

EVALUACION EXPERIMENTAL DE UN CONCENTRADOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO (CCP)

Polo Bravo, Carlos; Sacari Sacari, Elisban J.
Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT)
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna
polobravoCarlos@yahoo.es / elisban_sac@hotmail.com
TACNA – PERÚ.-

1. RESUMEN:

El concentrador solar cilíndrico parabólico (CCP), diseñado y construido por estudiantes de la Especialidad de Energías Renovables de la Escuela Académica Profesional de Física Aplicada (ESFI) de la Facultad de Ciencias (FACI), es un sistema que concentra la energía del sol en una línea focal en el cual se encuentra un receptor o tubo absorbente, este tubo absorbente puede contar con una envoltura de vidrio para evitar pérdidas de calor al medio ambiente, y en el presente trabajo mostramos la metodología utilizada para la evaluación experimental del concentrador solar cilíndrico parabólico realizada en las instalaciones del Centro de Energías Renovables de Tacna, de la Facultad de Ciencias de la UNJBG.

Dicha evaluación bajo las condiciones de radiación solar y otros parámetros meteorológicos de la ciudad de Tacna, a consistido en lo siguiente: determinación del área eficiente de la superficie reflectante, pérdidas de calor debido al ángulo de inclinación del concentrador, determinación de la eficiencia óptica, determinación del coeficiente global de pérdidas y la determinación de la eficiencia térmica.

Los resultados obtenidos se muestran en la parte final del paper, indicando que los resultados de los parámetros evaluados difieren en un 27 % al evaluar el concentrador con y sin vidrio en el tubo absorbente receptor.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

En la actualidad el desarrollo de las energías renovables en nuestro país, específicamente en el área de sistemas de concentración solar esta pre incipiente, a diferencia de otros países en los cuales utilizan esta tecnología para la generación de electricidad a gran escala a través de plantas termoeléctricas. Esta tecnología tiene un gran interés socioeconómico y ambiental, al encontrar la viabilidad de la misma por el gran potencial solar que existe nuestra región.

Para que en nuestro país esta alternativa energética también este a nuestro alcance es necesario contribuir y profundizar las investigaciones en el campo de la concentración de la energía solar ante esto es necesario dar el primer paso en el diseño y construcción o mejora de los prototipos que deben estar orientadas a la obtención de vapor de agua u otro líquido a altas temperaturas, para así poder generar vapor y pensando en un futuro próximo en la generación de energía eléctrica ya que esta siempre será una necesidad en este mundo moderno que cada día requiere de mayor energía para mejorar su calidad de vida, y sobre todo para los gases de efecto invernadero emitidas en la combustión de energías tradicionales como el petróleo, gas y el carbón, y así mitigar el Cambio Climático que hoy enfrenta nuestro planeta, y que cada día se intensifica.

3. MÉTODOS DE LA EVALUACIÓN:

3.1 DETERMINACION DEL FACTOR DE CONCENTRACION

Para determinar el factor de concentración del concentrador cilíndrico parabólico empleamos la siguiente relación:

$$X = \frac{A_{abertura}}{A_{tubo\ absorbente}}$$

Este resultado es teórico y es válido si la superficie reflectante estuviera en perfecto estado y además toda la radiación incidente fuese reflejada a la superficie absorbente, pero debido a las deformaciones presentadas en la superficie reflectante debido a que la estructura no es perfecta, podemos presenciar dos tipos de pérdida de la radiación solar en este sistema.

- Pérdidas debido a las deformaciones de la superficie reflectante, para calcular el área reflectante eficiente que veremos en el punto.
- Pérdidas debido al ángulo de inclinación, este punto lo desarrollaremos en el punto.

3.2| DETERMINACION DEL AREA EFICIENTE DE LA SUPERFICIE REFLECTANTE

Para este cálculo vamos a usar un método bien sencillo, por variación de voltaje, que consiste en demostrar que toda la superficie del concentrador tiene la forma de la ecuación $Y = X^2 / 4 F$, para esto vamos a:

