

“Análisis teórico-experimental del colector solar cilíndrico parabólico automatizado con espejos reflectantes”

“Theoretical and experimental analysis of automatic cylindrical parabolic solar collector with reflective mirrors”

Anthony Pinedo Araujo¹
David Asmat Campos²

¹ Universidad Privada del Norte; sede Trujillo, pia@upnorte.edu.pe.

² Universidad Nacional de Trujillo, Grupo de Investigación de Física de la UNT (GIFUNT)
davidasmat88@hotmail.com / dasmat@gifunt.com

RESUMEN

En la presente investigación se presenta un análisis de los colectores solares cilíndricos parabólicos (CCP), los cuales fueron mejorados a través de incorporación de espejos reflectantes, aumentando así la eficiencia de los mismos. De igual manera se añadió un sistema de seguimiento de luz, basado en fotosensores, para que se pueda aprovechar al máximo cada rayo solar. Como primera aproximación se asumió que el colector solar funciona como un cuerpo negro perfecto. Luego se propone un modelo más real, en donde se toman en cuenta las pérdidas de calor, disipación de los rayos solares, las propiedades ópticas de los materiales utilizados, etc. En la parte experimental se armó todo el sistema, comparándolo con los sistemas “tradicionales” de los CCP, obteniendo una notable mejora en la temperatura alcanzada por el tubo receptor en un menor tiempo de exposición. Así mismo se presentan las aplicaciones de este tipo de colectores, que van desde sistemas domésticos de calefacción, mejoramiento de producción anaeróbica de Fermentación, hasta centrales termosolares para la generación de energía eléctrica. En la parte final, se presentan propuestas para la mejora de este sistema en función al estudio teórico realizado.

Palabras Clave: Colector Cilíndrico Parabólico, seguimiento de luz, energía solar, espejos reflectantes.

INTRODUCCIÓN

Fueron dos los factores que definieron que el uso de las energías renovables sea un campo muy activo el día de hoy:

- El gran daño que se está causando al medio ambiente con el uso de combustibles fósiles.
- Lo escasos de este tipo de combustibles que se prevé para los siguientes años.

Es por eso que, son necesarias propuestas diversas en cuanto a cómo se deben usar dichas energías renovables. Es clásico conocer que tales fuentes son: energía solar, energía eólica, energía hidráulica, energía geotérmica, etc.

En la primera centraremos nuestra atención porque el Sol es, quizá, la mayor posible fuente de energía, y veamos por qué. Desde el punto de vista energético, la masa solar que por segundo se irradia al espacio en forma de partículas de alta energía y de radiación electromagnética es aproximadamente de $5,6 \times 10^{35}$ GeV y de ella, la Tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de $1,73 \times 10^{14}$ kW, es decir $1,353 \text{ kW/m}^2$ [1], la cual se conoce como constante solar y cuyo valor fluctúa en un $\pm 3\%$ debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol.

De toda la energía mencionada, el 30% es reflejado por la atmósfera al espacio exterior. El 23% se utiliza en la evaporación de los océanos. El 47% se utiliza para calentar la atmósfera. Y una minúscula parte (menor al 1%) se utiliza en los procesos de formaciones de vientos y fotosíntesis.

Del 47% de energía solar que se mencionó que se utiliza para calentar la atmósfera, solo el 31% logra hacer contacto directo con la superficie terrestre, porque el otro 69% se pierde en el trayecto (ya sea por absorción de la tropósfera, reflejo de las nubes, el polvo, la humedad, etc.)

Estos valores mencionados son el promedio sobre todo nuestro planeta. Esto se podría traducir en que, bajo condiciones óptimas, la radiación solar sobre la superficie terrestre podría llegar a 1 Kw/m^2 (un valor muy ideal). Este valor no diverge mucho de la radiación solar recibida en determinadas regiones en nuestro país, y de hecho nuestro país es uno de los más privilegiados en ese aspecto.

