



# Diseño, construcción y evaluación del desempeño de Concentradores Solares Cilíndricos Asimétricos

Dra. De los Santos García Fátima María Isabel, (Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) – Luo Smart S.A. de C.V.)

Ing. Mónica Colunga Saucedo, (Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP))

Dr. Yuri Nahmad Molinari (Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) Instituto de Física)

C. Enrique Huguenin Lopez, (Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP))

C. Maximiliano Villareal Faz (Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP))

Mtro. Mario Echenique Lima (Luo Smart S.A de C.V.)

Mtro. Gregor Zieke (Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP))

**Resumen:** Se diseñó, construyó y evaluó dos centrales de colector solares asimétricos de  $3.17 \text{ m}^2$  y  $6.34 \text{ m}^2$ , en el Instituto de Física, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) usando tubos evacuados como receptor. Los concentradores solares se construyeron con materiales de bajo costo, teniendo un factor de concentración de 3 soles.

El concentrador solar cilíndrico asimétrico tiene una eficiencia instantánea de 24%, utilizando agua como fluido térmico. En la última etapa de pruebas se utilizó Etilenglicol para lograr llegar a una temperatura de  $130^\circ\text{C}$

**Palabras clave:** concentrador solar cilíndrico asimétrico, tubos evacuados, espejos circulares asimétricos.

## Introducción

A lo largo de los últimos años, el hombre, ha estado buscando diversas formas alternas de generación de energía que sean limpias, sustentables y preserven el equilibrio ecológico., esto debido a la problemática asociada al uso de combustibles fósiles, así como mitigar el costo económico que representa el proporcionar energía a toda la población.

Una de las alternativas más estudiadas y utilizadas es la energía solar, ya que ésta es una fuente constante y disponible en todas las regiones del planeta.

Por otro lado, México se encuentra dentro de la denominada franja solar, donde la disponibilidad del recurso solar es mejor que en otras regiones del planeta. En promedio, el territorio nacional cuenta con una insolación de  $5.3 \text{ kWh/m}^2$  por día, lo que representa un potencial energético importante que puede aprovecharse en beneficio del país. [1][10].

Con ello podemos determinar que la energía solar tiene una alta viabilidad, siendo una opción para el desarrollo y explotación de energías renovables. [3]. Una aplicación simple de la energía solar es su captación con un colector. Un colector solar es un dispositivo que transforma la energía solar en calor para transmitirlo a un fluido de trabajo. [4]. La complejidad de los dispositivos de conversión depende del nivel de temperatura que se desea alcanzar. [1].

Los colectores pueden ser con o sin concentración. Los primeros convencionalmente son estáticos, mientras que los concentradores utilizan lentes o espejos, para simular al efecto de una lupa, concentrar la radiación solar. [9]

La mayoría de los sistemas de concentración solar, trabajan exclusivamente con la componente directa de la radiación solar, por lo que requieren de un sistema de seguimiento solar. Esto influye en que se deben tener sistemas electrónicos y motores que realicen el seguimiento del Sol, lo cual impacta directamente en el costo de los sistemas.

Los concentradores cilíndricos parabólicos (CCP) reflejan la radiación solar directa sobre un tubo absorbente colocado en la línea focal de la parábola. La radiación concentrada incidente sobre el tubo absorbente hace que el fluido que circula por su interior se caliente.

Los CCP y los Concentradores de Fresnel Lineal (CFL) son sistemas de concentración 2D, de foco lineal, por lo que cuando se alinean en la orientación Este-Oeste, únicamente requieren del seguimiento del sol en un grado de libertad, es decir en 1 eje [7].



Otro tipo de concentrador es el parabólico compuesto, el cual surge de la combinación del concentrador cilíndrico parabólico y los sistemas sin concentración solar, originalmente diseñado para experimentos en física de altas energías.

El sistema consta de un material de alta reflectividad con dos secciones, una sección de involuta, curva descrita al desenvolver una cuerda tangente a la circunferencia, y una sección parabólica ver la figura 2. [8].