- Seccionamos la superficie del concentrador en rectángulos de 3cm x 2cm, dándonos un total de $42 \times 121 = 5082$ rectángulos en toda la parábola (ver *Figura 1* y *Figura 2*), siendo el área del concentrador cilíndrico parabólico 1.25 m^2 .
- Haremos incidir el haz de un puntero laser en el centro de estos pequeños rectángulo de forma perpendicular a la parábola, dicho haz deberá ser reflejados al foco de la parábola, donde se encuentra el tubo absorbente.
- Según sea reflejado el haz del puntero laser del rectángulo se le dará valores de 1 a 3, dichos valores servirán para formar una tabla, el cual nos servirá para hacer un modelado de las deformaciones del concentrador (*Figura 9*), los valores tendrán la siguiente razón de ser:
 - 0: si el haz es reflejado al tubo absorbente
 - 1: si el haz es reflejado a la derecha.
 - 2: si el haz es reflejado a la izquierda.
 - 3: si es reflejada para adelante
 - 4: si es reflejada para atrás.
- Una vez tengamos la tabla podremos calcular el porcentaje del área que refleja la radiación incidente hacia el tubo absorbente.



*Figura 1: Concentrador cilíndrico parabólico seccionado en rectángulos de 3cm * 2 cm.*

3.3 PERDIDAS DEBIDO AL ANGULO DE INCLINACION DEL CONCENTRADOR CILINDRICO PARABOLICO.

Este tipo de perdidas se presenta debido que el concentrador no se encuentra situado perpendicularmente a la radiación incidente (*Figura 2*).

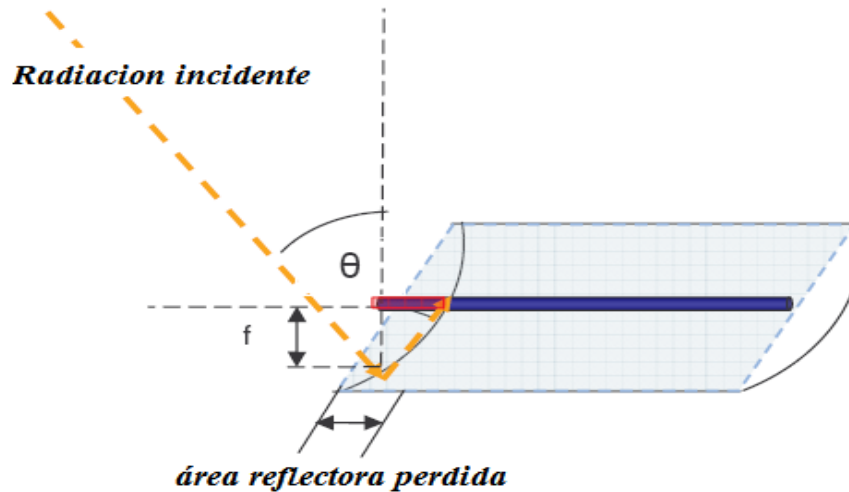


Figura 2: Pérdidas debido al ángulo de inclinación.

Como podemos ver en la *Figura 2*, la radiación solar incide al concentrador cilíndrico parabólico con un ángulo de incidencia θ (el cual es diferente de cero) de la normal del concentrador, es debido a este ángulo que se pierde una parte del área reflectora ya que el haz incidente es reflejado con el mismo ángulo, hacia el tubo absorbente, es debido a esto que parte del tubo absorbente (parte pintada de rojo en la *Figura 2*) no recibe la radiación reflejada por el concentrador. Para calcular esta área reflectora perdida, simplemente medimos la distancia del tubo absorbente a la cual no le llega la radiación reflejada, luego la multiplicamos por 1.10 m el cual es el ancho del concentrador cilíndrico parabólico.

3.4 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ÓPTICA ($\tau\alpha$):

Para la determinación de la eficiencia óptica del concentrador cilíndrico parabólico, se llena el tubo absorbente con agua fría, a una temperatura inferior a la temperatura ambiente ($T_e \ll T_{amb}$); para ello se usa hielo. El agua fría ingresa a una temperatura T_e , por un extremo del tubo absorbente como se muestra en la *Figura 3*, y con una llave paso se regula el flujo de agua. La salida del agua a una temperatura T_s del tubo absorbente se es dirigida por medio de una manguera a un recipiente.

El concentrador cilíndrico parabólico es orientado hacia el sol de sur a norte, y con inclinación igual a la latitud de Tacna 17° ; se dejó calentar el sistema lentamente hasta obtener las condiciones deseadas, esta evaluación se realiza, primeramente con el tubo absorbente sin el cobertor de vidrio y luego con el cobertor de vidrio.

