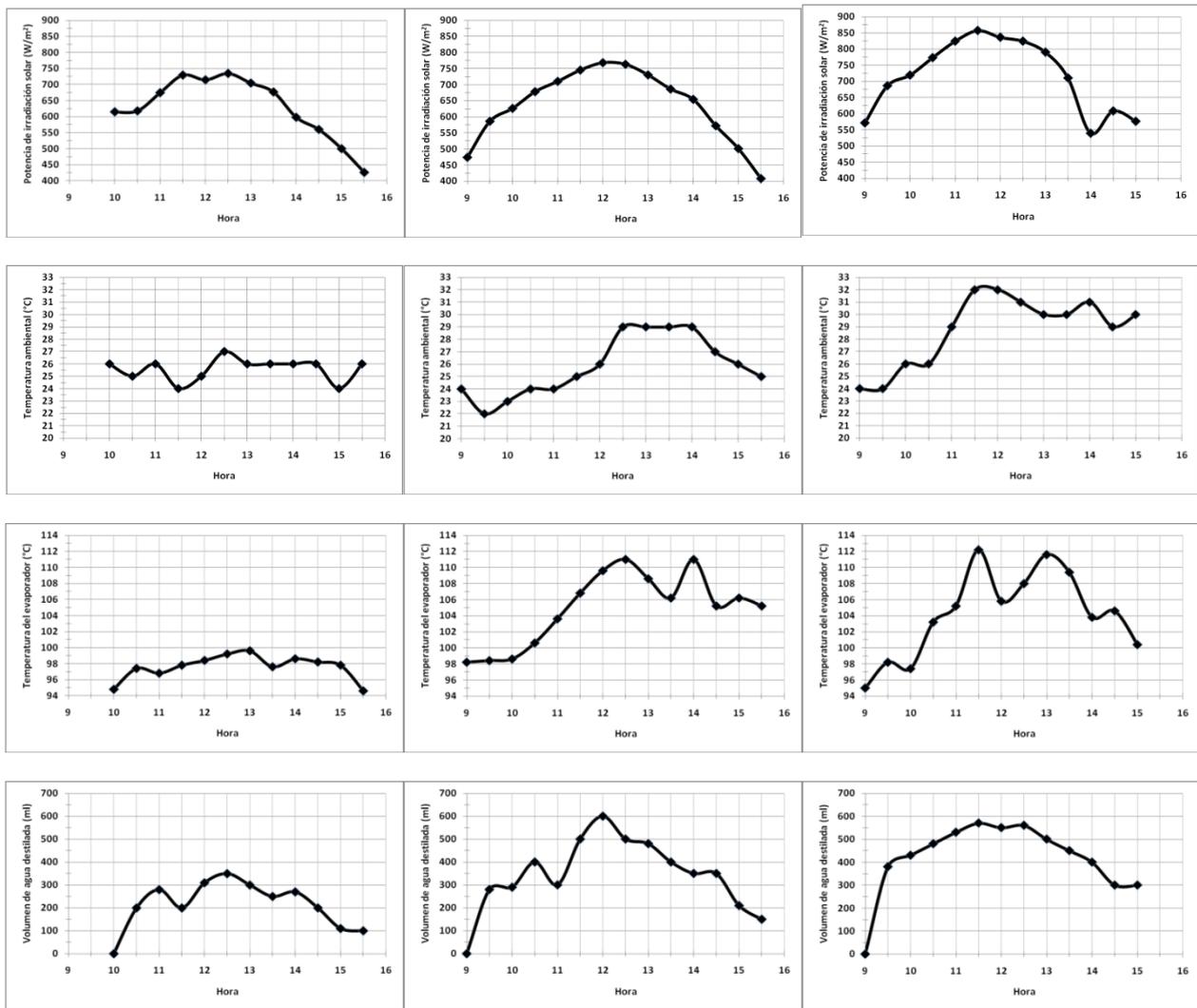
Colector tipo 2



Colector tipo 3

Figura 13 – Fotografías de los tipos de colector de calor utilizados en las pruebas experimentales.