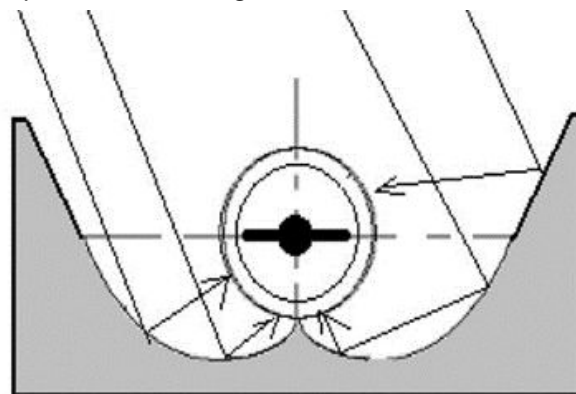


Figura 2. Concentrador parabólico compuesto (CPC).

Anteriormente el equipo de trabajo en el Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí ha elaborado concentradores solares cilíndricos relativamente pequeños, de 1.3 m de apertura, 2.15 m de longitud y 0.54 m de distancia focal, con la característica de tener bajo costo por sus materiales económicos y de fácil disponibilidad.

Esta investigación se realizó en colaboración con la empresa LUO Smart S.A de C.V. El diseño de este concentrador se basa en la estructura de los concentradores cilíndricos parabólicos, que a su vez nos sirvió de inspiración para la estructura que se presentará en este trabajo. [4]



Figura 1. Estructura de un concentrador cilíndrico parabólico

## 2. Diseño del colector solar cilíndrico asimétrico (CSCA)

El diseño del colector solar se realizó utilizando SolidWorks, el programa permite modelar piezas y extraer de ellos planos técnicos. Con los planos se mandó realizar un molde en madera con corte a laser para realizar la manufactura de los concentradores solares asimétricos, en la figura 3, se muestra el diseño del colector.



Figura 3. Modelo del concentrador en SolidWorks

### 2.2 Estructura del concentrador

En este trabajo, los concentradores solares se diseñaron con un perfil circular. El receptor es un tubo evacuado comercial, los cuales tienen un diámetro exterior aproximado de 6 cm.

Esta configuración permite coleccionar la mayor parte de los rayos reflejados por la superficie cilíndrica tanto en verano como en invierno con un factor de concentración de 3 soles. La estructura se orientó de este a oeste.

Para fabricar el concentrador se utilizó lámina delgada de aluminio calibre 30 con una reflectancia de 80% en el espectro visible. (Figura 4).

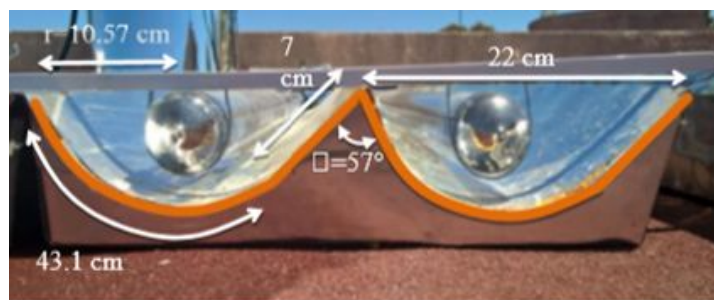


Figura 4. Vista frontal de un módulo del CSCA con sus medidas.

### 2.3 Termotanque

Se elaboró un termotanque a partir de un bote de 100 litros de capacidad, el cual se forro de lámina de aluminio calibre 28, dejando una separación de 5 cm donde se le agrego la mezcla de poliuretano como aislante térmico. En la tapa se le perforaron dos aberturas por donde pasaran las mangueras de entrada y salida del fluido térmico, asimismo los sensores de temperatura.

