

DISEÑO ÓPTICO DE UN COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO INCLINADO PARA GENERACIÓN DIRECTA DE VAPOR

Dario Panaroni¹², Mayra Mujica¹, Mercedes Abal Matos¹, Leonardo Corujo², Federico Cervini¹, Ana Castro Luna³, Luis Martorelli¹²

Resumen

La constante demanda energética y el agotamiento de las fuentes de combustibles tradicionales con la consecuente contaminación producida por la quema de los mismos nos lleva a buscar nuevas fuentes de energía. Una alternativa ya conocida es la energía solar que su carácter limpio e ilimitado la hace atractiva para la investigación de nuevas formas de su aprovechamiento. Diferentes sistemas solares térmicos se utilizan para la producción de electricidad, todos ellos concentran la energía solar incidente y la reflejan a un punto o una línea donde un receptor con un adecuado fluido de transferencia absorbe la energía térmica para luego conducirla a un intercambiador en el cual la transfiere al agua o al vapor que se utiliza para mover una turbina y producir electricidad. En el presente trabajo se realiza el modelado de un novedoso colector parabólico inclinado utilizando el software Tonatiuh Ray Trace. La salida del programa se analiza a continuación con Matlab, se leen los datos binarios y se realiza un análisis matemático del conjunto de impactos. Finalmente se propone un diseño de concentrador analizando sus mejoras de rendimiento.

Palabras Claves: *energía renovable, energía solar de concentración, colectores cilindroparabólicos*

1. Introducción

La demanda global de energía está en constante crecimiento, y se predice que será el doble para el año 2050 y el triple para el fin de siglo. [1]. Mientras que en el último siglo la economía mundial creció en gran medida por el fácil acceso a los combustibles fósiles y sus derivados, cuyo uso desmedido ha provocado a aumentos importantes de la contaminación ambiental y al calentamiento global, la disponibilidad de este recurso ha disminuido y se estima que estará agotado para finales del siglo XXI [2]. Una alternativa al uso de las energías convencionales son las renovables y entre ellas una de las más importantes es la energía solar. La energía del sol llega a la tierra como radiación con energía que abarca todo el espectro electromagnético desde el infrarrojo al ultravioleta. Esta energía puede ser capturada como calor en un colector de energía solar térmica o produciendo pares hueco electrón excitados en un semiconductor o un colorante cromóforo y así, ser usada para ya sea en la producción de electricidad o para ser convertida en combustible después de ser transferida a sistemas biológicos o moléculas químicas.

1- Laboratorio de Óptica, Calibración y Ensayo LOCE- Universidad Nacional de La Plata Argentina - lmoptica@yahoo.com.ar

2- El Centro de Investigación en Metrología y Calidad CEMECA – CIC. cemeca.solar@cic.gba.gob.ar

3- Energías Alternativas Tecnología y Desarrollo Sustentable EnAITecS, CITEMA Facultad Regional La Plata UTN - enaltecs@frlp.utn.edu.ar

La energía solar incidente en una superficie terrestre se manifiesta como radiación directa que es la que viene directamente del sol y radiación indirecta que está compuesta de la radiación difusa recibida debido a la dispersión de parte de la radiación del sol en la atmosfera y la radiación reflejada por la superficie terrestre. En conjunto todas conforman la radiación solar global [3].

Los colectores de energía solar térmica pueden ser de baja, media y alta temperatura. Los dos primeros consisten generalmente en placas planas usadas para calentar agua o aire para usos residenciales o comerciales. Los colectores de alta temperatura concentran la luz solar utilizando espejos o lentes y generalmente son empleados en la producción de energía eléctrica. Algunos sistemas de energía solar térmica de concentración son mucho más eficientes que la energía solar fotovoltaica para la producción de electricidad. [4]

Los concentradores solares colectan la luz solar de una gran área y la enfocan a una pequeña zona donde el calor es absorbido en un receptor. La conversión térmica solar puede reemplazar el suministro de calor desde combustibles fósiles o reacciones de fisión nuclear, que se emplea para generar el vapor de agua necesario para accionar una turbina eléctrica.