El trabajo experimental consistió en utilizar los tres tipos de colectores para evaluar el desempeño del CCP al producir agua destilada. Las gráficas mostradas en la Figura 14 corresponden a los resultados obtenidos; la columna de la izquierda corresponde a la utilización del colector tipo 1 (realizado el 14 de Agosto de 2011), la columna central a la del tipo 2 (el 4 de Setiembre de 2011) y la de la derecha corresponde a la del tipo 3 (el 22 de Octubre de 2011).



Colector tipo 1

Colector tipo 2

Colector tipo 3

Figura 14 – Gráficas de potencia de radiación solar, temperatura ambiental, temperatura del evaporador y volumen de agua destilada, utilizando el colector tipo 1 (columna de la izquierda), el tipo 2 (columna central) y el tipo 3 (columna de la derecha).

Experimentos con los concentradores solares

A continuación se presentan los resultados (Figura15) obtenidos el 22 de Octubre de 2011 con el concentrador cilíndrico parabólico, en Cocayalta, y el 26 de Enero de 2013 con el concentrador Fresnel lineal, en la Universidad de Lima. En ambos casos se muestran los resultados en las gráficas de temperatura ambiental, potencia de radiación solar, temperatura del colector de calor y volumen de agua destilada producida, todas respecto a la hora del día. Como ya se mencionó, el colector de calor, el sistema de control de nivel de agua y el condensador de vapor utilizados, fueron los mismos en ambos equipos.

Concentrador cilíndrico parabólico (CCP)

Concentrador Fresnel lineal (CFL)