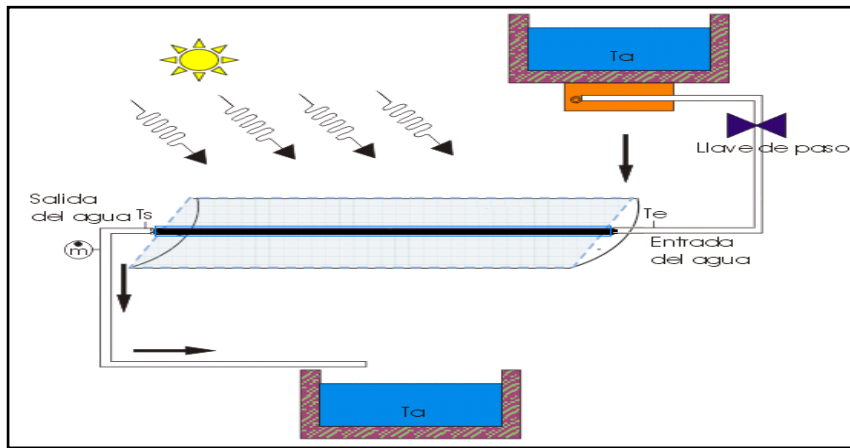


Figura 3: Esquema para la determinación de la eficiencia óptica (τ_a) del concentrador cilíndrico parabólico.

3.5 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE GLOBAL DE PÉRDIDAS DE CALOR: (U_L)

Armamos el esquema de la Figura 4 y mantenemos funcionando el termostato, calentando el agua a una temperatura de 70 °C, por lo menos una hora hasta que la temperatura se estabilice, luego se midieron las temperaturas de entrada y salida del tubo absorbente con termocuplas tipo K, unas veinte veces, luego se sacó un promedio, asimismo simultáneamente, se midió la temperatura del ambiente de trabajo (T_{amb}), el flujo volumétrico (\dot{m}). Se calculó la temperatura promedio (T_m) entre las temperaturas de entrada y salida del agua del tubo absorbente, se midió el área del tubo absorbente (A_{abs}), y finalmente se calculó U_L ; el trabajo se realiza en oscuridad, es decir bajo radiación solar nula.

Esta evaluación se realiza con tubo absorbente con y sin el cobertor de vidrio.

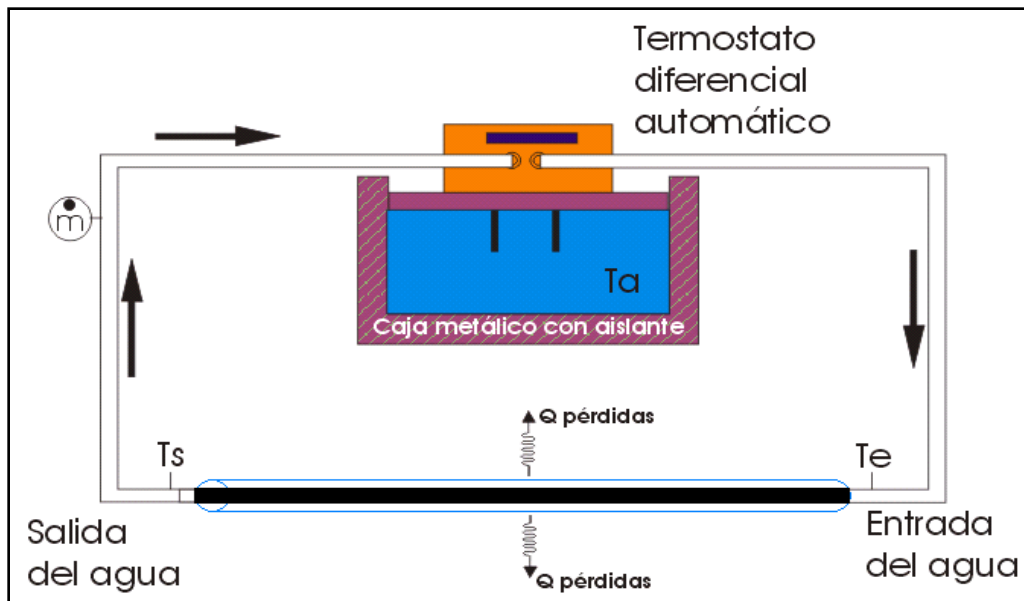


Figura 4: Esquema para la determinación de U_L del tubo receptor absorbente

3.6 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA

Con la determinación de la eficiencia óptica y el coeficiente global de pérdidas, obtenemos la siguiente relación:

$\eta = \alpha \tau - U_L \frac{(T_m - T_{Amb})}{G_t X}$ y; el factor de concentración del concentrador es $X = A_{abertura} / A_{tubo\ absorbente}$ esta operación la realizamos para determinación de la eficiencia térmica del concentrador para los casos en el cual el tubo absorbente esté con y sin el cobertor de vidrio.