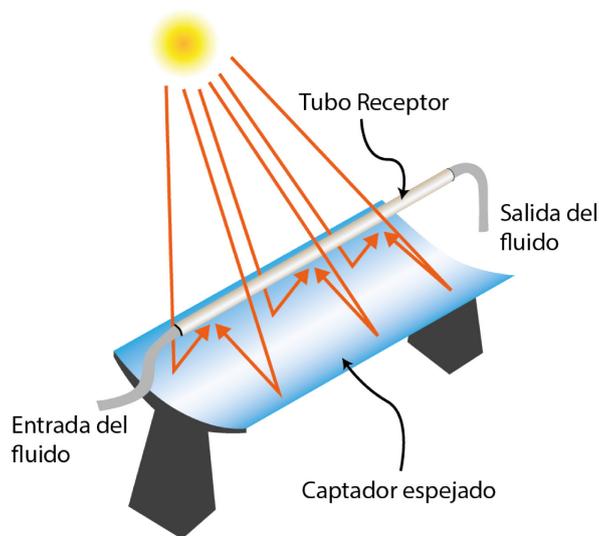


Figura 1. Esquema de un CCP con sus partes y funcionamiento.

De los fluidos de trabajo disponibles (aceite térmico, sales fundidas, etc), en este caso concreto, nuestro grupo analizó el uso de agua para la generación directa de vapor. En nuestro sistema el agua ingresa en forma líquida por un extremo del tubo y cambia a estado de vapor a medida que adquiere energía térmica. Al finalizar su recorrido por el receptor el agua se encuentra en forma de vapor saturado, pudiendo ser sobrecalentada en un concentrador aledaño. Este proceso puede utilizarse para la obtención de energía eléctrica al aplicar el vapor en una turbina Rankine, así como también en forma de calor de proceso aplicado a una infinidad de usos, como energización de maquinarias, pasteurización, esterilización, etc.

El presente trabajo analiza la optimización de los parámetros que aseguren la mayor eficiencia en la captación de la energía solar térmica de un Colector Cilíndrico

Parabólico (CCP) que consiste en una superficie reflectante (*captador*) con una geometría parabólica cilíndrica, que al alinear su normal con la posición solar concentra la radiación directa en un foco lineal. Esta energía lumínica concentrada es colectada en el *tubo receptor* y transmitida al *fluido de trabajo*, de elevada capacidad calorífica que la almacena como energía térmica para utilizar cuando se requiera [5].

2. Experimental

2.1 Particularidades del Concentrador Cilíndrico Parabólico Inclinado (CCPI)

Para la generación directa de vapor suelen utilizarse largas filas de CCP siguiendo el plano horizontal. En nuestro caso se propone utilizar un colector corto e inclinado con la latitud del lugar emplazado.

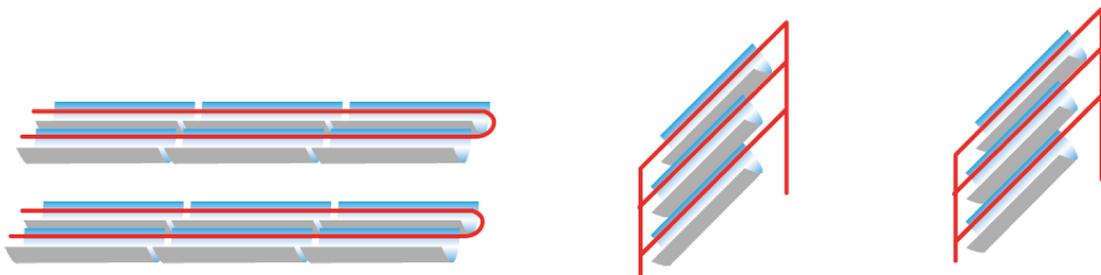


Figura 2. Comparación de ambos sistemas, a la izquierda se encuentra la disposición tradicional de los CCP, a la derecha la disposición propuesta para los CCPI.

Esa elección fue tomada en base a corregir dos problemáticas encontradas en la generación directa de vapor utilizando CCP: a) el efecto coseno y b) los flujos bifase dentro del receptor.

Puede definirse la eficiencia óptica pico (η_{op}) como el cociente entre la potencia que pasa a través de la apertura del colector (Potencia Solar P_s) sobre aquella entregada a la zona del receptor (Potencia del Colector P_c):

$$\eta_{op} = \frac{P_s}{P_c}$$

Este valor está asociada a la superficie reflectante, a los materiales de construcción del mismo, su especularidad, su geometría, etc, y será independiente de la alineación solar del colector.