### 2.4 Sistema hidráulico (manifold)

Este arreglo une a los tubos de vacío, la bomba de agua conectada al termotanque y a los Concentradores Solares asimétricos

Se escogió usar tuboplus por que este material es de fácil manejo al no requerir soldaduras o cementos, no se oxida o acumula sarro, cuenta con un índice bajo de conductividad térmica, tiene mejor relación costo-beneficio contra otros materiales y tiene una capa protectora UV lo que le da una vida útil de 30 años a exteriores. En la (figura 5) se muestra el distribuidor

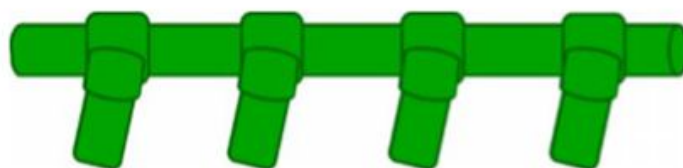


Figura 5. Dibujo del distribuidor de agua hecho con tuboplus

### 2.5 Tubos evacuados

Se utilizó tubos evacuados (Figura 6) de borosilicato capaz de resistir granizo de hasta 2.5 cm de diámetro, contiene una capa de nitrito de aluminio como capa absorbadora.



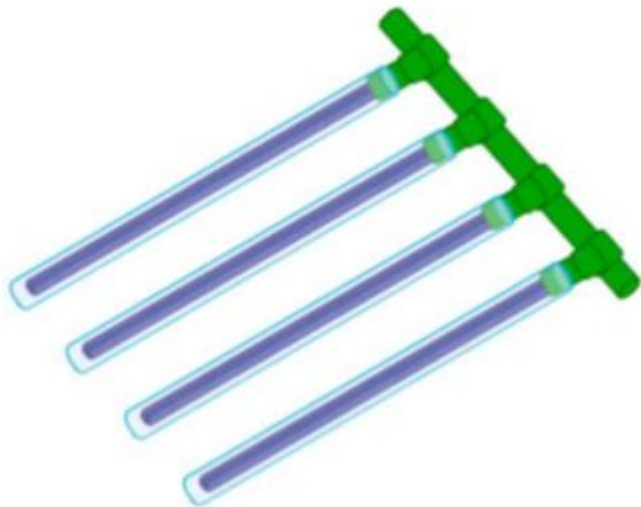


Figura 6. Dibujo del distribuidor acoplado a los tubos evacuados

## 2.6. Estructura final de la primera etapa

Se acopló el termotanque y el distribuidor de agua (manifold) con una bomba de fuerza 1/5 HP. Los tubos evacuados que se utilizaron son medidas estándar y tienen un largo de 1.80 m de largo.

El sistema tiene dimensiones de 3.52 m de ancho por 1.80 m de largo, lo cual nos da un área de 6.34 m<sup>2</sup>. El sistema se muestra en la figura 7.

El sistema se instaló en el Instituto de Física de la UASLP con las siguientes coordenadas Lat: 22.144262 | Long: -101.016399.

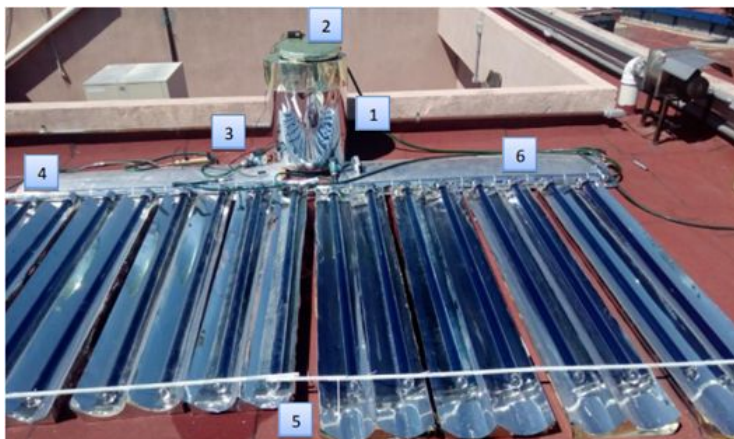


Figura 7. Prototipo CSCA segunda etapa 1) Termotanque. 2) Medidor de temperatura y radiación. 3) Bomba. 4) Tubos evacuados. 5) Concentradores. 6) Manifold.