4. RESULTADOS:

4.1 CARACTERSTICAS DEL CONCENTRADOR CILINDRICO PARABÓLICO EVALUADO

El concentrador cilíndrico parabólico evaluado tiene las siguientes características:



Figura 5: Concentrador cilíndrico parabólico evaluado

- La superficie reflectante es de plancha de aluminio anodizado de alto coeficiente de reflexión, de 0,2 mm de espesor
- El receptor o tubo absorbente es de aluminio, pintado con pintura negro mate para aumentar la capacidad de absorción de calor, tiene un radio de 1,27 cm (1”).
- Para el cobertor del tubo absorbente se utilizó tubos de vidrio procedente de tubos fluorescentes malogrados (ver *Figura 6 y 7*) y colocadas concéntricamente al tubo absorbente para evitar pérdidas de calor por convección y radiación al medio ambiente.
- ❖ El área de abertura del concentrador cilíndrico parabólico es de 2,662m².



Figura 6: Tubos fluorescentes malogrados, utilizados como cobertor del tubo absorbente



Figura 7: tubo absorbente con el cobertor de vidrio, y junta de unión entre tubos de vidrio

4.2 FACTOR DE CONCENTRACION:

El factor de concentración teórico, se determina por la ecuación siguiente:

$$X = \frac{A}{A_c} = \frac{2.d.L}{2.\pi.r.L} = \frac{d}{\pi.r} = \frac{55 \text{ cm}}{3,1416 * 1,27 \text{ cm}} = 13,78$$

4-3 AREA EFICIENTE DE LA SUPERFICIE REFLECTANTE.

Sabiendo que:

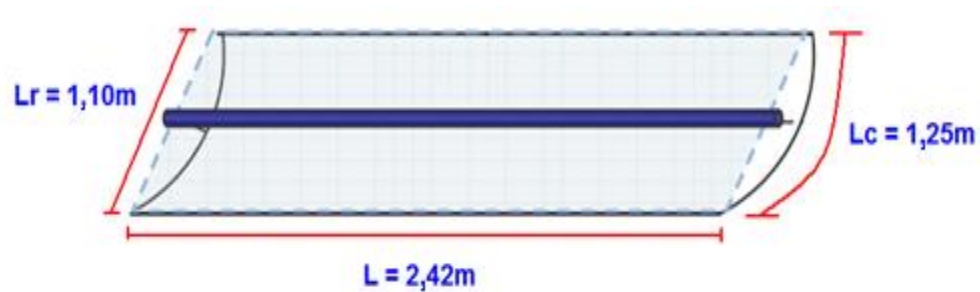


Figura 8: Dimensiones del concentrador cilíndrico parabólico.

El área reflectante es:

$$A_R = L_C * L$$

Donde: A_R : Área de la superficie reflectante [m²]
 L_C : lado curvo [m]
 L_r : lado recto [m]
 L : largo del concentrador [m]

Entonces tenemos que $A_R = 3,025\text{m}^2$

Según el método explicado en el punto 3.2.1, el 12% del área reflectante (0.363m²) es deficiente debido a deformaciones en toda la superficie reflectante (ver partes amarillas en la *Figura 9*), sumándole un 5.45% de superficie reflectante (0.1648m²) que se pierde debido a un ángulo de incidencia de la radiación solar mayor o menor a la normal del concentrador cilíndrico parabólico, haciendo un total de un 17.45% de área reflectante que se pierde (0.5278 m²) debido a estos 2 tipos de pérdidas ópticas, quedándonos un área de trabajo de 2.4971m² (82.55% del área total del concentrador).