El efecto coseno está dado por la falta de alineación entre la normal al plano de apertura del colector y la posición solar, generando así una disminución del flujo energético colectado. Puede definirse al ángulo de incidencia θ como el ángulo entre la normal y la posición solar. Se define la eficiencia óptica (η_o) como:

$$\eta_o = \eta_{op} \cdot \cos \theta$$

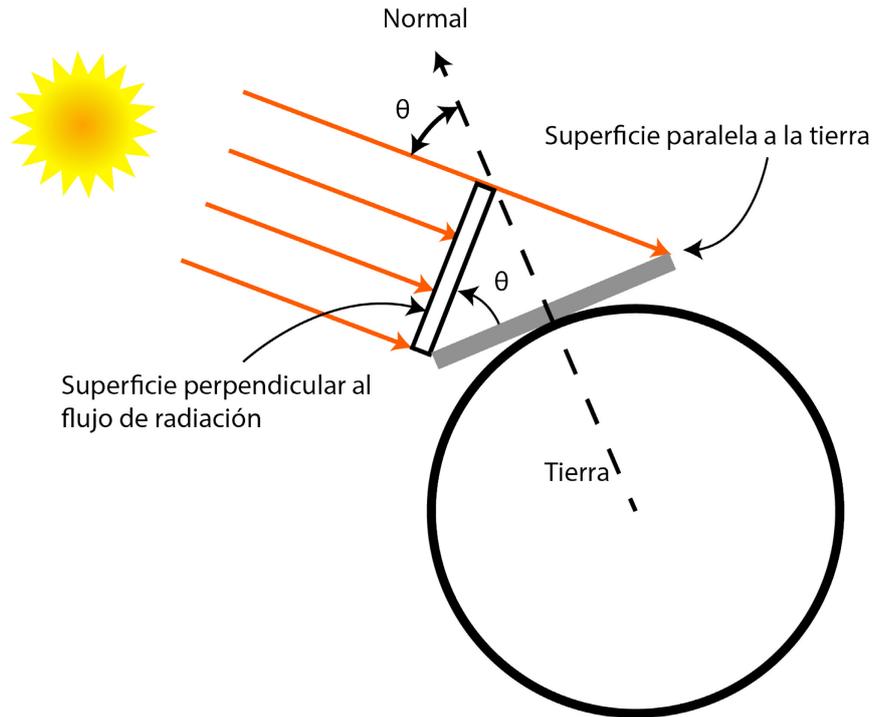


Figura 3. Se muestran dos superficies con flujos energéticos equivalentes, la primera tiene su vector normal alineado con el sol, mientras la segunda se encuentra tangente a la superficie terrestre, desalineado en un ángulo θ , nótese la diferencia de tamaño.

En el caso de los CCP el efecto coseno solamente es afectado por la altitud del ángulo solar, puesto que estos concentradores siguen en azimut al astro. Este efecto es máximo al amanecer, cuando el ángulo de incidencia es muy cercano a 0° y la η_o es prácticamente nula. Al correr las horas, este ángulo aumenta y también lo hace la eficiencia óptica hasta llegar al medio día solar cuando alcanza su máximo diario, para luego comenzar a decrecer hasta el ocaso y volver a la situación inicial. Este máximo diario varía a lo largo de las estaciones siendo que, para regiones australes como la Provincia de Buenos Aires, el punto máximo se alcanza en el solsticio de verano, pero sin llegar a igualar el valor de η_{op} debido a que el sol nunca se posiciona sobre el cenit.

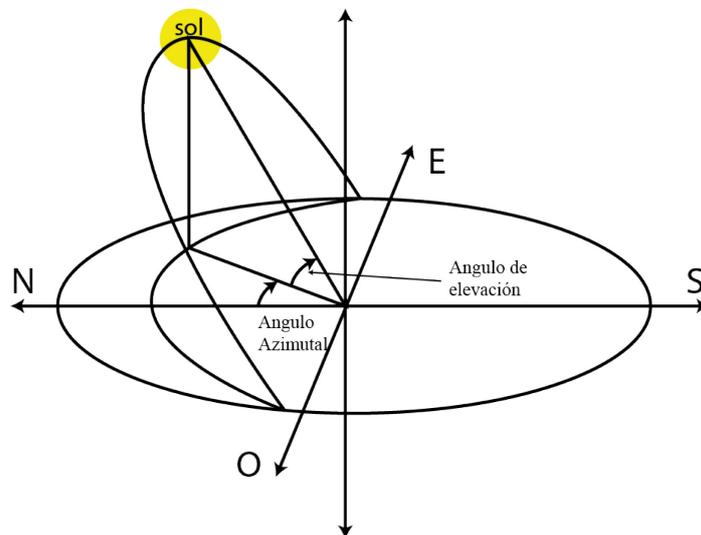


Figura 4. Esquema donde se indican el ángulo azimutal, aquel conformado por la posición solar y el norte geográfico, y el ángulo de elevación representado por aquel que se encuentra entre la línea del horizonte y el astro.