## 2.7. Estructura final de la segunda etapa.

En un principio se utilizó glicerina como fluido de trabajo, pero era muy densa para moverla con una bomba comercial económica. En la segunda etapa, se agregó como líquido calo portador etilenglicol para subir el punto de ebullición del sistema, ver figura 8.

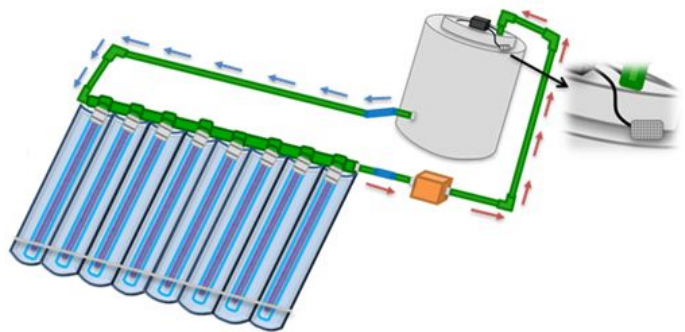


Figura 8. Prototipo segunda etapa

## 2.8. Reflectancia

Se realizó una medición de reflectancia de 3 materiales diferentes, aluminio reflectivo calibre 30, mylar y solar film, que son usualmente utilizados en la empresa LUO Smart S.A de C.V. En la figura 9 se muestra que el mylar y el solar film tienen una reflectancia mayor a la lámina de aluminio de alta reflectividad en el espectro visible (90% y 85 % respectivamente).

Sin embargo, estos materiales no resisten estar en la intemperie por más de 3 meses. Teniendo esto en cuenta, la lámina de aluminio de alta reflectividad cumple con las características deseadas al tener un 70 - 80% de reflectancia en el espectro visible y tener una vida útil de 15 años en la intemperie.

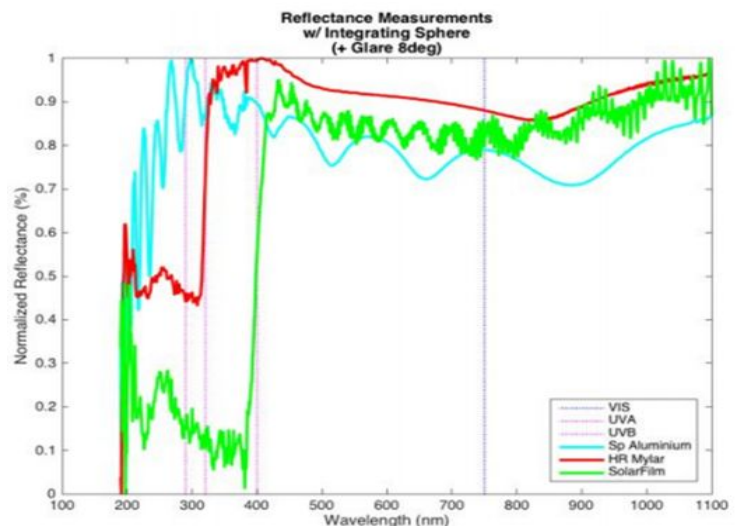


Figura 9. Medición de reflectancia con respecto a la longitud de onda

## 2.9. Software Tonatiuh

Para la modelación óptica del concentrador se utilizó el software Tonatiuh, el cual es un software código abierto. Tonatiuh utiliza el trazado de rayos por el método de Monte Carlo (método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias) para simular el comportamiento óptico de una gran variedad de sistemas.

Mediante este software se obtuvieron los siguientes resultados. Según la distribución de flujo incidente en el tubo evacuado, la mayor concentración de rayos radica en el lado donde se encuentra la recta, debido a que tiene mayor área de captación. Según el programa, se encontró con tan solo un error de 0.146727 de rayos que no son absorbidos por el tubo evacuado. (Figura 10).

