ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 19, pp.03.45-03.54, 2015. Impreso en la Argentina
ISSN 2314-1433 - Trabajo selecionado de Actas ASADES2015

CONCENTRADOR CILINDRICO PARABÓLICO APLICADO A LA GENERACIÓN DE VAPOR DE USO INDUSTRIAL. EVALUACIÓN ÓPTICA Y TÉRMICA DE UN PROTOTIPO.

J. Daghero, J. Garnica, A. Buitrago, D. Dubini, C. Lorenzo, C. Manero, M. Marticorena, M. Martinez, U. Sayago
Grupo de Energía Solar. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto.
Ruta 36. Km 601. X5804BYA – Río Cuarto. Prov. de Córdoba
Tel. 0358-4676249 – Fax 0358-4676246 e-mail: jdaghero@ing.unrc.edu.ar

Recibido 08/09/15, aceptado 13/10/15

RESUMEN: En este trabajo se presenta el diseño, desarrollo y estudio de funcionamiento de un prototipo de concentrador cilíndrico parabólico (CCP) destinado a la generación de vapor de agua de baja entalpía para uso industrial. El área de apertura del prototipo es de 2,5 m^2. Se realiza una evaluación óptica de su funcionamiento consistente en un mapeo de la superficie reflectante utilizando punteros laser. Por medio de un software de simulación específico, se determina el tiempo de ajuste necesario para que el plano de la parábola se mantenga orientado de manera de optimizar el aprovechamiento energético. Este tiempo de ajuste podrá ser utilizado en el sistema de control discontinuo de seguimiento solar. Por último se realiza un ensayo de baja temperatura de acuerdo a la norma ASHRAE 93-1986 (RA 91) con el que se obtiene un rendimiento óptico del 70 %.

Palabras clave: Energía solar, concentrador cilíndrico parabólico, rendimiento térmico, producción de vapor.

INTRODUCCIÓN

Si se compara a nivel mundial el consumo energético de la industria, el transporte, los hogares y el sector de servicios puede observarse que el sector industrial tiene el mayor consumo de energía siendo aproximadamente del 30 %. Sólo un tercio de esta demanda está relacionada con la energía eléctrica, mientras que los dos tercios restantes están asociados a la energía térmica. La mayor parte de esta energía demandada por las empresas comerciales e industriales para sus procesos de producción, requieren niveles de temperatura que están por debajo de 250 °C. (Weiss et al., 2008).

El uso de energía solar en los procesos industriales permite una fabricación "limpia", y juega un rol importante en la tendencia hacia una sociedad más sustentable. En 2007, en todo el mundo se habían instalado 90 plantas de energía solar térmica para estas aplicaciones con una capacidad total de 25 MW, equivalente a 35000 m^2 (Fernandez-García et al, 2015).

Los concentradores cilíndrico parabólicos (CCP) se consideran los más apropiados para estas aplicaciones, son concentradores de foco lineal y consisten en una superficie cilindro parabólica que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor colocado en la línea focal de la parábola. Esta radiación concentrada sobre el tubo receptor hace que el fluido que circula por su interior se caliente, transformando la radiación solar en energía térmica, bajo la forma de calor sensible o latente del fluido (Thomas, 1996). Los CCP de pequeña escala se visualizan como una tecnología solar apropiada para cubrir la demanda de temperatura en el rango de 120 a 250 °C. Los requisitos de temperatura para estas aplicaciones no pueden ser alcanzados eficientemente por los colectores convencionales de baja temperatura (colectores de placa plana, de tubos de vacío, etc). Por otro lado el uso de sistemas de concentración con altas factores de concentración y de altas temperaturas sería innecesariamente costoso. Estas aplicaciones tienen fuertes limitaciones de espacio comparadas con

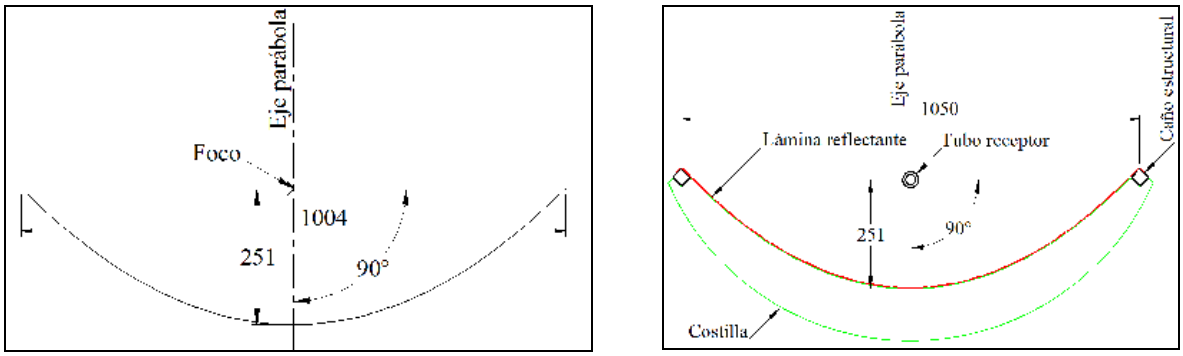
las plantas solares para la producción de energía eléctrica. Las fábricas están generalmente ubicadas en zonas industriales donde el precio del suelo es caro, por lo que la instalación del campo solar debe realizarse en espacios reducidos, tales como los techos. Por lo tanto, estos equipos deben ser modulares, pequeños (ancho de apertura inferior a 3 m), livianos y de bajo costo (Fernandez García et al 2010)