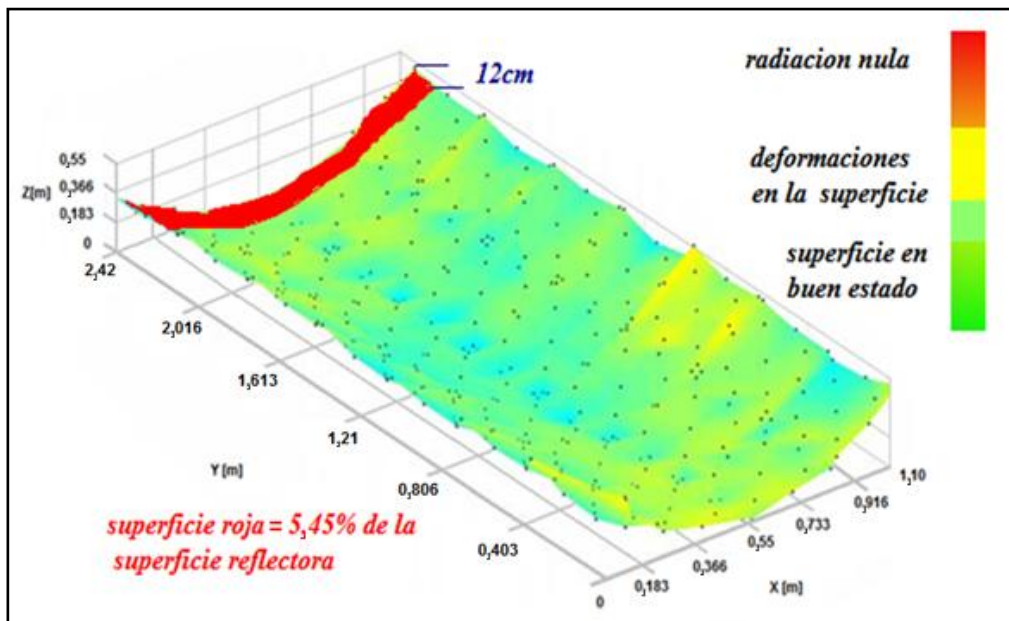


Figura 9: Área reflectora eficiente del concentrador cilíndrico parabólico.

Para las siguientes aplicaciones deberemos tomar en cuenta la siguiente relación:

$$\frac{A_{abertura}}{A_R} = \frac{L_R * L}{L_C * L} = \frac{L_R}{L_C} = 0,88 ; A_{abertura} = 0,88 A_R$$

Siendo $A_{abertura}$ el área de abertura del concentrador cilíndrico parabólico.

Con este resultado podemos calcular ahora el área de abertura eficiente del concentrador cilíndrico parabólico.

Entonces podemos decir que el área de abertura eficiente es:

$$A_{abertura\ eficiente} = 0,88(A_R - 17,45A_R)$$

$$A_{\text{abertura eficiente}} = 2,197\text{m}^2$$

De ahora en adelante usaremos esta área ($A_{\text{abertura eficiente}}$) en vez de A_{abertura} , ya que es el área real de trabajo, debido a las pérdidas ópticas del concentrador cilíndrico parabólico ($A_{\text{abertura eficiente}} = A_{\text{abertura}}$).

4-4 CALCULO DE LA EFICIENCIA OPTICA

Armamos los equipos tal como muestra la *Figura 3*.