Como se vio, la presencia de la atmósfera reduce notablemente la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra, puesto que la atmósfera, en función a sus constituyentes gaseosos y aerosoles presentes en ella, tiene la capacidad de absorber, dispersar y reflejar la radiación solar. La cantidad de radiación que llega a la superficie terrestre es mayor si menor es la concentración de ozono, vapor de agua, dióxido de carbono y aerosoles en la atmósfera. La concentración y cantidad de los 3 últimos disminuye con la altitud; por esta razón en el Perú, debido a su orografía, la radiación solar incidente aumenta considerablemente en la Sierra peruana. Esta región se encuentra principalmente entre los 2000 y 3000 metros de altitud y ocupan un 30 % del territorio nacional. Entonces se puede notar que nuestro país tiene un potencial muy grande en cuanto a uso de este recurso.

El problema sigue siendo el mismo: las tecnologías aplicables dentro del mercado tienen costes muy elevados en comparación con el ingreso del campesino normal que habita en la sierra. Por ejemplo si hablamos de paneles solares para generación de energía eléctrica, uno de estos que solo genere 100 watts tiene un costo aproximado de 400 dólares. ¿Se le puede pedir a un campesino que gaste 400 dólares (omitiendo los gastos de instalación, mantenimiento y los sistemas de regulación que un panel de por sí exige) para comprar un panel solar para que prenda un par de fluorescentes cuando él puede ir, cortar un árbol, y prender fuego sin gastar un solo dólar?

Este costo se debe a la poca eficiencia (15%) que poseen estos aparatos. Aunque actualmente existen alternativas para poder obtener una mayor energía de un panel solar, un ejemplo claro son los paraboloïdes de revolución que se están utilizando en Australia para concentrar una mayor cantidad de energía solar sobre un panel solar.

En el presente trabajo, se presentará una alternativa para aprovechar la energía solar en procesos de calentamiento de agua a través de un sistema de colección solar parabólico automatizado. Esta alternativa es un poco más aplicable y rentable a nuestra población, debido a nuestro alto potencial en recursos solares y que no necesita de especialistas en el tema, solo un poco de perseverancia.

Colectores Solares Cilíndricos Parabólicos

El esquema de este colector se puede ver en la figura 1. Este sistema aprovecha la propiedad de las parábolas: todo rayo que choque sobre la parábola será reflejado en dirección a un punto llamado foco. Es decir, que si se crea alguna superficie reflectora en forma de parábola, y se coloca un tubo receptor en ubicación exacta del foco, entonces este tubo recibirá todos los rayos solares de la superficie reflectora, logrando así una alta concentración de rayos solares sobre una pequeña región. Este tipo de colectores llegan hasta los 400°C

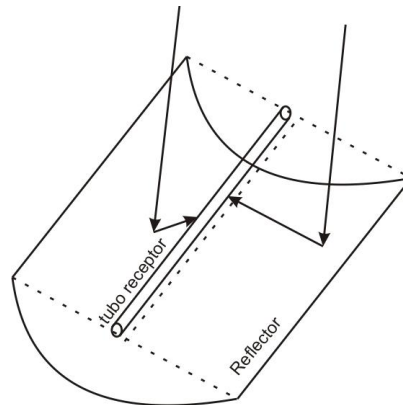


Figura 1. Esquema de un colector solar parabólico

Modelo Teórico del colector Solar Parabólico

Para empezar se debe recordar que la parábola se rige bajo la siguiente ecuación (asumiendo que comienza en el origen de coordenadas)

$$y^2 = 4fx$$

En donde f es la distancia focal (véase la figura 2). Llevando esa expresión a coordenadas polares, tenemos que:

$$\rho = \frac{f}{\cos^2 \frac{\varphi}{2}} \quad (1)$$

De acuerdo a la figura 2 se pueden llegar a la siguiente relación:

$$h = 2f \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

Recordando que el diferencial de longitud de arco de una parábola está dado por $ds^2 = d\rho^2 + \rho^2 d\varphi^2$. Suponiendo que la parábola tenga una profundidad L , entonces el área total de la parábola será:

$$A_{\varphi} = 2Lf \left(\frac{\sin \left(\frac{\Phi}{2} \right)}{\cos^2 \left(\frac{\Phi}{2} \right)} + \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{4} \right) \right| \right) \quad (3)$$