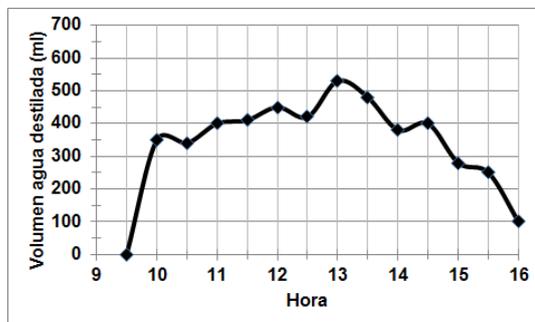
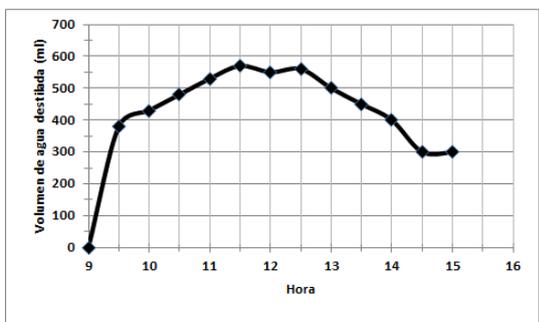
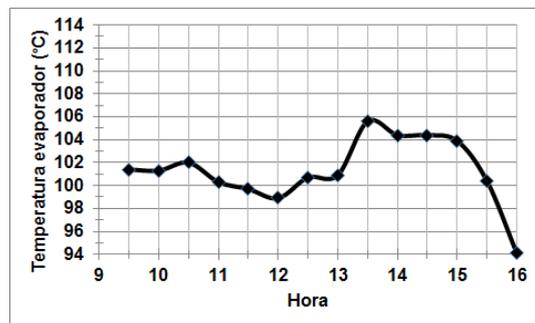
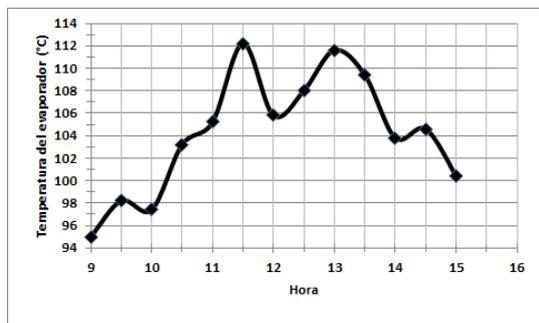
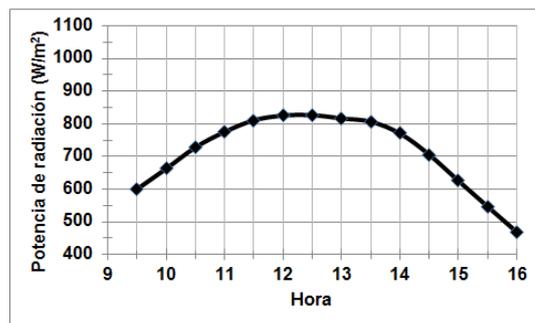
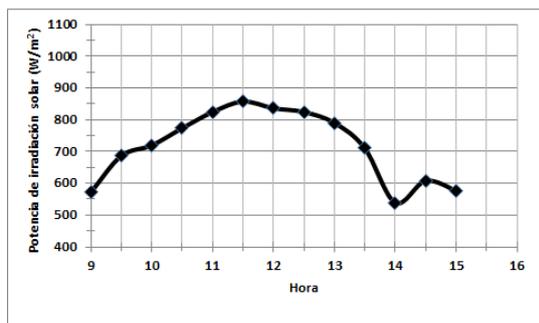
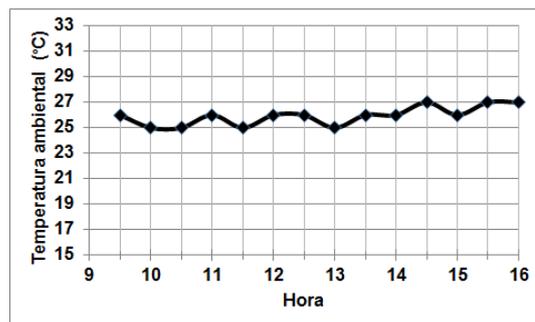
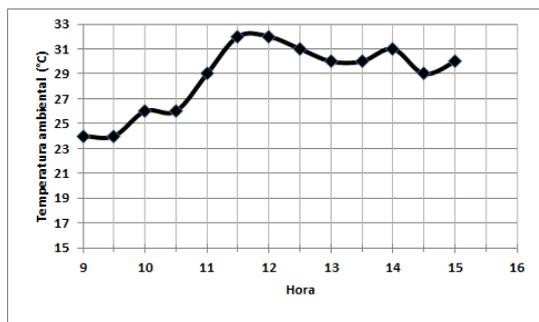


Figura 15 – Gráficas de temperatura ambiental, potencia de radiación solar, temperatura del evaporador y volumen de agua destilada para (i) columna izquierda: CCP (22 de Octubre de 2011 – Cocayalta) y, (ii) columna derecha: CFL (26 de Enero de 2013 –Universidad de Lima).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Colector de calor

Los resultados mostrados en la Figura 14 difieren notablemente respecto a la cantidad de agua destilada producida, a pesar de que las condiciones climáticas fueron más o menos similares respecto a la energía solar incidente, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados experimentales obtenidos con los tres tipos de colector de calor.

Colector	Energía solar (kW-h/m ² /día)	Volumen agua desalada (ml/día)
Tipo 1	3,78	3250
Tipo 2	4,45	5500
Tipo 3	4,66	6360

De esta tabla se puede observar que el incremento de producción de agua es mayor que el incremento de energía solar, lo que indica una mejora a pesar de las condiciones ambientales diferentes. Por ejemplo, comparando tipo 1 y tipo 2, la energía se incrementó en 17,7% mientras que la producción se incrementó en 69,2%. Comparando tipo 1 y tipo 3, la energía se incrementó en 23,3% mientras que la producción se incrementó en 95,7%. Finalmente, comparando tipo 2 y tipo 3, la energía se incrementó en 4,7% y la producción de agua destilada se incrementó en 15,6%. Respecto a esta última comparación, es probable que el incremento de agua sea más notable en zonas donde el viento sea más fuerte, como en la costa norte peruana.