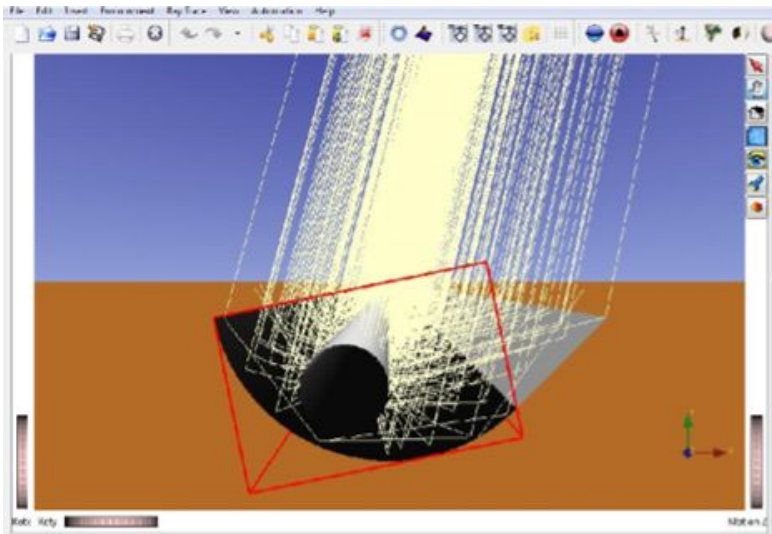
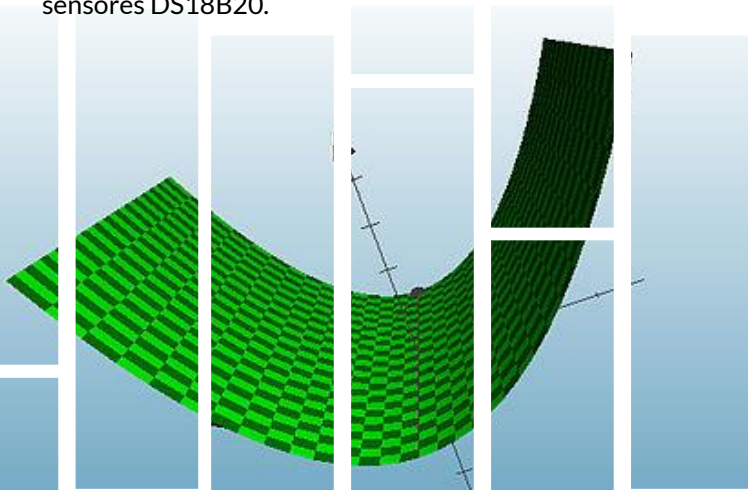


Figura 10. Prototipo CSCA en el programa Tonatiuh

## 3. Resultados

Para la caracterización de los concentradores solares asimétricos se utilizó un *data logger* de temperatura que tiene la capacidad de medir y registrar 6 temperaturas con sensores DS18B20.



Se realizaron las siguientes pruebas del sistema

- Sin seguimiento del Sol
- Con concentrador solar, haciendo seguimiento del Sol,

En orientación norte sur y sin seguimiento solar,

Como resultado, obtuvimos que no era muy representativo hacer el seguimiento del sol con este sistema. En la segunda etapa el sistema de concentradores solares asimétricos llegó a la temperatura de 130 °C con un área de 3.16 m<sup>2</sup>. Se utilizó un área menor, debido a que el etilenglicol, tiene un costo elevado y se buscaba evitar derrames de este debido a fugas en una sección de la planta.

## 3.1 Eficiencias

Se caracterizó el prototipo a lo largo de 6 meses, para observar el comportamiento de este según la radiación recibida.