El creciente interés por esta tecnología ha hecho que instituciones públicas y compañías privadas desarrollaran prototipos. La característica común de los mismos es el uso de tubos receptores aislados con tubos de vidrio no evacuado y, en algunos casos, el uso de una cobertura de vidrio para prevenir ensuciamiento y asegurar la estabilidad estructural. (Weiss and Rommel, 2005, 2008).

El objetivo de este trabajo es el diseño y desarrollo de un prototipo de CCP con el fin de generar vapor de agua para ser utilizado en procesos industriales. A partir de los cálculos preliminares presentados en un trabajo anterior (Daghero et al, 2013) se propone la construcción del prototipo, la evaluación de su funcionamiento óptico y la realización de ensayos normalizados para determinar su rendimiento térmico. Se propone además analizar, por medio de un software de simulación específico, el tiempo de ajuste necesario para que el plano de la parábola se mantenga orientado de manera de optimizar el aprovechamiento energético. Se comienza mostrando el desarrollo y construcción del prototipo con todos los procesos hasta su terminación. Se realiza un análisis óptico consistente en un mapeo de la superficie reflectante utilizando punteros laser. Se muestran los resultados de la simulación de incidencia de los rayos sobre el tubo receptor para diferentes ángulos. Con estos resultados se propone un rango de tiempo de ajuste que podrá ser utilizado en el sistema de control de seguimiento solar. Por último se realiza un ensayo de baja temperatura para determinar el rendimiento térmico de acuerdo a la norma ASHRAE 93-1986 (RA 91).

DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Tomando como referencia los cálculos realizados en un trabajo anterior se trabajó en la construcción de un prototipo consistente en un módulo de 2,5 m^2 de superficie efectiva de captación. Si bien las dimensiones fueron escogidas en función de las medidas comerciales de la lámina reflectante (las medidas estandarizadas son de 1220 mm x 2440 mm), el proveedor local suministró láminas de 1250 mm x 1500 mm. Fueron necesarias dos láminas con estas dimensiones las cuales fueron solapadas para obtener las dimensiones del diseño. De esta manera dicha superficie resultó con un ancho de 1050 mm, un largo de 2390 mm y una distancia focal de 251 mm, tal como se muestra en la Figura 1.



(a) **(b)**

Figura 1: Sección transversal de la superficie reflectante (dimensiones en mm) (a) Diseño Teórico (b) Perfil del concentrador construido

La distancia focal quedó establecida por el ancho de la lámina de acuerdo a la Ecuación 1 (Daghero et al, 2013)

$$f = \frac{1}{2(\sqrt{2} + Ln(1+\sqrt{2})} L \cong 0{,}218.L \tag{1}$$

Donde:
L = Ancho de la lámina reflectante
f = Distancia del foco al vértice de la parábola

Para obtener esta expresión fue necesario establecer el ángulo de borde $\phi = 90^\circ$, el cual se mide desde el borde del colector hasta la línea que forma el eje de la parábola tal como se muestra en la Figura 1. Se ha demostrado que con este ángulo, se minimiza la distancia media entre el foco y la lámina reflectante y por consiguiente la desviación de la radiación directa de tal forma que los errores de inclinación y seguimiento son menos pronunciados (Vidriales Escobar, 2007). Esta afirmación también ha sido corroborada con ensayos experimentales para la determinación de la curva de rendimiento (Jaramillo et al, 2013).

Otro parámetro importante en el CCP es la relación de concentración definida como el cociente entre el área de apertura A_a y el área del tubo receptor A_r de acuerdo a la Ecuación 2:

$$C = \frac{L}{\pi d} \tag{2}$$

Donde:
L = Ancho de la lámina reflectante
d = Diámetro del tubo receptor.

La Tabla 1 muestra las características principales del CCP considerando las dimensiones de la superficie reflectante antes mencionadas y un tubo receptor de 38.5 mm.