En estos experimentos la única diferencia en el equipo fue la utilización de los tres tipos de colector de calor (Fig. 13), los cuales pierden calor hacia el ambiente de diferente forma. En la Figura 16 se muestra una representación esquemática de la pérdida de calor que sufren los tres tipos de evaporador.

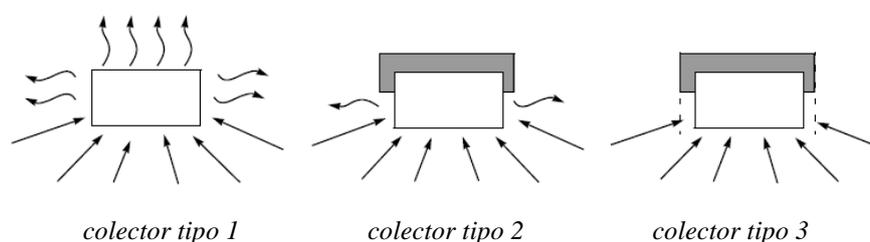


Figura 16 – Esquemas que explican la diferencia en los tres tipos de evaporador, desde el punto de vista de la pérdida de calor hacia el ambiente. Líneas rectas: rayos solares concentrados por el espejo cilíndrico parabólico. Rectángulo: sección transversal del colector de calor. Líneas onduladas: calor cedido al ambiente. Sombreado gris: aislante térmico. Líneas discontinuas (del colector tipo 3): vidrios laterales.

Según los resultados y la explicación mostrada en la Fig. 16, el aislamiento térmico y la protección contra el viento han sido factores decisivos para mejorar la producción en un 96%.

Comparación entre los concentradores solares

Resulta interesante comparar la eficiencia de un CFL y un CCP, ya que ambos concentran la radiación solar de forma lineal, siendo la única diferencia la geometría de la superficie reflectora (Figura 5). Para esto se comparan los resultados experimentales obtenidos al desalinizar agua marina utilizando el CCP de 5,5 m² y el CFL de 5,6 m², que utilizan el mismo colector de calor y condensador. Como es de esperar, los resultados dependen de la cantidad de horas de brillo solar disponible (que depende de la nubosidad), la transparencia del cielo (que en una ciudad es menor por la contaminación ambiental), la intensidad de radiación solar y, solo en el caso del CFL, también depende del ángulo de incidencia solar (que depende de la latitud de la localidad y el ángulo de inclinación del planeta respecto al Sol).

(i) *Energía solar vs. producción de agua destilada*

Para comparar los resultados obtenidos entre ambos equipos se consideró solo el intervalo de tiempo entre las 10 am y las 3 pm. Para este fin, es necesario calcular la energía solar incidente sobre los espejos (E) a partir de la potencia de radiación promedio (P) y el intervalo de tiempo (t), a través de la siguiente expresión:

$$E = P \times t \quad (3)$$

Los valores de P y t se encuentran mostrados en las gráficas de la Figura 15, cuyos valores correspondientes se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2. Energía solar (E) y volumen de agua destilada producida (V_{ex}), medidos entre las 10am y 3pm (5 horas).

Concentrador	Fecha	E (MJ/m²)	t (s)	V_{ex} (ml)
<i>CCP</i>	22/10/11	13,18	18000	5070
<i>CFL</i>	26/01/13	13,68	18000	4440

(ii) **Eficiencia total promedio**

En esta parte se analiza la eficiencia total (η) de cada equipo, en función del volumen de agua destilada obtenida experimentalmente (V_{ex}) y el volumen teórico (V_{te}), definiéndola de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{V_{ex}}{V_{te}} \times 100\% \quad (4)$$

Para realizar los cálculos se debe tener en cuenta dos aspectos: primero, para cubrir toda la base inferior del colector de calor solo es necesario utilizar un área de superficie reflectora de $A_{CCP} = 2,2 \times 1 = 2,2 \text{ m}^2$ en el caso del CCP, y $A_{CFL} = 32 \times 0,07 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 2,24 \text{ m}^2$ para el caso del CFL (Figura 17); segundo, el valor teórico de la cantidad de energía necesaria para que 1 litro de agua a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ se evapore totalmente por ebullición, es de 2,62 MJ.