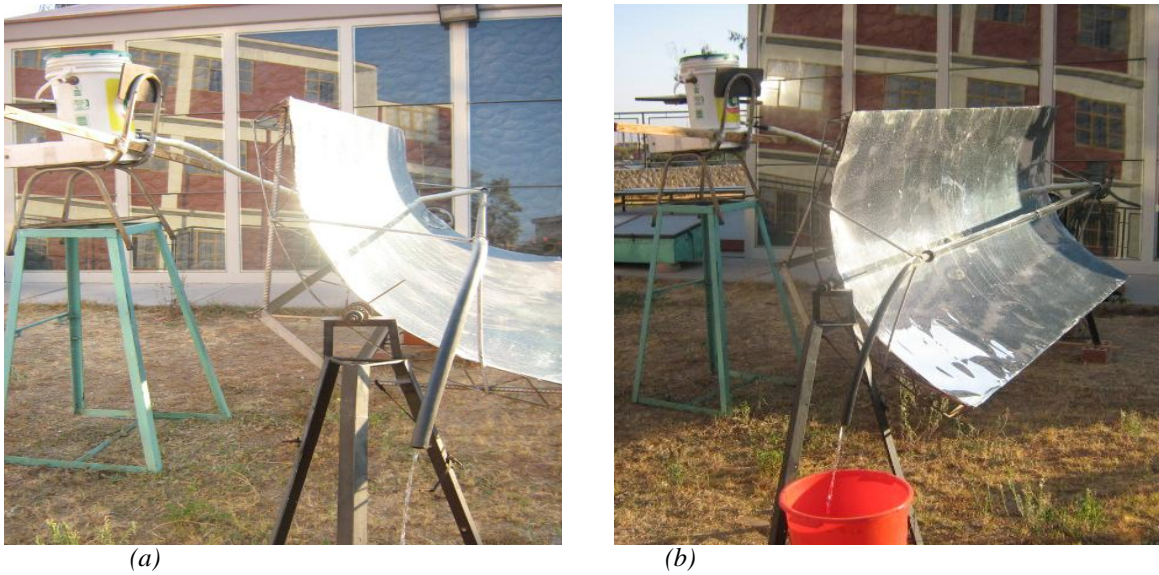


Figura 10: (a) equipo armado para la medición de la eficiencia óptica, tubo absorbente sin el cobertor de vidrio.(b) equipo armado para la medición de la eficiencia óptica, tubo absorbente con el cobertor de vidrio

En las tablas siguientes se muestran los resultados de la eficiencia óptica del CCP, con y sin tubo de vidrio cobertor del tubo absorbente.

DETERMINACION DE LA EFICIENCIA OPTICA (TUBO ABSORBENTE CON EL COBERTOR VIDRIO)	
Temperatura de entrada T_e (°C)	22,70
Temperatura de salida T_s (°C)	25,30
Temperatura ambiente T_{amb} (°C)	24,00
Radiación Solar G_t (W/m^2)	973,78
Calor específico del agua c ($\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$)	4,19
Área del tubo absorbente (m^2)	0,50
Flujo de agua m (kg/s)	0,0316
Eficiencia óptica $\sigma\tau$	0,7063644

DETERMINACION E LA EFICIENCIA OPTICA (TUBO ABSORBENTE SIN EL COBERTOR VIDRIO)	
Temperatura de entrada T_e (°C)	23,00
Temperatura de salida T_s (°C)	24,80
Temperatura ambiente T_{amb} (°C)	23,90
Radiación Solar G_t (W/m^2)	801,49
Calor específico del agua c ($\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$)	4,19
Área del tubo absorbente (m^2)	0,50
Flujo de agua m (kg/s)	0,0294
Eficiencia óptica $\sigma\tau$	0,5527783

La eficiencia óptica la calculamos a partir de los datos obtenidos experimentalmente:

4-5 CÁLCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE PÉRDIDAS

Armamos el equipo como muestra la *Figura 4*.



Figura 11: (a) equipo armado para la medición del coeficiente global de pérdidas, tubo absorbente sin el cobertor de vidrio. (b) equipo armado para la medición del coeficiente global de pérdidas, tubo absorbente con el cobertor de vidrio.

En las siguientes tablas se muestran los valores del coeficiente global de pérdidas, obtenidos con los datos experimentales correspondientes

COEFICIENTE GLOBAL DE PERDIDAS PARA EL TUBO ABSORBENTE SIN EL COBERTOR DE VIDRIO		COEFICIENTE GLOBAL DE PERDIDAS PARA EL TUBO ABSORBENTE CON EL COBERTOR DE VIDRIO	
Temperatura de entrada T_e (°C)	68,65	Temperatura de entrada T_e (°C)	69,81
Temperatura de salida T_s (°C)	67,82	Temperatura de salida T_s (°C)	69,35
Temperatura media T_m (°C)	68,235	Temperatura media T_m (°C)	69,58
Temperatura ambiente T_{amb} (°C)	20,29	Temperatura ambiente T_{amb} (°C)	19,19
Calor específico del agua c (KJ/kg °C)	4.19	Calor específico del agua c (KJ/kg °C)	4.19
Flujo de agua m (kg/s)	0,083	Flujo de agua m (kg/s)	0,083
Área del tubo absorbente $A_{tubo\ absorbente}$ (m ²)	0,1931	Área del tubo absorbente $A_{tubo\ absorbente}$ (m ²)	0,1931
U_L (W/m ² °C)	31,147975	U_L (W/m ² °C)	16,4251

4-6 DETERMINACION DE LA EFICIENCIA TERMICA.