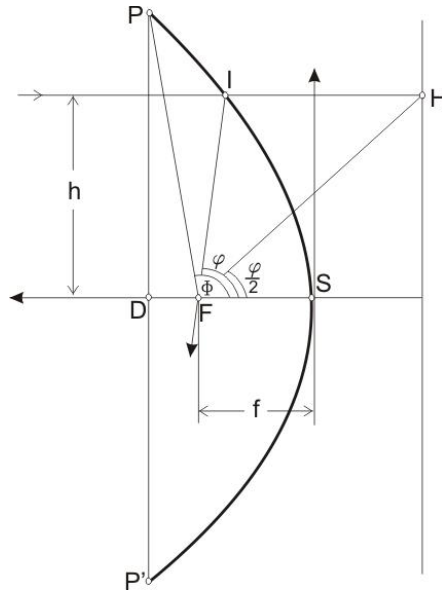
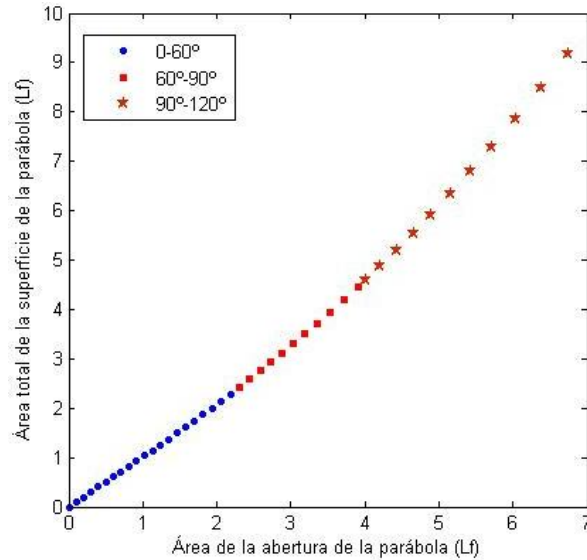


Figura 2. Esquema de una parábola

Para futuros cálculos, resulta necesario definir el área total de la abertura de la parábola, la cual será importante porque la radiación solar se define sobre un área perpendicular al rayo solar (a donde llegará), que para este caso será el área de la abertura:

$$A_a = 4Lf \operatorname{tg} \frac{\Phi}{2} \quad (4)$$

Es importante recalcar que de las ecuaciones 3 y 4 se puede notar que para ángulos grandes el aumento en la superficie del colector no genera un aumento proporcional en el área de la abertura (véase el gráfico 1). Este detalle es el responsable por el cual, la mayoría de colectores solares modernos no poseen ángulos mayores a 60° para no desperdiciar material en vano, ya que si aumentásemos el ángulo también incluye un uso de material extra, el cual no se compensaría con la radiación extra obtenida.