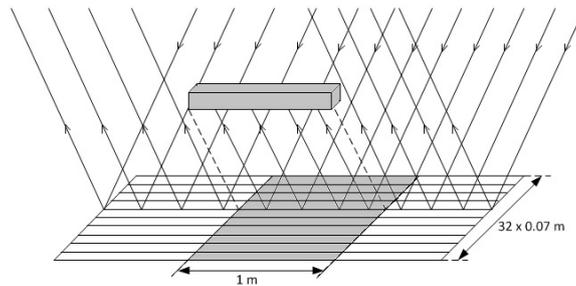


Figura 17 – Esquema que explica el cálculo de $A = A_{CFL} = 2,24 \text{ m}^2$ en el concentrador Fresnel lineal (CFL).

Asimismo, el volumen de agua teórico (V_{te}) se calcula de la siguiente expresión:

$$V_{te} = \frac{E_{total} (MJ)}{2,62} \quad \text{litros} \quad (5)$$

A su vez, la energía solar total recibida en el colector de calor (E_{total}) se calcula de:

$$E_{total} = E \times A \quad (6)$$

Por lo tanto, combinando las ecuaciones (4), (5) y (6), y teniendo en cuenta que el área $A = A_{CCP}$ en el caso del CCP y $A = A_{CFL}$ para el caso del CFL y, además, los valores de E y V_{ex} (se

encuentran en la Tabla 1), se obtienen las siguientes expresiones para calcular la eficiencia de cada equipo:

$$\eta_{CCP} = 119,1 \frac{V_{ex}}{E} \quad \eta_{CFL} = 117 \frac{V_{ex}}{E} \quad (7)$$

A partir de esta expresión se presentan las eficiencias obtenidas con los dos concentradores:

Tabla 3. Eficiencia total promedio del destilador CCP y el CFL.

Destilador	Fecha	η (%)
CCP	01/09/12	45,82
CFL	26/01/13	37,97

(iii) Costo de materiales

Los destiladores CCP y CFL, se han construido con la lista de materiales y costos mostrados en las siguientes tablas:

Tabla 4. Materiales y costos de un CCP y un CFL.

CCP		CFL	
Materiales	Costos(S/.)	Materiales	Costos (S/.)
Aluminio de alta reflectancia	240,00	Espejos de vidrio	320,00
Soporte de madera con curvatura	220,00	Estructura de madera y fijaciones metálicas	300,00
Estructura metálica de soporte	560,00	Estructura metálica	200,00
Accesorios	300,00	Accesorios	200,00
Total	1320,00	Total	1020,00

Tabla 5. Materiales y costos del colector de calor y el condensador.

Materiales	Costos(S/.)
Aluminio anodizado negro	20,00
Soportes de aluminio y madera	30,00
Acrílico y vidrio transparentes	170,00
Aislante térmico (lana mineral de roca)	30,00
Tubería de cobre y mangueras de silicona	190,00
Accesorios	70,00
Total	510,00

A partir de esta información se obtiene que el costo de un desalinizador “CFL + colector de calor + condensador” de 5,6 m² cuesta alrededor de S/. 1530,00; mientras que el costo de un desalinizador “CCP + colector de calor + condensador” de 5,5 m² cuesta alrededor de S/. 1830,00. Esta cantidad representa un 19,6% más que el primero.

El costo de operación del equipo, sea el CFL o el CCP es el mismo, ya que ambos necesitan diariamente de una limpieza de las superficies reflectantes (con agua o limpiador de vidrios) antes de la operación, y una limpieza del colector de calor para retirar la salmuera al final de la operación. Ninguno necesita electricidad para su funcionamiento.