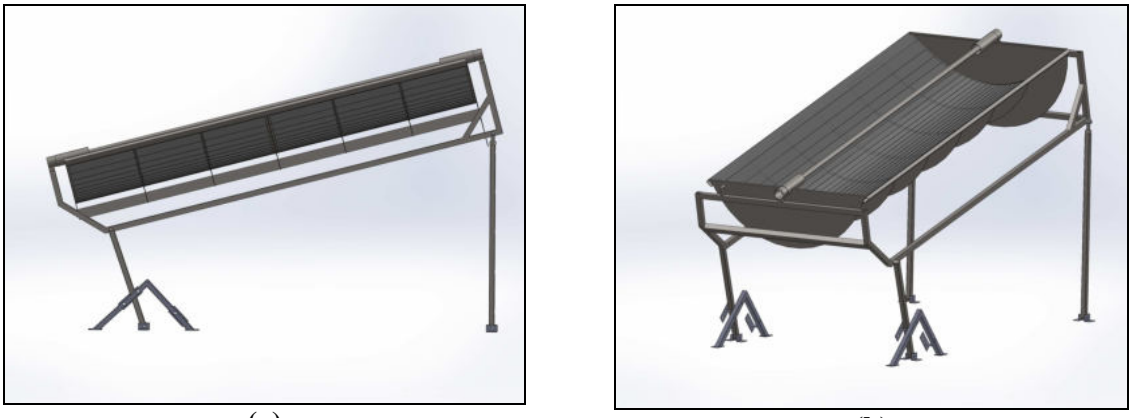
Ancho del concentrador (m)	1.050
Largo del concentrador (m)	2.390
Área de apertura (m^2)	2.500
Angulo de borde	90°
Distancia focal (m)	0.251
Diámetro de tubo receptor (mm)	38.5
Relación de concentración	8.41

Tabla 1: Características principales del CCP

El eje de rotación del concentrador (línea focal), es perpendicular al plano de la eclíptica, de modo que la superficie de captación está orientada hacia el norte y gira en el sentido de este a oeste. La inclinación del eje con respecto al plano horizontal es regulable según el día del año. El concentrador consta de una estructura móvil sobre la que apoya la lámina reflectante y otra estructura soporte fijada a la plataforma de ensayo. El sistema de fijación del tubo receptor permite la rotación de la estructura móvil alrededor de la línea focal que coincide con el eje del tubo receptor. La estructura fijada a la plataforma puede adaptarse a dos posiciones regulables con una varilla roscada para lograr el ángulo de inclinación adecuado tanto para el período estival (entre 12 y 32°) como para el período invernal (entre 32 y 51°). En las Figura 2 y 3 se muestran las diferentes vistas del prototipo obtenido utilizando un programa de diseño asistido por computadora. Estas estructuras fueron desarrolladas teniendo en cuenta los materiales disponibles en el mercado local.

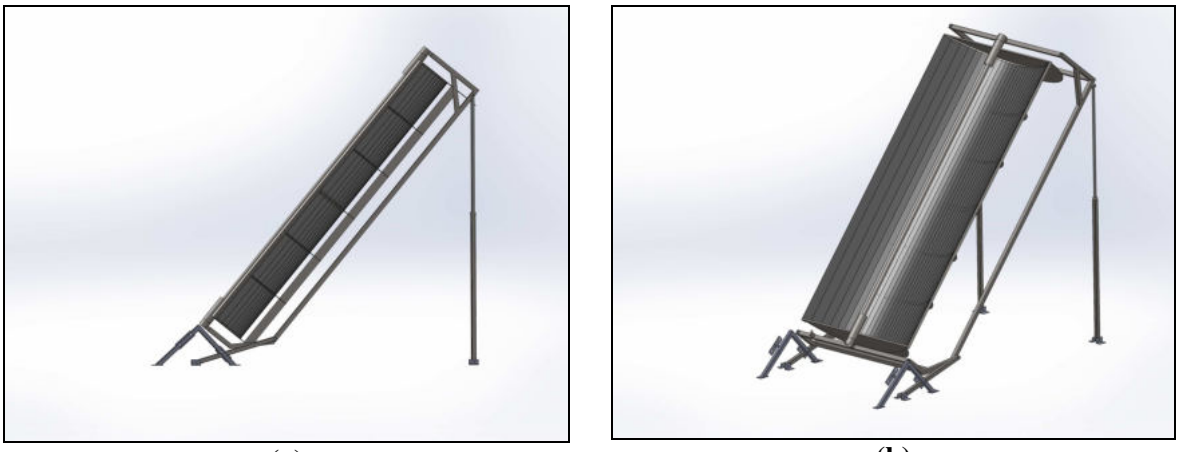
La estructura móvil consta de 6 costillas y 2 extremos semicirculares, todos de chapa de acero al carbono calibre 18 (espesor: 1.27 mm). La función de estas costillas es soportar y dar forma a la lámina reflectante. Dichas costillas fueron cortadas utilizando una máquina de control numérico computarizado. Las mismas se soldaron a la estructura soporte hecha con caños estructurales de 30