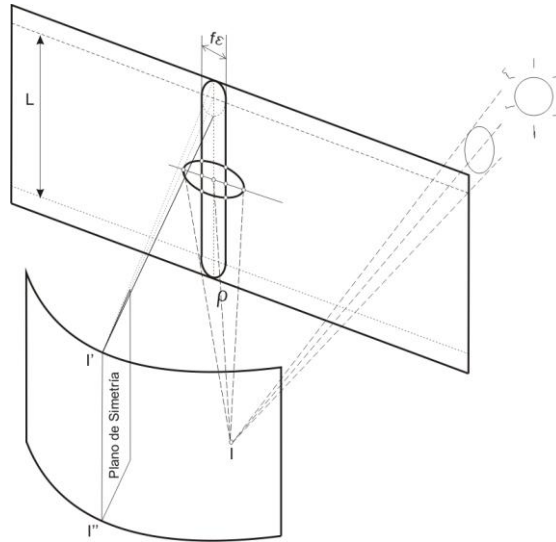


Figura 3. Esquema del ángulo de incidencia y reflexión

Suponiendo que nuestro foco se encuentre a 2 metros de nuestra superficie reflectante, y con una abertura de $\Phi = 90^\circ$ entonces este radio mínimo será de 1 cm, lo cual es fácilmente alcanzable. Pero en el presente trabajo, al utilizar espejos reflectantes, se utilizaron láminas de espejos de una longitud L y un ancho d (véase la figura 4). De la figura 4 se puede observar que los espejos fueron colocados tal que formen una parábola, luego mientras más alejados estén los espejos del foco, menor es la separación entre los rayos del inicio y fin del espejo respectivo. Así pues, no resulta difícil obtener que el radio mínimo necesario para aprovechar toda la radiación solar reflejada debe ser de:

$$r_{\min} = \frac{f\xi}{\cos^2\left(\frac{\Phi}{2}\right)} + \frac{d}{2} \quad (6)$$

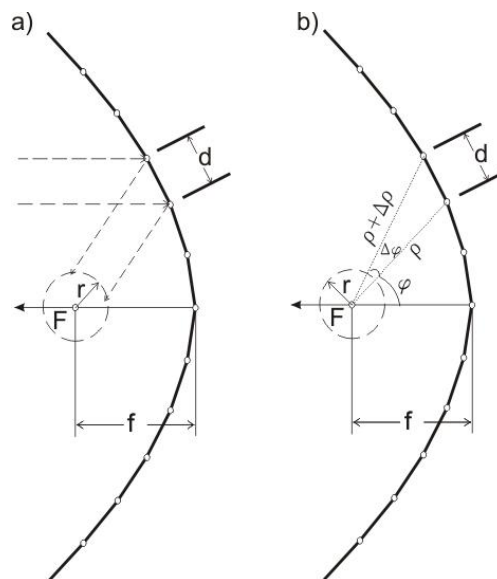


Figura 4. Esquema del prototipo real basado en láminas de espejos reflectantes

Modelo del cuerpo negro

Como primera aproximación, se podría tratar al tubo receptor como un cuerpo negro, esto es, asumimos que no existen pérdidas de ningún tipo (ya sea por radiación, conducción y convección).

Para ello, se debe tomar en cuenta que la superficie reflectante concentrará los rayos solares que caigan sobre el área de la abertura de dicha parábola en el área que ocupe el tubo receptor. Esto causará que la radiación incidente por unidad de área sobre el tubo colector sea mayor que la radiación recibida por la superficie terrestre. Al cociente de estas áreas se denomina factor de concentración, el cual matemáticamente se define como:

$$C = \frac{A_{abertura}}{A_{receptor}} = \frac{2f \operatorname{tg}\left(\frac{\Phi}{2}\right)}{r_{receptor}} \quad (7)$$

En donde se utilizó la ecuación (4), y que el área transversal del tubo receptor es $2rL$. La gráfica 2 muestra el comportamiento del factor de concentración en función del área total de la parábola, para un radio del receptor igual a una centésima de la distancia focal.