Calidad del agua obtenida

Otro resultado obtenido es respecto a la calidad del agua. Se realizó el análisis fisicoquímico en el Laboratorio de Docimasia de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Lima, confirmando que cumple con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM) Categoría 1 – Poblacional y Recreacional, que es la más exigente de las categorías, lo que indica que no hay necesidad de una segunda etapa de destilación y es apta para su potabilización, para consumo humano o cualquier otro fin como industrial, agrícola o ganadero. Los resultados se presentan en detalle en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultado del análisis de aguas obtenido en el Laboratorio de Docimasia (Universidad de Lima) y el correspondiente según el Estándar Nacional de Calidad Ambiental para Agua (Categoría 1: Poblacional y Recreacional)

Parámetro	Agua de mar	Agua desalada	Norma peruana	Unidades
Cloruro	16129	17	250	mg/L Cl ⁻
Conductividad	54000	22	1500	μS/cm
Dureza carbonatada	6360	3	500	mg/L CaCO ₃
Oxígeno disuelto (DO)	4,6	5,00	>= 6	mg/L O ₂
pH	7,99	6,30	6,5 – 8,5	pH
Salinidad	3,4	0,00	---	%
Sólidos totales disueltos	26800	12	1000	mg/L TDS
Turbidez	16,4	0,20	5	NTU
Dem. Bioq. de oxíg. (DBO)	9,9	2,40	3	mg/L O ₂

CONCLUSIONES

El desarrollo de esta tecnología permite demostrar que la energía solar puede ser utilizada para la desalación del agua de mar.

Respecto al colector de calor, donde sucede la evaporación del agua de mar, su adecuado aislamiento térmico es un factor muy importante para incrementar la eficiencia y productividad de cualquier equipo destilador que utilice concentradores solares. En el caso del colector utilizado en este trabajo, la diferencia entre utilizar aislante o no, influye en un 96% sobre la eficiencia de un destilador con concentrador cilíndrico parabólico.

Al comparar la eficiencia de los dos concentradores solares utilizados, un concentrador de tipo cilíndrico parabólico (CCP) y otro de tipo Fresnel lineal (CFL), ambos aplicados para concentrar la radiación solar en un destilador de agua marina, se obtiene que el primero presente una eficiencia global de 46% y el segundo 38%. De esta forma, el CCP es 21% más eficiente que el CFL. Por otro lado, al comparar los costos de los materiales para su construcción, el CCP resulta 19,6% más caro que el CFL.

La calidad del agua desalada obtenida con estos concentradores solares demuestra que prácticamente no contiene sales disueltas y, luego de un tratamiento químico (llamado “mineralización”), estaría apta para el consumo humano.

RECOMENDACIONES

Un aspecto importante en la desalación de agua es encontrar los materiales más adecuados para la construcción del equipo. Respecto al sistema hidráulico y a la superficie reflectora, no hay mucho problema; sin embargo, el colector de calor es la parte que está más expuesta al desgaste, ya que está hecho de aluminio, en cuyo interior contiene salmuera (agua con más concentración salina que la del mar) y vapor de agua, y en el exterior alcanza altas temperaturas, combinación perfecta para que el material tenga que ser reemplazado constantemente.

A pesar de las condiciones agresivas a las que el colector de calor está expuesto, se ha comprobado que si la salmuera residual se retira, aún tibia, al final de la operación del equipo, no se producen incrustaciones en el aluminio, este no se pica y, en consecuencia, el material casi no es atacado por la salinidad y el calor. Bajo esta condición, el colector de calor puede durar varios meses sin necesidad de reemplazarlo; pero si no se sigue esta recomendación, deberá ser reemplazado en pocas semanas.

Respecto a la superficie reflectora, se ha verificado que se puede utilizar, en vez de espejos, planchas de aluminio de alta reflectancia, que son baratas y fácilmente moldeables a la curvatura parabólica. Sin embargo, este material requiere de muchos cuidados, desde su transporte y limpieza y, aun tomando todos los cuidados posibles, deben ser reemplazados luego de algunos meses, mientras que los espejos, luego de algunos años.