Una vez determinadas la eficiencia óptica y el coeficiente global de pérdidas, partimos de la ecuación $\eta = \alpha \tau - U_L \frac{(T_m - T_{amb})}{G_t X}$ y el factor de concentración (X), reemplazando el área de abertura ($A_{abertura}$) por el área de abertura eficiente ($A_{abertura\ eficiente}$) eficiente que es igual a 2,197 m², entonces tenemos que:

El nuevo factor de concentración será:

$$X_{eficiente} = \frac{A_{abertura\ eficiente}}{A_{tubo\ absorbente}}$$

$$X_{eficiente} = \frac{2,197m^2}{2\pi rL} = \frac{2,197m^2}{2 * 3,1416 * 0,0127 * 2,42m^2} = 11,37$$

Entonces la eficiencia térmica será:

Para el concentrador con tubo absorbente sin el cobertor de vidrio.

$$\eta_{sin\ C.vidrio} = 0,552 - 31,1479 \frac{(T_m - T_{amb})}{G_T X_{eficiente}}$$

$$\eta_{sin\ C.vidrio} = 0,552 - 2,739 \frac{(T_m - T_{amb})}{G_T}$$

Para el concentrador con tubo absorbente con el cobertor de vidrio.

$$\eta_{con\ C.vidrio} = 0,7063 - 16,4251 \frac{(T_m - T_{amb})}{G_T X_{eficiente}}$$

$$\eta_{con\ C.vidrio} = 0,7063 - 1,44 \frac{(T_m - T_{amb})}{G_T}$$

Comparando las eficiencias térmicas para los casos donde el tubo absorbente cuenta con el cobertor de vidrio y sin el cobertor de vidrio tenemos:

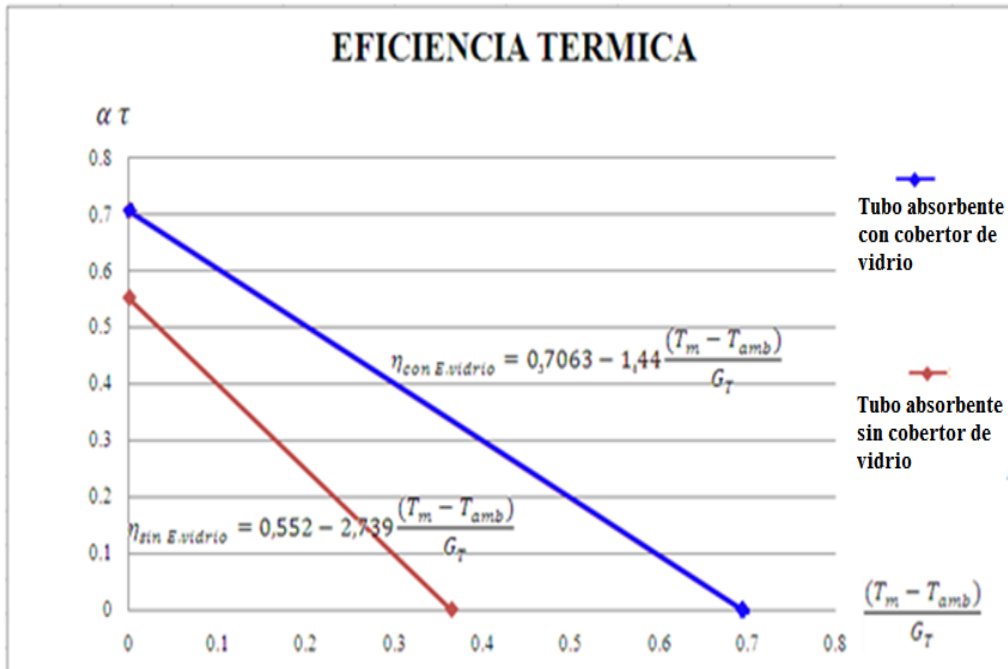


Figura 12: Comparación de la eficiencia térmica del concentrador cilíndrico parabólico para los casos donde el tubo absorbente esta con y sin el cobertor de vidrio.