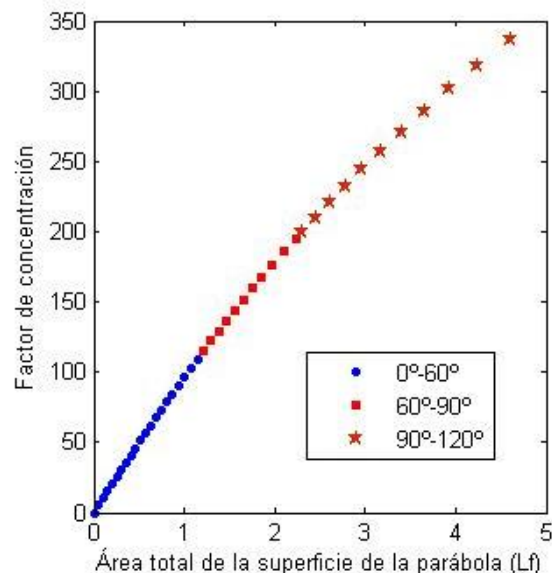


Gráfico 2. Relación entre el factor de concentración el área total de la superficie de parábola

Para poder plantear nuestro modelo del cuerpo negro, se debe recurrir a la ecuación de Stefan Boltzmann incluyendo el factor de concentración para lo cual:

$$IC = \sigma T^4 \quad (8)$$

Donde C es el factor de concentración, T la temperatura, I la energía incidente sobre el reflector, σ la constante de Boltzmann, cuyo valor es $5,6704 \times 10^{-8}$ h.

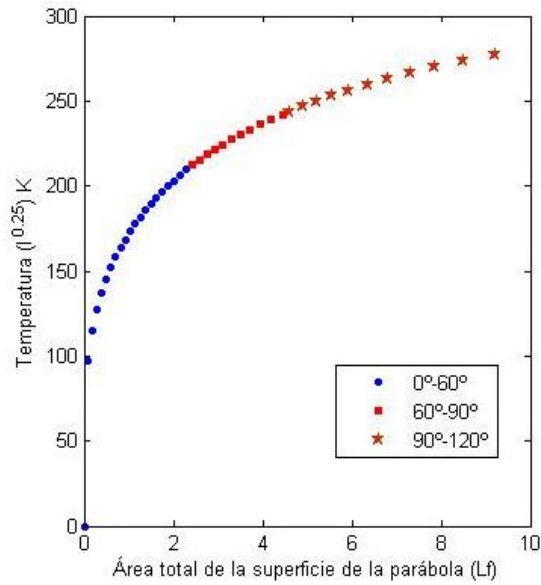


Gráfico 3. Relación entre el factor de concentración el área total de la parábola

Modelo más realista

En el modelo anterior se asumió que toda la radiación sería absorbida por el tubo receptor y sería automáticamente transformado en calor el cual se manifiesta en el aumento de temperatura del mismo. Se debe recordar que la intención final de este colector no es calentar el tubo receptor propiamente dicho, sino al agua que circulará dentro de ella. Para ello se tiene que la radiación solar que afecte al tubo receptor generará un calor útil que será la responsable de que el agua llegue a calentarse. Dentro de tal proceso existen pérdidas de calor por conexión, conducción y radiación (véase figura 5).

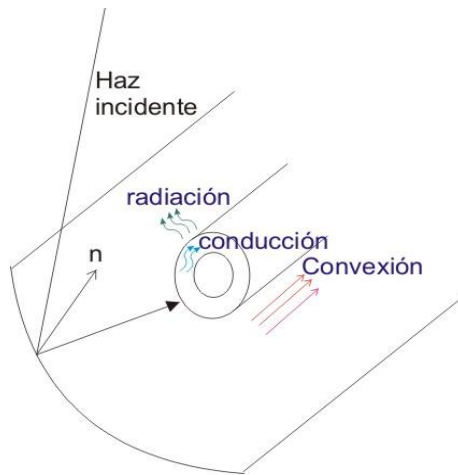


Figura 5. Esquema de las pérdidas de calor del sistema

Utilizando las ecuaciones de la termodinámica, se puede llegar a que la siguiente expresión:

$$\dot{q}_{\text{util}} = \dot{m}_{\text{agua}} \cdot c \cdot T_{\text{salida}} - T_{\text{ingreso}} = \alpha \tau I A - \dot{Q}_{\text{perdidas}}$$