mm x 30 mm como se observa en la Figura 4 (a). Se utilizó una lámina reflectante de aluminio anodizado 4400 GP de la firma alemana Alanod Gmbh a través de su representante local (Alanod, 2015). Esta lámina, posee una reflectividad superior al 95 %. En la Figura 4 (b) se muestra el momento de la remoción de la cobertura protectora.



(a) **(b)**

Figura 2: CCP ubicado en posición estival correspondiente a Diciembre (12°). (a) Vista lateral. (b) Vista en perspectiva



(a) **(b)**

Figura 3: CCP ubicado en posición invernal correspondiente a Julio (51°).(a) Vista lateral. (b) Vista en perspectiva

(a) **(b)**

Figura 4. Construcción del CCP. (a) Soldado de la estructura móvil sobre la que apoya la lámina reflectante. (b)Remoción de la capa protectora de la lámina reflectante.

El tubo receptor de acero al carbono con un diámetro exterior de 38,5 mm contiene en su interior otro tubo concéntrico de 25 mm. De esta manera se obtienen secciones de flujo similares en el ánulo y en el

tubo interior. El diseño del CCP exige que la entrada y salida del fluido caloportador estén ubicadas en la parte inferior. El fluido puede ingresar por el ánulo y retornar por el tubo interior o viceversa tal como se observa en la parte inferior de la Figura 5. Se utilizaron tubos flexibles con doble malla de acero para conectar el tubo receptor al circuito térmico con el fin de permitir libertad de movimiento cuando se modifica la posición del CCP para ajustar su orientación. Se utilizó pintura negra de alta temperatura con el fin de lograr durabilidad y obtener un apropiado valor de absorbancia. En la Figura 5 se muestra el CCP en su posición invernal.

Figura 5: CCP instalado sobre la plataforma en posición invernal (junio)

ANÁLISIS ÓPTICO DEL CONCENTRADOR

Con el fin de determinar la precisión con que fue construido el concentrador, antes de que el mismo fuera instalado sobre la plataforma de ensayo, se realizó un estudio de funcionamiento óptico simulando la incidencia de los rayos del sol con rayos laser. Para ello se desarrolló y construyó un sistema que permitió colocar 12 punteros laser cuyos rayos inciden en forma normal a la superficie de captación. Este sistema puede desplazarse a lo largo del concentrador. En la Figura 6 se muestra dicho sistema donde puede observarse la incidencia de los rayos laser sobre el tubo receptor.

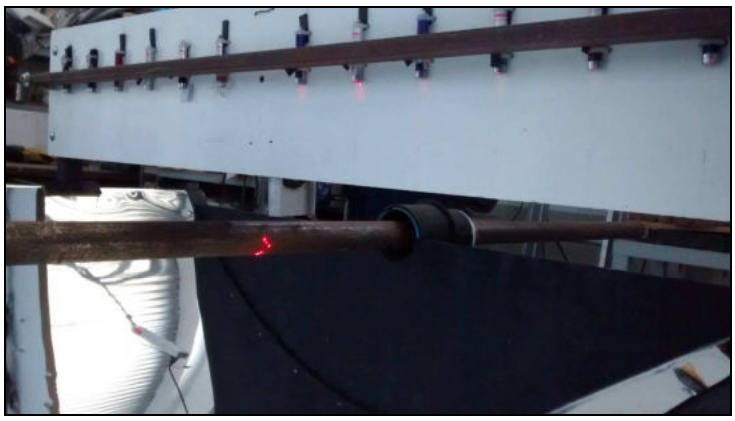


Figura 6: Incidencia de rayos laser sobre el tubo receptor.

Para lograr un mapeo más preciso de la superficie reflectante se realizaron observaciones con una separación de 20 mm en los sentidos longitudinal y transversal utilizando dos tubos receptores de 38,5 mm y de 22,0 mm de diámetro respectivamente. Cabe acotar que debido al espacio ocupado por el sistema de montaje no pudieron evaluarse uno de los bordes iniciales (120 mm) y los bordes laterales (50 mm de cada lado), sin embargo esta superficie no evaluada representó solamente el 0.84 % del total de la superficie reflectante. Los resultados que muestran la Tabla 2 indican una muy buena incidencia en el tubo de 38,5mm mientras que ocurre una disminución para el tubo de 22,0 mm. Las observaciones indican que esta disminución se produce en los bordes y también en la zona de las costillas donde la lámina reflectante ha sido remachada.