Para el cálculo de la eficiencia térmica se tomó en cuenta el área efectiva del módulo, irradiancia directa, temperatura de entrada y la temperatura de salida del agua [5].

$$\eta_t = \frac{(T_{out} - T_{int}) \cdot C_p \cdot m}{G \cdot A}$$

Donde:

$\eta$  = Eficiencia térmica instantánea,

$m$  = Flujo másico del agua [ $kg \cdot s^{-1}$ ]

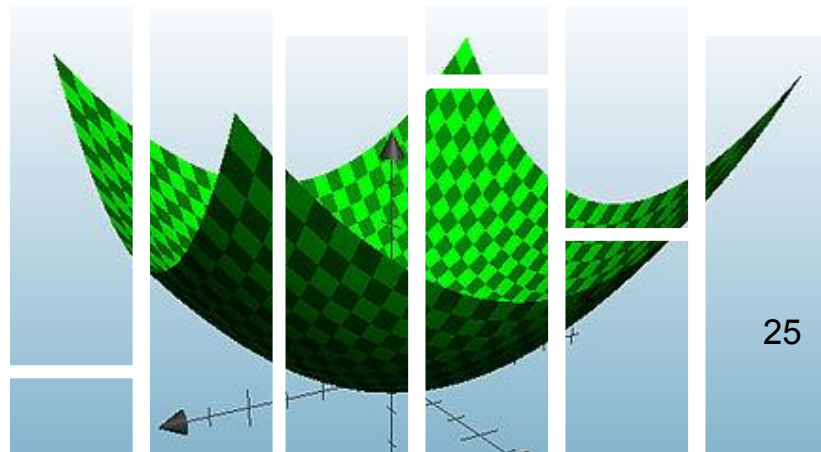
$C_p$  = Calor específico del agua [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$T_{out}$  = Temperatura de salida del agua del colector [K]

$T_{int}$  = Temperatura de entrada del agua al colector [K]

$G$  = Radiación absorbida por el colector [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$A$  = Área bruta del colector [ $m^2$ ]



Se utilizó un piranómetro Hukseflux LP02 para medir la radiación del sol. Se midieron temperaturas de entrada y salida del sistema, así como temperaturas en el termotanque y con estos datos se calcula la eficiencia del sistema térmico que sería la eficiencia del concentrador solar asimétrico utilizando como receptor un tubo evacuado.

En la figura 11 se muestra la comparativa de un día nublado vs un día con sol y se ilustra cómo en un día soleado se alcanza la temperatura de 80 °C.

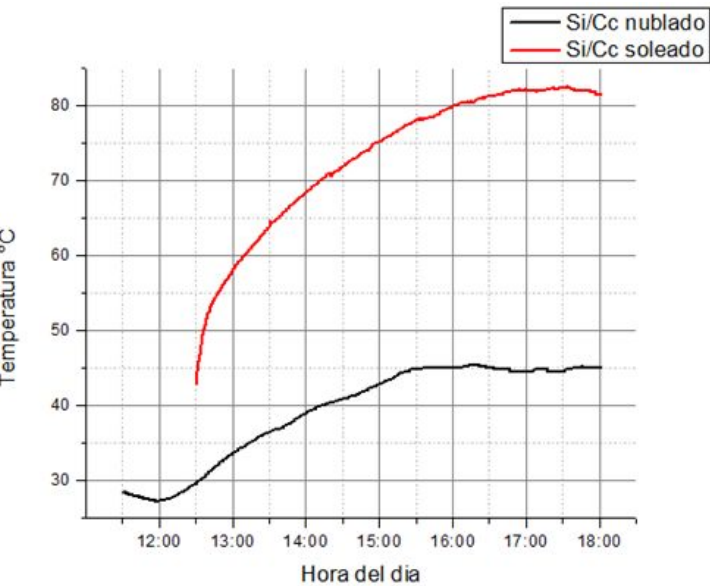


Figura 11. Comparación del incremento de temperatura conforme pasa el tiempo en el prototipo CSCA en dos días, uno soleado y otro nublado con una leve llovizna a las 12 PM

La curva de eficiencia para el concentrador muestra una eficiencia de 22%. La cual disminuye conforme el sistema va aumentando la temperatura del agua como se muestra en la Figura 12.