INVESTIGACIÓN EN DESARROLLO

El desarrollo de un equipo más eficiente para la desalación de agua de mar necesariamente tendrá que combinar las técnicas conocidas: por evaporación (que se logra con los equipos mostrados en la Figura 3) y por ebullición (mostrados en la Figura 5). Para este fin se ha construido un “destilador de bandeja escalonada” cuyo esquema se muestra en la Figura 3.d, donde cada escalón ha sido construido con canaletas de PVC de 7,5 cm (3”) de diámetro y 1,25 m de longitud, las cuales fueron lijadas y pintadas de negro para mejorar la absorción de la radiación solar. Para sellar los extremos y evitar pérdidas de agua de mar, se utilizaron tapones de PVC correspondientes al diámetro de la canaleta, de forma que encajan perfectamente. El área total cubierta es de 1,25 m x 0,8 m = 1 m² de superficie (Figura 18). Cada canaleta se fija a las paredes laterales del desalinizador. Estas paredes aislantes son de madera OSB de 18 mm de grosor, material que tiene baja conductividad térmica (0,13 W/m.K), la cual fue protegida de la humedad y la salinidad con una capa de barniz marino para madera. Además, todas las paredes interiores del desalinizador estarán recubiertas con planchas de poliestireno expandido (tecnopor) de 1” de grosor para mejorar aún más el aislamiento térmico. La cubierta superior es vidrio de 4mm de grosor, que descansa apoyado sobre jebe esponjoso para asegurar la hermeticidad del colector.

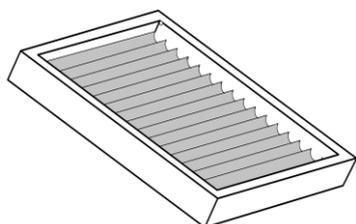


Figura 18: Izquierda: Esquema del destilador de bandeja escalonada. Derecha: Fotografía del equipo construido en la Universidad de Lima.

Según la literatura, este tipo de destilador es el que produce mayor agua destilada, cuya cantidad será medida experimentalmente. Sin embargo, la parte principal de la investigación radica en unir este destilador (DBE) con un concentrador cilíndrico parabólico (CCP), de forma que se obtenga un equipo híbrido CCP – DBE, que se muestra esquemáticamente en la siguiente Figura 19.

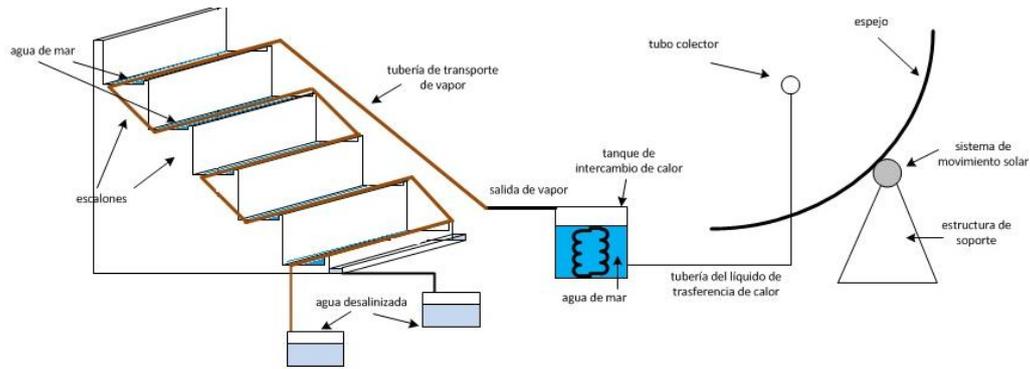


Figura 19: Esquema del equipo híbrido CCP – DBE.