En donde α es la absorptancia y τ es la transmitancia del tubo receptor. T_{salida} y $T_{ingreso}$ son las temperaturas de salida e ingreso del agua. I es la radiación solar y A es área de la abertura de la parábola. C es el calor específico del agua. El calor perdido por convección, radiación y conducción están dados por:

$$\dot{Q}_{perdidas} \quad h = h \cdot A_r \cdot T_{receptor} - T_{ambiente}$$

$$\dot{Q}_{perdidas} \quad \varepsilon = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_r \cdot T_{receptor}^4 - T_{ambiente}^4$$

$$\dot{Q}_{perdidas} \quad k = k \cdot \Delta x \cdot A_r \cdot T_{receptor} - T_{ambiente}$$

En el análisis de este tipo de colectores, es necesario el uso del ángulo θ [3] (se forma entre el vector radiación del sol, y el vector perpendicular a la superficie normal al plano de simetría de la parábola). Para lo cual tenemos que la energía incidente por unidad de superficie sobre el concentrador reflector es:

$$I = I_0 \cos \theta \quad (9)$$

El ángulo θ mencionado en la ecuación anterior, tendrá determinados valores dependiendo del tipo de sistema de seguimiento que se implante en el colector.

En puntos diferentes al ecuador, un colector solar que pretenda seguir el movimiento completo del sol, necesitaría dos ejes de giros perpendiculares entre sí. Para ello existen dos propuestas, la primera es que se genere un sistema de rotación de este a oeste y otro de norte a sur y la segunda que se gira alrededor de un eje perpendicular al de la tierra y otro inclinado. Esto causaría que el ángulo θ se igual a cero durante todo el día, lo cual llevaría a que la intensidad captada por esos sistemas, sea el máximo posible, de acuerdo a la ecuación 9.

Entonces como en este paper se trabajó con un CCP automatizado, entonces en la ecuación 9 el ángulo es siempre cero grados.

Si se pretende encontrar alguna cota para el caso de transferencia de calor ideal, asumimos que en el sistema no existen pérdidas de calor. La gráfica 4 muestra el comportamiento ideal.

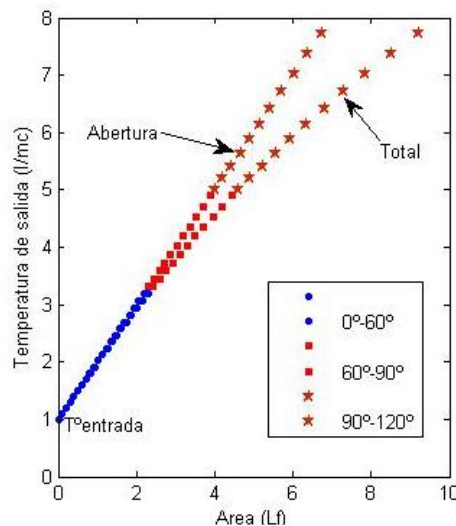


Gráfico 4. Relación entre la temperatura de salida del fluido y las áreas totales y de la abertura del CCP

Los diferentes coeficientes que causan las pérdidas de calor son determinados experimentalmente.

EXPERIMENTAL

En el desarrollo experimental, se adecuaron a modo de comparación el sistema de reflexión y un sistema de seguimiento solar automatizado, el cual se pudo observar diferencias comparado con un CCP construido con materiales reflectantes como el acero inoxidable, y un sistema de seguimiento solar asistido, los cálculos corroboran el mejor funcionamiento del sistema adecuado para este trabajo, Así mismo proponemos que el sistema sea asistido por un módulo solar (celda fotovoltaica), el cual pueda dotarnos de la fuente eléctrica requerida para accionar el motor, pues actualmente la fuente de energía eléctrica utilizada es la convencional.

La figura 6 muestra la imagen general del sistema de CCP dotado de sistema de seguidor solar automatizado.