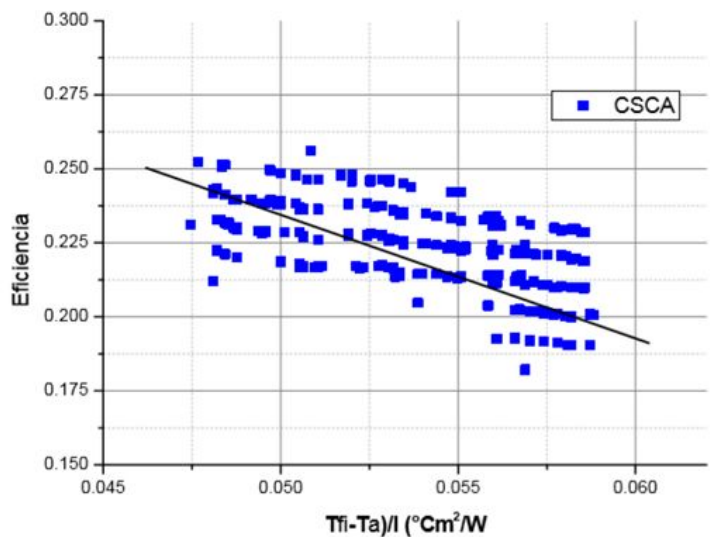
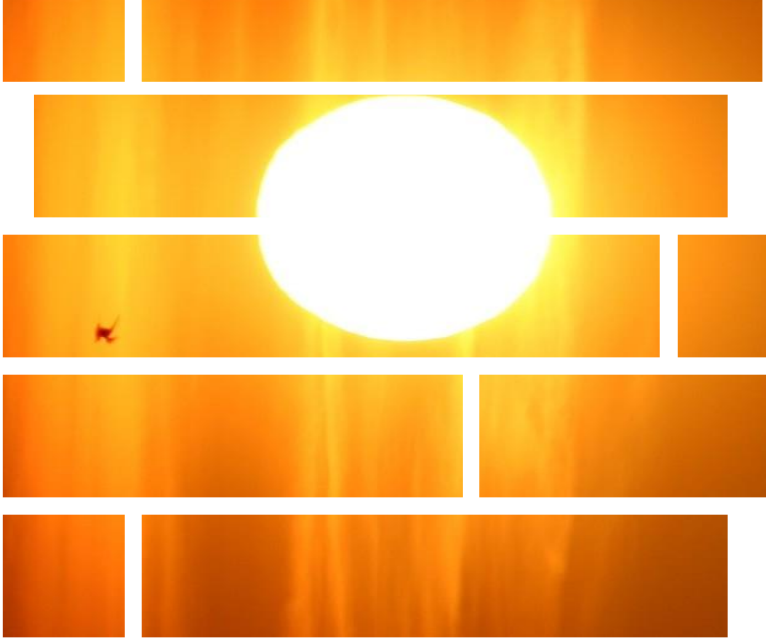


Figura 12. Eficiencia térmica del prototipo CSCA



## 4. Costos

Los consumos de manufactura muestran que el prototipo en la segunda etapa obtuvo un costo alrededor de \$7700 pesos mexicanos por los 6.34 m<sup>2</sup>, sin incluir el fluido térmico y la mano de obra. (Tabla 1). El fluido térmico fue etilenglicol.