Diámetro del tubo receptor (mm)	Porcentaje de Incidencia
38,5	98,8 %
22,0	90,8 %

Tabla 2: Ensayo de funcionamiento óptico del CCP

SIMULACION DEL SEGUIMIENTO SOLAR

Hasta el momento hemos supuesto que los rayos solares inciden normalmente a la superficie de captación. Esto solo es posible si dicha superficie está orientada por medio de un sistema de seguimiento solar. Dado que generalmente un sistema de control discreto es más simple, económico y de fácil puesta a punto, es necesario establecer el margen de tiempo en el que la superficie reflectante puede permanecer sin movimiento antes de que comience a declinar el porcentaje de incidencia de los rayos sobre el tubo receptor. Por este motivo, se realizó una simulación empleando el software libre SolTrace, (National Renewable Energy Laboratory, 2015). El mismo emplea un método numérico estadístico que consiste en generar aleatoriamente una serie de rayos solares individuales y seguir las trayectorias de los mismos a medida que interactúan con los elementos ópticos del conjunto.

En la Figura 7 se muestra la imagen de la simulación realizada cuando los rayos inciden de manera normal a la superficie de captación para un tubo receptor de 38,5 mm. Por otra parte, en la Figura 8, se muestra la distribución del flujo de radiación incidente sobre una sección arbitraria del tubo receptor. Este gráfico utiliza un patrón de colores de acuerdo a la intensidad del flujo.

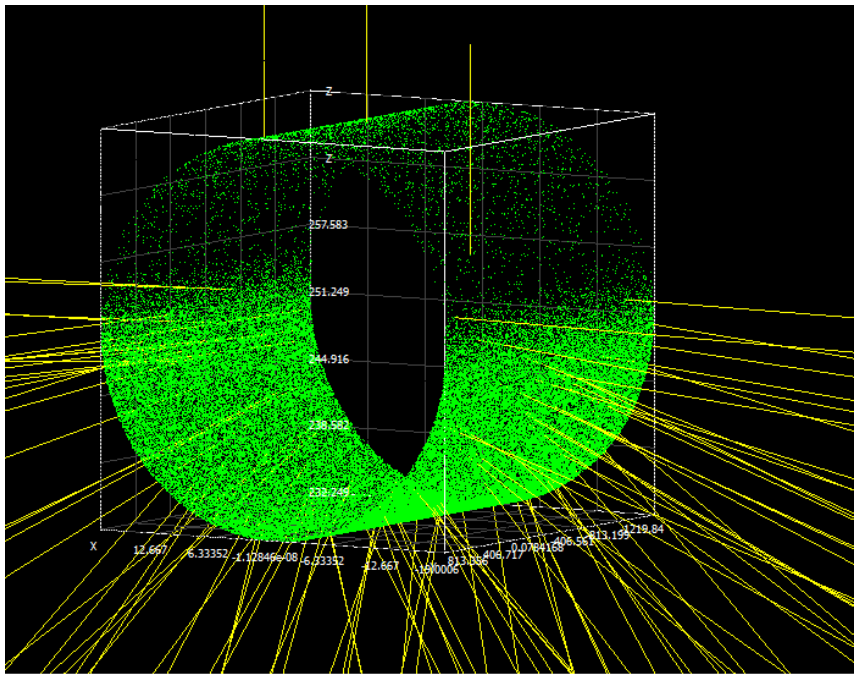


Figura 7: Simulación de rayos incidentes sobre el tubo receptor utilizando rayos normales a la superficie de captación.