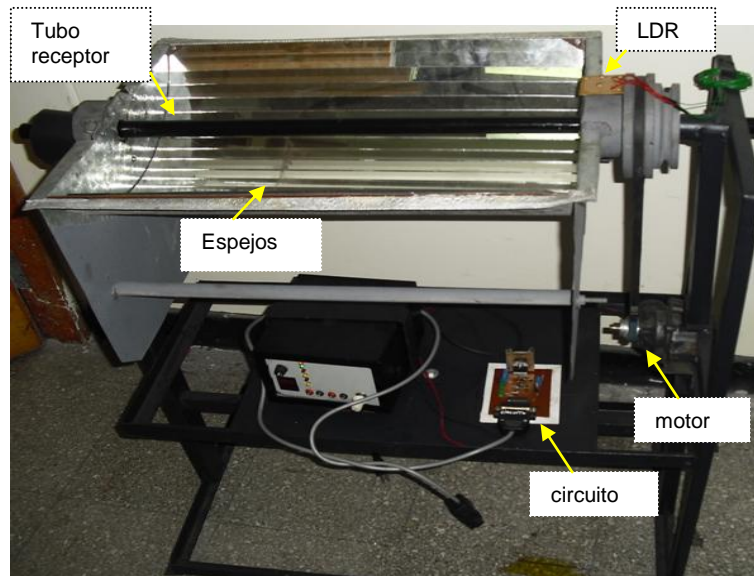


Figura 6. CCP automatizado con espejos reflectantes construido

Como se mencionó, para sustentar este trabajo, se realizaron 2 prototipos con las mismas características de construcción (ver tabla 1), solo difieren en 2 cosas, el material reflectante y el sistema de seguimiento solar, cabe mencionar que los resultados obtenidos de la temperatura fueron tomados en época de verano (mes de Febrero).

La tabla 1 presenta un cuadro comparativo con 2 tipos de CCP.

	COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO (GIFUNT)	COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO (UPN)
Características del Equipo CCP:		
Longitud del Foco Parabólico	65 cm.	65 cm.
Diámetro focal	½ “	½ “
Material del foco parabólico	Cobre	Cobre
Largo parabólico (horizontal)	65 cm.	65 cm.
Material Reflejante	Acero Inoxidable	Espejo
Ángulo de Giro parabólico	180 °	180 °
Intervalo de tiempo estacionario (de pase de agua por el foco geométrico) ^(*)	6 - 7 minutos	4 - 5 minutos
Resultados Obtenidos:		
T° Ingreso del Agua	20.5 °C	20.0 °C
T° Salida del Agua	73°C	77°C
Datos adicionales (características del día de toma de datos):		
T° Ambiente	20.5 °C	20 °C
Intensidad de radiación promedio	700 W/m ² – 750 w/m ²	700 W/m ² – 750 W/m ²
OTROS	Sistema de seguimiento solar asistido	Sistema de seguimiento solar automatizado

Tabla 1. Cuadro comparativo de los colectores parabólicos diseñados por el GIFUNT y el presentado en este trabajo

(*) El intervalo de pase de agua por el foco geométrico de parábola fue asistido mediante una válvula de goteo continuo adherido a la salida del tanque principal de agua y graduado en 4.86 ml/min (aprox. 5ml/min.) a un paso de longitud de 65cm. Se comparó con el diseño creado por el Grupo de Investigación de Física de la Universidad Nacional de Trujillo (GIFUNT)

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la actualidad existe gran demanda de sistemas de colectores cilíndricos parabólicos de gran envergadura, en centrales térmicas solares, todas ellas accionadas con sistema computarizado de seguimiento solar, ante eso en este trabajo se propuso un sistema de seguimiento solar por fotosensores, además el análisis comparativo de variaciones térmicas de 2 sistemas de CCP con medio reflectante diferentes (espejo vs. Acero inoxidable), siendo el más eficiente el CCP con espejo quizás debido al sistema de seguidor solar que se le adhirió, construyéndole una montura de seguimiento de azimut de tipo ecuatorial capaz de seguir el sol de manera autónoma y con un gasto energético que fácilmente puede ser suministrado por un panel fotovoltaico. Esto deja abierta la posibilidad de la instalación de un módulo fotovoltaico que recarguen constantemente las baterías que alimenten al motor.