TABLA 1. COSTOS DE MANUFACTURA DEL PROTOTIPO CSCA				
Material	Uso	Costo por unidad	cantidad	Costo
Lamina calibre 30	Concentradores y termotanque	\$300 m <sup>2</sup>	4.16 metros	\$1,248
Poliuretano	Concentradores	\$135 L	10 litros	\$1,350
Tubos evacuados	Tubos evacuados	\$200 c/u	8 unidades	\$1,600
Tuboplus 40 mm	Esqueleto de tuboplus	\$333 m	1.4 metros	\$466
TEE de tuboplus 40 mm	Esqueleto de tuboplus	\$31 c/u	8 unidades	\$248
Conexiones de Tuboplus	Esqueleto de tuboplus	Varios	Varios	\$200
Manguera como empaque exterior	Conexiones	\$400 m	1.28 metros	\$512
Manguera como empaque interior	Conexiones	\$300 m	0.48 metros	\$144
Manguera para altas temperaturas	Conexiones	\$350 m	0.5 metros	\$175
Tuboplus de 20 mm	Conexiones	\$15 m	3.3 metros	\$50
Conectores	Conexiones	Varios	Varios	\$100
Abrazaderas	Conexiones	\$13 c/u	32 unidades	\$416
Mylar	Conexiones	\$38 m <sup>2</sup>	1 metros	\$38
Rayos	Soporte	\$4 c/u	16 unidades	\$64
Riel	Soporte	\$50 m	3 metros	\$150
Bomba	Termotanque	\$1000 c/u	1 unidad	\$1000
Costo Total				\$7697

Tabla 1. Costos de manufactura del prototipo CSCA.



## 5. Conclusiones

Se obtuvo un buen rendimiento del prototipo CSCA gracias a su estructura cilíndrica asimétrica, las cuales fueron constantes, aun variando la inclinación o el seguimiento al sol que se le dieron en la primera etapa, o al incrementar o cambiarle el fluido térmico como en la segunda; por lo que se expuso que no es necesario tener un seguimiento del sol a cada hora del día, ni estar dependiendo de una inclinación especial para su instalación, con la ventaja de tener libertad en incrementar los módulos y que la eficiencia no se vea comprometida.

Por lo tanto, con su costo económico, el prototipo CSCA es viable su distribución y venta a una escala mayor y si se mantiene con un buen mantenimiento y uso adecuado, no existirán complicaciones en su uso en una casa hogar o empresa, teniendo un rápido ROI Retorno de Inversión de menos de 2 años en estos sistemas.

Para trabajo a futuro quedaría probar el prototipo con más variaciones en el fluido térmico y mejorar el proceso de manufactura de los espejos cilíndricos asimétricos y así lograr el salto desde una prueba piloto a nivel laboratorio hacia una instalación formal en una empresa o conjunto residencial.

El trabajo realizado en este proyecto se utilizó para desarrollar la propuesta del proyecto P66 "Concentradores solares asimétricos", financiado por el CEMIESOL.



## 6. Referencias

- [1] Huacruz Villamar J. M. (2016). Energías renovables en el IIE, punto de apoyo para la transición energética de México. Cuernavaca, México.
- [2] Análisis e comparativa entre fontes de geração elétrica segundo criterios socio ambientais e econômicos Marcos de Araújo Cesaretti-SantoAndré: Universidad de Federal do ABC, 2010.
- [3] José Ma. Fernández Salgado. (2009). Tecnología de las energías renovables. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa
- [4] F. M. I. De los Santos-García. (2015) Construction and testing of light weight and low-cost pneumatically inflated solar concentrators
- [5] ANSI/ASHRAE 93-1986 (RA 91). Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, Inc.; 1993
- [6] Nandwani, S. S. (2005). Energía solar. Conceptos básicos y su utilización. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- [7] Octavio García Valladares e Isaac Pilatowsky Figueroa. (2017). Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial.
- [8] Hinterberger, H., & Winston, R. (1966). Efficient light coupler for thres hold Čerenkov counters. Review of Scientific Instruments, 37(8), 1094-1095.
- [9] Kalogirou, S. (2004). ELSEVIER. Solar thermal collectors and applications, 235-253.
- [10] Almanza, R., Cajigal, E. and Barrientos, J. (1997) Actualización de los Mapas de Irradiación Global solar en la República Mexicana. Reportes de insolación de México. Southwest Technology Development Institute, NMSU, 1999.