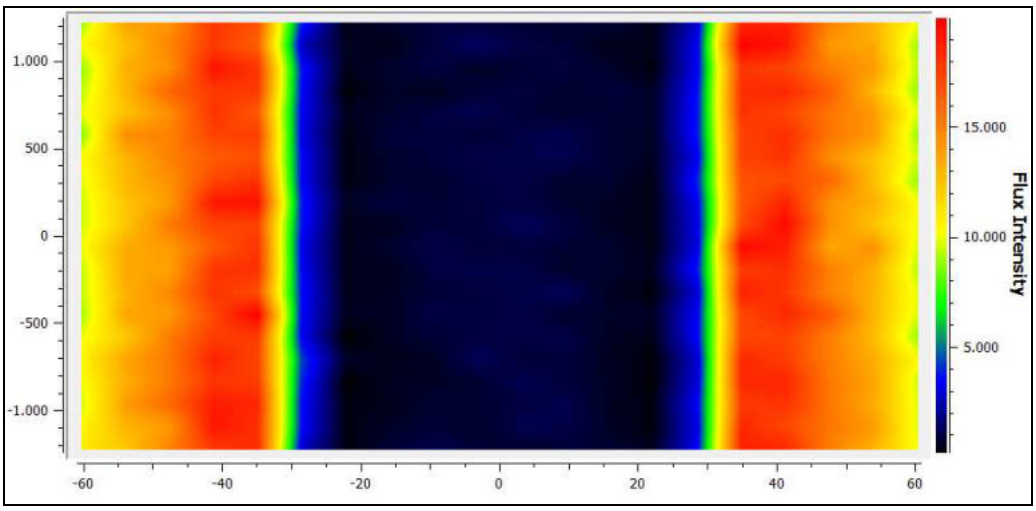


Figura 8: Flujo de radiación incidente sobre una sección arbitraria del tubo receptor.

Del análisis de las Figuras 7 y 8 se observa que la parte superior del tubo receptor solamente está expuesta a la radiación directa del sol. Por el contrario, el resto del tubo recibe la radiación incidente concentrada desde la superficie reflectante.

Se realizaron simulaciones modificando el ángulo de incidencia observándose que poco antes de alcanzar los 2°, comienza a declinar el porcentaje de incidencia tal como se observa en la Figura 9. Teniendo en cuenta que el sol se mueve a razón de 15°/hora, se concluye que el tiempo que transcurre desde que el sistema se encuentra perfectamente alineado hasta que comienza a reducirse la radiación incidente sobre el tubo receptor debe ser menor a 8 minutos. Este resultado, sugiere que podría adaptarse un sistema de seguimiento discontinuo cuya puesta a punto contemple un leve desenfoque "adelantado" con el fin de poder ampliar la ventana de tiempo en que el sistema actúe para mover al CCP a su nueva posición sin que se reduzca el porcentaje de radiación incidente. Este tiempo podría fijarse en 10 minutos. De este modo el sistema se posicionaría inicialmente con un adelanto de 5 min y sería reposicionado cuando la alineación tenga 5 min de atraso.

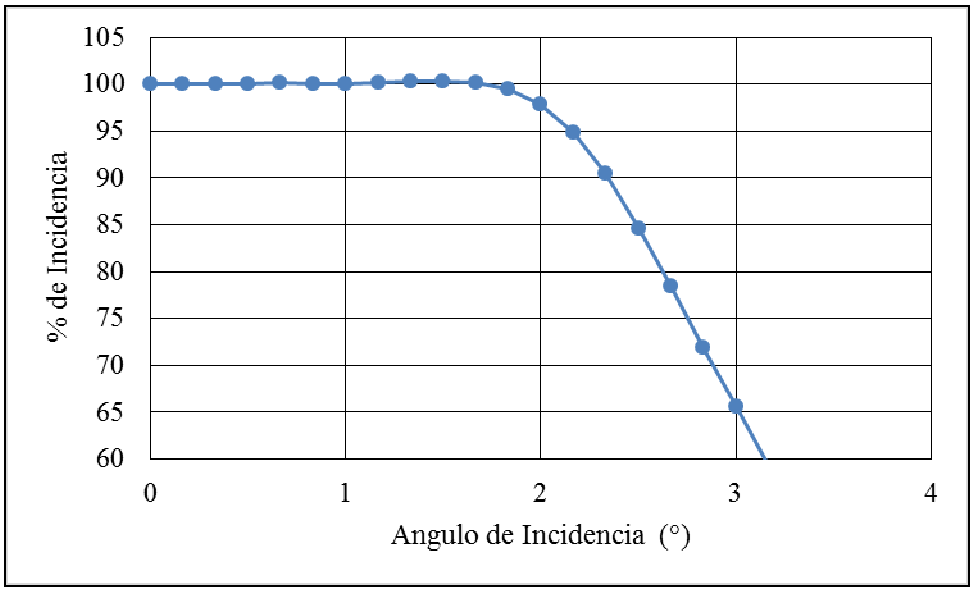


Figura 9: Variación del porcentaje de incidencia sobre el tubo receptor según el ángulo que conforman los rayos solares a partir de la posición normal

DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO TÉRMICO

El rendimiento térmico del CCP fue evaluado experimentalmente de acuerdo a la norma ASHRAE 93-1986 (RA 91). El propósito de esta norma es proveer un método de ensayo para determinar el rendimiento térmico de colectores solares que utilizan fluidos sin cambio de fase y con baja capacidad de almacenamiento de energía interna. Este método es ampliamente utilizado para comparar las eficiencias de colectores similares. El rendimiento térmico fue calculado de acuerdo a la Ecuación 3 en función del parámetro de pérdida de calor dado por la Ecuación 4