Las aplicaciones de los colectores parabólicos se han generalizado, desarrollándose más los diseños de centrales solares para la generación de energía eléctrica, posteriormente seguido en aplicaciones de viviendas con diseño bioclimático, así mismo para el mejoramiento de deshidratadores solares, como sistema de precalentamiento de destiladores solares, aumento de la temperatura en cámaras de generación de biogás, entre otros. [4]

La aplicación más inmediata de este tipo de sistemas de colección solar, dentro de la sierra peruana, es la posible implementación de un sistema de calefacción para viviendas. Es bien sabido oleada de frío que aqueja a esas regiones y además allí existe un potencial solar tremendo debido a la altitud a la que se encuentran, tal que el sistema de colección como un posible panel fotovoltaico podrían tener muy buenos resultados bajo esas condiciones. Con este sistema no habría la preocupación de que el panel se cubra con alguna capa de hielo (tal como está pasando en la actualidad) sino que el mismo colector suministre calor al panel evitando cualquier solidificación del agua del ambiente.

Está claro además que, del análisis teórico, si manejamos adecuadamente los coeficientes que causan las pérdidas de energía en el sistema, podríamos aumentar aún más la eficiencia para la misma. Entre estas mejoras tenemos que utilizando espejos de primera superficie podríamos obtener hasta un 5 % más de energía que es recibida por el colector. Se podría, además, recubrir el tubo receptor con vidrio, tal que genere un efecto invernadero y aumentando así la temperatura total del tubo receptor (aquí se debe tener cuidado debido a la calentura, el espejo podría romperse, se requiere otro estudio para probar la factibilidad de esta propuesta).

CONCLUSIONES

- Se logró construir con éxito el CCP automatizado con espejos reflectantes.
- Las temperaturas alcanzadas por este tipo de CCP es ligeramente mayor (en un 6%) que el obtenido por el CCP basado en acero galvanizado.
- El tiempo de espera para calentar determinados volúmenes de agua es menor (en un 30%) en el CCP basado en espejos reflectantes que en el acero galvanizado.
- Se logró construir un modelo físico-matemático del CCP que nos permite establecer cotas máximas (teóricas) esperadas para estos colectores.
- Este sistema podría ser mejorado si se hubiese colocado alguna cubierta de vidrio al tubo receptor, tal que por efecto invernadero, las temperaturas y los tiempos obtenidos hubiesen sido mejores.
- Queda abierta la posibilidad del uso de espejos de primera superficie para la mejora del coeficiente de reflexión de los espejos de la superficie del CCP.
- El sistema podría ser autosustentable si es que se le implementa algún sistema de celdas solares tal que los motores puedan funcionar con la energía generada por tales celdas.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Mg. Francisco Rodas Días por su constante apoyo durante el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Solar Constant, vista a 6 de junio del 2010 en: <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>.
- [2] Pedro Fernandez Diez, Procesos Termosolares en Baja, media y Alta Temperatura, Departamento de Energía Eléctrica y Energética, Universidad de cantabria, 2007
- [3] Carlos Polo Bravo y Elisnan Sacari Sacari., “Evaluación de un Concentrador Cilíndrico Parabólico”, XVI Simposio Peruano de Energía Solar, 2009.
- [4] Jorge Quinteros Grijalva, Estudio teórico y experimental de colector solar parabólico para generación de energía eléctrica, tesis Universidad de Chile, 2008

E-mail: pia@upnorte.edu.pe
davidasm88@hotmail.com

Universidad Privada del Norte (UPN filial Trujillo), Universidad Nacional de Trujillo (UNT), Grupo de Investigación de Física de la Universidad Nacional de Trujillo (GIFUNT)