Para poder disminuir este efecto se decidió inclinar los colectores en función de la latitud local. En el presente trabajo se utilizó 35° (Provincia de Buenos Aires). Al igual que ocurre con los CCP, en los CCPI el efecto coseno máximo ocurre al amanecer, con una η_o cercana a 70% de la eficiencia óptica pico, luego este valor irá en aumento pudiendo llegar igualarse con ésta según la época del año y el momento del día.

El segundo factor negativo para los CCP ocurre cuando se genera un cambio de fase en el interior del tubo receptor debido a la evaporación del agua, un mal intercambio térmico entre las paredes del cilindro caliente y el vapor, sobre todo en las horas apartadas del medio día cuando la radiación reflejada incide sobre las paredes laterales del receptor [6]. En el caso particular del CCPI, al estar el tubo inclinado, el flujo se torna monofásico puesto que las burbujas no se acumularán en la parte superior de la luz de la tubería, si no que emigrarán hacia la parte superior del sistema, dónde se acumulará conjuntamente con el resto del vapor producido.

A pesar de las ventajas de la geometría que se estudia, también se genera un efecto negativo que ha de corregirse. En el CCP existe una disminución de eficiencia por la denominada pérdida por final de colector [4]. Esto ocurre porque la radiación que incide al final del colector es reflejada fuera de la superficie del receptor, al ser los colectores tan largos, esta pérdida es pequeña y no conlleva demasiada importancia. En el caso de los CCPI este efecto es de gran relevancia debido a la escasa longitud del mismo. Es por esto que el presente trabajo, utilizando un modelado computacional, propone una modificación del receptor para minimizar este efecto.

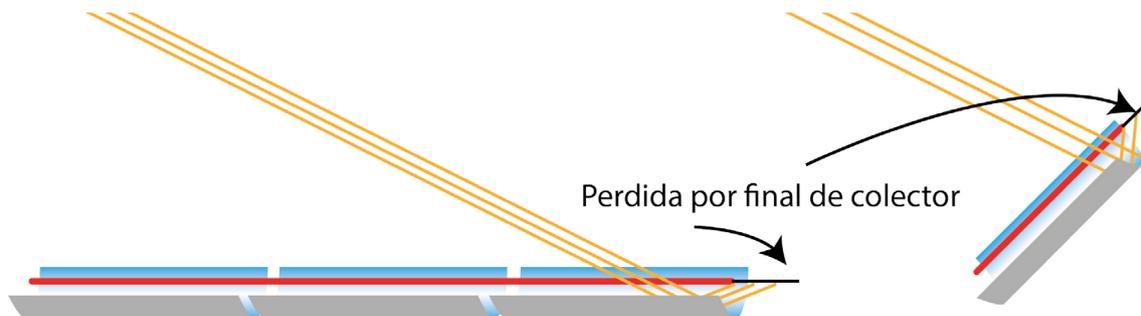


Figura 5. Comparativamente las pérdidas por final de colector en CCP y CCPI, en el primer caso a pesar de ser cuantitativamente mayores se observa que éstas son porcentualmente mucho menores que las del CCPI.

2.2 Metodología

Se utiliza el software Tonatiuh Raytrace para la simulación óptica del sistema, el cual utiliza el método Monte Carlo para modelar la marcha de un gran conjunto de partículas que hacen las veces de fotones emitidos por una fuente lumínica, para nuestro caso el sol. Este programa nos permite elegir los parámetros del concentrador y su orientación espacial. [7]

En nuestro diseño tenemos un concentrador de *2,40 metros* de largo con una apertura de *3 metros*. La focal fue situada en *0,889 metros* por considerarse esta en un valor óptimo para los contrapesos de movimiento. Finalmente, el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal es de 35° , el mismo valor de la latitud del lugar de emplazamiento (Buenos Aires).