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{G A_a} \times 100 \qquad (3)$$

$$\frac{T_i - T_a}{G} \qquad (4)$$

Donde:

η = Rendimiento térmico

$\dot{m}$ = Caudal másico

C_p = Calor específico

T_o = Temperatura de salida

T_i = Temperatura de entrada

T_a = Temperatura ambiente

G = Radiación Global

A_a = Área de apertura del concentrador

Se trabajó en un rango de temperatura de entrada entre 20 y 80 º C con el fin de evitar el cambio de fase del agua utilizada como fluido térmico. El caudal fue fijado en 1,33 litros/min de acuerdo a las características del caudalímetro disponible. En la Figura 10 se muestran los resultados del ensayo donde los puntos corresponden al rendimiento térmico instantáneo.

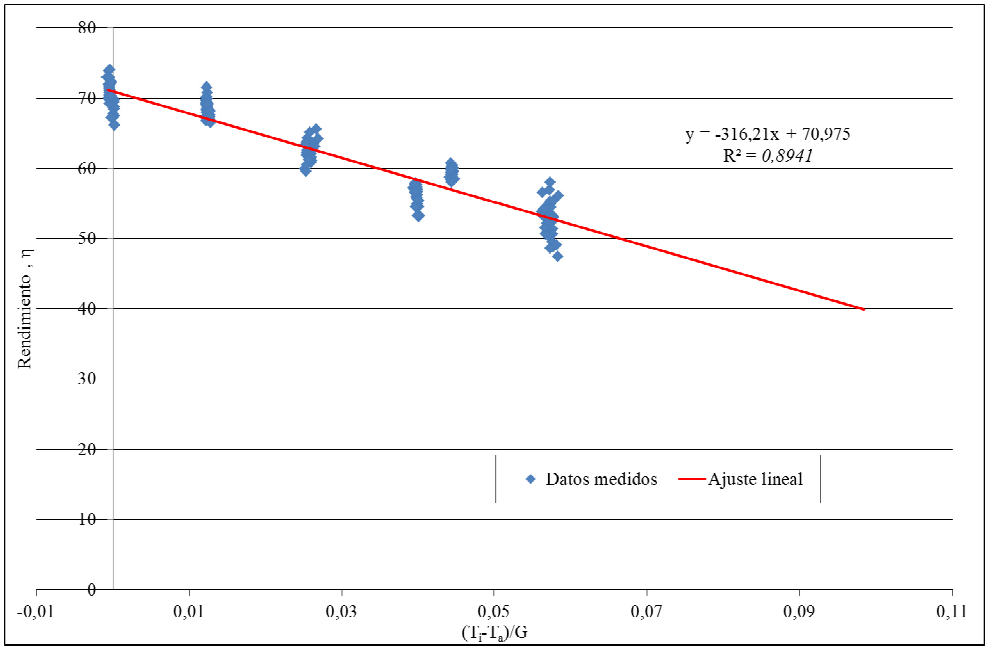


Figura 10: Ensayo de rendimiento térmico del CCP

Tal como lo establece la norma se realiza el ajuste lineal de los datos experimentales. La ordenada al origen de la recta obtenida corresponde al rendimiento óptico ya que en esta condición la temperatura de entrada del fluido caloportador es igual a la temperatura ambiente por lo que se consideran despreciables las pérdidas de calor por convección. En esta situación, la diferencia entre la energía que llega al concentrador y la energía que absorbe el fluido caloportador se produce únicamente por razones ópticas. Este rendimiento que es de aproximadamente el 70 % es inferior al real si se considera que el ensayo se realizó utilizando como dato la radiación global y no la directa. Por otra parte debe tenerse en cuenta que el ensayo se realizó sin aislar el tubo receptor. La aislación evitaría las pérdidas de calor por convección con lo cual se mejoraría notoriamente el rendimiento térmico cuando el equipo trabaja con altas temperaturas.

CONCLUSIONES

La utilización de concentradores cilíndrico parabólicos para producir vapor de agua de baja entalpía destinado a procesos industriales se presenta como una alternativa viable para complementar la tecnología tradicional basada en el uso de combustibles fósiles. Los equipos modulares, pequeños livianos y de bajo costo son apropiados para plantas ubicadas en zonas industriales donde se dispone de espacios reducidos.

A partir de los cálculos teóricos realizados en un trabajo anterior se construyó un prototipo con una superficie de captación de 2,5 m^2, siendo el ancho de 1050 mm y el largo de 2390 mm. Se utilizó un tubo receptor de 38,5 mm sin aislación. La superficie de captación está orientada hacia el norte y gira en el sentido de este a oeste. El diseño de esta estructura tuvo en cuenta la disponibilidad de los materiales en el mercado local. La construcción requirió de mano de obra no especializada y fue realizada con la colaboración de alumnos de grado, lo cual contribuyó a enriquecer el proceso de enseñanza – aprendizaje.