5. CONCLUSIONES:

- Se concluye que debido a las deformaciones de las superficie reflejante y al ángulo de incidencia diferente a la normal del área de abertura, el área eficiente del CCP es solo de 2,19 m² del área total de abertura (2,93m²), afectando en la disminución del factor de concentración del concentrador cilíndrico parabólico.
- La eficiencia óptica obtenida con el tubo absorbente sin el cobertor de vidrio es del 55 %, y con el tubo absorbente con cobertura de vidrio es 71%; es decir el aumento del 27,7% se debe a que la cobertura de vidrio evita que el calor que emite al tubo absorbente no se pierda al ambiente por el fenómeno transferencia de calor por convección y radiación.
- El coeficiente global de pérdidas muestra claramente lo dicho anteriormente ya que el tubo absorbente sin cobertura de vidrio tiene un coeficiente global de pérdidas de 31,15 W/m² °C, en comparación con el tubo absorbente con cobertura de vidrio el cual tiene un coeficiente global de pérdidas de 16,43 W/m² °C, claramente se observa que las pérdidas de calor disminuyen aproximadamente en un 100 %.
- La eficiencia térmica obtenida para el CCP, con cobertor del tubo de vidrio aumenta en un 27 % .
- Para calentar 20 litros de agua, el CCP con tubo absorbente con cobertura de vidrio, la calienta casi en las 2/3 partes (66 min) empleado por el mismo CCP que no cuenta con la cobertura de vidrio. (100 min).

SUGERENCIAS

- ❖ Para aumentar la eficiencia del concentrador cilíndrico parabólico se debe mantener en todo momento que la radiación incidente al concentrador sea perpendicular al área de abertura, para ello es conveniente evaluar el sistema con un sistema de seguimiento de sol.
- ❖ Uno de los principales factores que se debe tomar en cuenta al construir un concentrador cilíndrico parabólico es la estructura de la misma, ya que es un factor importante para aprovechar la radiación del medio.
- ❖ Para una mejor utilización del CCP, este debe ser construido en mayor longitud, unas cuatro veces mayor, manteniendo el área de apertura, para la generación de vapor a alta temperatura.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

- [1] R. Forristall; HEAT TRANSFER ANALYSIS AND MODELING OF A PARABOLIC TROUGH SOLAR RECEIVER IMPLEMENTED IN ENGINEERING EQUATION SOLVER; National Renewable Energy Laboratory, Octubre 2003; Colorado - EEUU.
- [2] A. Federico Coz P., Jorge Vera E. ; CONCENTRADORES SOLARES; Departamento de Energía y Mecánica- UNI, setiembre 1982, Lima – Perú.
- [3] Agreda Paredes Jesús, Espinoza Mosqueira Rafael, Pérez Loayza Francisco; DISEÑO Y CONSTRUCCION DE CONCENTRADORES SOLARES; UNI, Mayo 1981, Lima - Perú.
- [4] Polo Bravo Carlos Armando; GUÍA DE LABORATORIO DE PROCESOS TÉRMICOS SOLARES; CERT-UNJBG, Noviembre – 2006, Tacna - Perú.

- [5] J.A. CHASSERIAUX, Conversión Térmica de la Radiación Solar, Librería Agropecuaria S.A., Primera Edición, Argentina, 1990.
- [6] JHON A, DUFFI, WILLIAM A, BECKMAN, Solar Engineering of Thermal Processes, Segunda Edición, Jhon Wiley & Sons, USA, 1991.
- [7]Manuel Romero Alvarez; ENERGÍA SOLAR TERMOELECTRICA.
- [8] ADEM B. MEINEL, MARJORIE P. MAINEL, Applied Solar Energy: An Introduction, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1979.
- [9] FRANZ TRIEB, Solar Electricity Generación, DLR-Institut für Technische Thermodynamik-Verlag, Alemania, 199H.
- [10] KLAIB, F. STAIB, Solar Thermal Power Plants for the Mediterranean Area, Springer-Verlag, Alemania, 1992.

DIRECCIONES ELECTRONICAS CONSULTADAS

- http://mx.geocities.com/leon_df/cap06.html
- <http://www.soliclima.es/info/8-termoelectrica/138-colectores-cilindrico-parabolicos.html>
- <http://www.langleyrenovables.com/termoelectrica.html>
- <http://www.redpilas.csic.es/pilas2005/workshops/workshopsevilla/MRomero.pdf>
- <http://atenea.us.es/php/infgen/aulav/energrenov/EERR-STC-04-05.pdf>
- <http://www.scribd.com/doc/8744367/2005-Tomo1-IA-Solar>