Como se puede observar, el calor que necesita ceder el CCP para condensar el vapor producido, lo aprovecha el DBE para acelerar el proceso de evaporación en sus escalones, obteniéndose como resultado doble producción de agua desalada: por la condensación del vapor producido por el CCP y el agua obtenida del DBE. El objetivo final de este trabajo es demostrar que si el CCP produce X litros de agua desalada y el DBE produce Y litros, juntos deben producir una cantidad mayor que $(X+Y)$. Esta parte final de la investigación se deberá estar concluyendo en el verano de 2014.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo logístico y económico recibido del Instituto de Investigación Científica (IDIC) de la Universidad de Lima, así como de los docentes y técnicos de los laboratorios de Máquinas e Instrumentos, de Manufactura Integrada por Computadora (C.I.M.), de Docimasia, y de Operaciones Unitarias, todos de la Escuela Universitaria de Ingeniería, para concretar este trabajo de investigación y desarrollo tecnológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, R. *et al.*

2012 «Solar radiation concentration features in Linear Fresnel Reflector arrays». En: *Energy Conversion and Management*, Vol. 54, pp. 133–44.

ABDALLAH, S.; M. ABU-KHADER y O. BRADAN, O.

2009 «Performance evaluation of solar distillation using vacuum tube coupled with photovoltaic system». En: *Applied Solar Energy*, Vol. 45, N° 3, pp. 176–80.

BRADAN, O. y H. AL-TAHAINEH.

2005 «The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity». En: *Desalination*, N° 183, pp. 137–42.

CIPOLLINA, A.; C. SOMMARIVA y G. MICALE.

2005 «Efficiency increase in thermal desalination plants by matching thermal and solar distillation: theoretical analysis». En: *Desalination*, N° 183, pp. 127–36.

CITPERÚ (Coordinadora por la Inversión y el Trabajo) Programa “Agua para Vivir”

s.f. Fecha de consulta: 30/08/2013 <<http://www.citperu.org/>>

INEI – MINISTERIO DE ECONOMÍA Y FINANZAS

s.f. «Perú: Indicadores de Resultados de los Programas Estratégicos, 2010». Fecha de consulta: 30/08/2013 <http://desa.inei.gob.pe/endes/Investigaciones/Libro_Endes.pdf>

FERNÁNDEZ-GARCÍA, A. *et al.*

2010 «Parabolic-trough solar collectors and their applications». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, N° 14, pp. 1695–721.

GRAU, Marisol

2011 «Lima: Una ciudad que se deshidrata». En: *El Comercio*. 20 de marzo. A10.

MAHMOUD, I. y K. MAHKAMOV.

2010 «Determination of rational design parameters of a multi-stage solar water desalination still using transient mathematical modelling». En: *Renewable Energy*, N° 35, pp. 52–61.

MATHUR, S.S.; T.C. KANDPAL y B.S. NEGI.

1991 «Optical design and concentration characteristics of linear Fresnel reflector solar concentrators—I. Mirror elements of varying width». En: *Energy Conversion and Management*, Vol. 31, N° 3, pp. 205–19.

MINASIAN, A.; A. AL-KARAGHOULI y S. HABEEB.

1997 «Utilization of a cylindrical parabolic reflector for desalination of saline water». En: *Energy Conversion Management*, Vol. 38, N° 7, pp. 701–4.

MORIN, G. *et al.*

2012 «Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants».En: *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 1–12.

MUSLIH, I. *et al.*

2010 «Cost comparative study for new water distillation techniques by solar energy using». En: *Applied Solar Energy*, Vol. 46, N° 1, pp. 8–12.

SENAMHI

2003 *Atlas de Energía Solar del Perú*. Lima: Proyecto PER/98/G31: Electrificación rural a base de energía fotovoltaica en el Perú.

SERVINDI (Servicios en Comunicación Intercultural)

s.f. Fecha de consulta: 30/08/2013 <<http://servindi.org/>>

TONDA, Juan

1993 *El Oro Solar y Otras Fuentes de Energía*.1ª ed. México D.F.: Fondo de Cultura Económica. pp. 64-5.

VELÁSQUEZ, N. *et al.*

2010 «Numerical simulation of a Linear Fresnel Reflector Concentrator used as direct generator in a Solar-GAX cycle». En: *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp. 434–45.