Para evaluar la precisión con que fue construido el concentrador, se realizó un estudio de funcionamiento óptico simulando la incidencia de los rayos del sol con rayos laser. El porcentaje de incidencia sobre la superficie evaluada fue cercano al 99 % utilizando un tubo receptor de 38,5 mm, mientras que para un tubo receptor de 22,0 mm el porcentaje de incidencia disminuyó al 91 %. Las observaciones indican que esta disminución se produce en los bordes y también en la zona de las costillas donde la lámina reflectante ha sido remachada.

Se realizaron simulaciones de seguimiento solar utilizando el software libre Soltrace. Estas simulaciones permitieron establecer que cuando el ángulo de incidencia se desvía en 2°, comienza a declinar el porcentaje de incidencia de los rayos sobre el tubo receptor. Se concluye que podría utilizarse un sistema de seguimiento discontinuo que actúe cada 10 min para mover al CCP a su nueva posición sin que se reduzca el porcentaje de radiación incidente.

Se evaluó experimentalmente el rendimiento térmico del CCP de acuerdo a la norma ASHRAE 93-1986 (RA 91). Se determinó que el rendimiento óptico del concentrador alcanzó al 70 % siendo este valor similar al obtenido por otros autores. Este resultado confirma la idea de que con tecnologías locales es posible construir este tipo de concentradores con buenos rendimientos.

Para un trabajo futuro se prevé la realización de ensayos con tubo aislado de vidrio no evacuado para mejorar el rendimiento térmico, la construcción del circuito del fluido térmico y el desarrollo de un sistema de seguimiento solar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto y a la Secretaría de Políticas Universitarias dependiente del Ministerio de Educación de la Nación que financió el proyecto a través del programa “Universidad, Diseño y Desarrollo Productivo” Edición 2013.

REFERENCIAS

Alanod Solar. http://alanod-solar.com/en/Reflection (Fecha de acceso: 03/08/2015)

ANSI/ASHRAE 93-1986 (RA 91). Methods of testing to determine the termal performance of solar collectors. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.; 1991.

Daghero J., Garnica J., Barros J., Rodriguez R. Concentrador Cilíndrico-Parabólico Aplicado a la Generación de Vapor para la Extracción de Aceites Esenciales de Plantas Aromáticas y Medicinales. Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 1. pp 02.37-02.44, **2013** ISBN 978-987-29873-0-5

Fernandez-García A., Rojas E., Pérez M., Silva R., Hernandez-Escobedo Q., Manzano-Agugliaro F. (2015). A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat. Journal of Cleaner Production 89, 272-285.

Fernandez -García A., Zarza E., Valenzuela L., Pérez M. (2010) Parabolic-trough solar collectors and their applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 1695-1721

Jaramillo O., Venegas-Reyes E., Aguilar J., Castrejón-García R. (2013). Parabolic trough concentrators for low enthalpy processes. Renewable Energy 60, 529-539.

National Renewable Energy Laboratory. http://www.nrel.gov/csp/soltrace/ (Fecha de acceso; 05/08/2015)

Thomas A. (1996). Solar steam generating systems using parabolic trough concentrators. Energy Convers. Mgmt 37, 2, 215-245

Vidriales Escobar L. (2007). Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para Calor de Proceso. Tesis de Maestría en Ingeniería. Centro de Investigación en Energía. Universidad Autónoma de México. pp. 17-18.

Weiss W. Rommel M. (2005). Solar Heat for Industrial Processes. Medium Temperature Collectors. State of the Art within Task 33/IV Subtask C. www.eng.usf.edu/~hchen4/Medium%20Temperature%20Collectors.pdf (Fecha de acceso: 02/07/2015)

Weiss W. Rommel M. (2008) Process Heat Collectors. . State of the Art within Task 33/IV. http://aee-intec.at/0uploads/dateien560.pdf (Fecha de acceso: 02/07/2015)

ABSTRACT

This paper presents the design, technological development and functioning analysis of a parabolic trough collector prototype, which will be used for industrial low enthalpy steam generation. The prototype aperture area is 2,5 m^2. An optical evaluation of its behaviour is made by performing a mapping of its reflectance surface by means of laser pointers. A specific simulation software was used in order to determine the necessary adjusting time for the parabola surface to be maintained well guided, which will optimize the use of energy. This adjusting time will be used in the broken control system of collector sun tracking. A low temperature test was made, in accordance to ASHRAE 93-1986 (RA 91) standard, from which an optical efficiency of 70 % was determined

Keywords: solar energy, parabolic trough concentrator, thermal performance, steam production