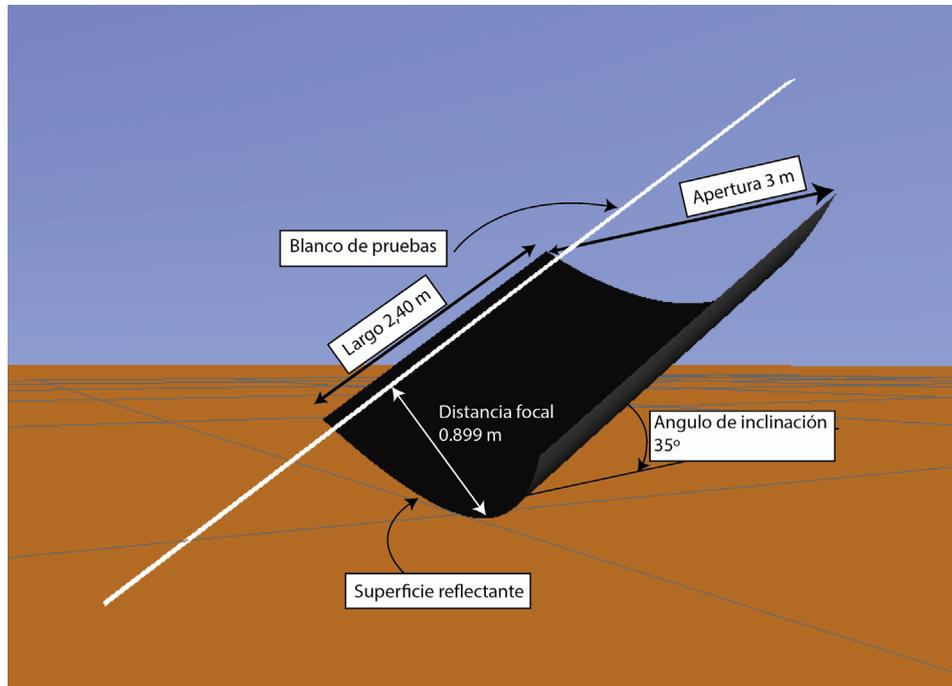


Figura 6. Modelo utilizado en Tonatiuh con algunas indicaciones como referencia.

Para la experiencia se ubica un blanco en la zona focal del concentrador. Este blanco consistirá en una placa rectangular de *6 metros* de largo por *0.1 metros* de ancho que está centrada con respecto al colector y sigue con su segmento más largo la línea focal.

Se modela con 50 millones de fotones que impactan sobre la superficie del colector, reflejándose, para luego colisionar en el blanco. El software genera entonces un archivo binario indicando las coordenadas de cada colisión.

Los datos en crudo son luego procesados mediante la utilización de diversos algoritmos programados en Matlab para su análisis. En primera instancia se construye una cuadrícula de 500 por 500 en el blanco. Esta malla se utiliza para contar la cantidad de fotones que han impactado en cada celda, pudiendo obtenerse así el valor de concentración local.

Un último algoritmo se encarga de filtrar los datos de forma tal que solo deje visible el área con el 90% de la energía para delimitar con precisión la zona focal y así poder mensurarla correctamente.

Para el diseño del captador se eligieron 4 posiciones solares en las que se muestra el comportamiento de la marcha de rayos a lo largo del año para la locación

de 35° *latitud sur*: El solsticio de verano con una elevación de $78,43^\circ$, el equinoccio de primavera u otoño con una elevación de 55° , el solsticio de invierno con una elevación de 10° para aproximadamente una hora posterior al amanecer o anterior al atardecer.



Figura 7. Diferencia entre las distintas posiciones solares utilizadas para el diseño del CCPI

Las posiciones del solsticio de verano y los 10° de elevación marcan los puntos extremos en el recorrido solar con el que funciona el colector. Los puntos intermedios hacen referencia a la amplitud variable en los otros 3 períodos del año y serán usados para evaluar el efecto coseno y el enfoque producido por el ángulo de incidencia.

3. Resultados y discusión

Se analizaron las 4 zonas focales para los momentos descritos anteriormente obteniendo los siguientes resultados:

- **Solsticio de verano:** la imagen focal se extiende en 54 cm por debajo del colector.
- **Equinoccios:** La imagen focal se extiende desde el inicio del colector hasta el final del colector.
- **Solsticio de invierno:** La imagen focal se extiende en 54 cm por encima del colector.
- **Elevación 10° :** La imagen focal se extiende en 1.32 cm por encima del colector, pero decide considerarse sólo la zona focal fuerte, marcada en la figura, para no extender en demasía la tubería receptora. Se considera entonces que la imagen focal fuerte se extiende en 96cm por encima del colector.

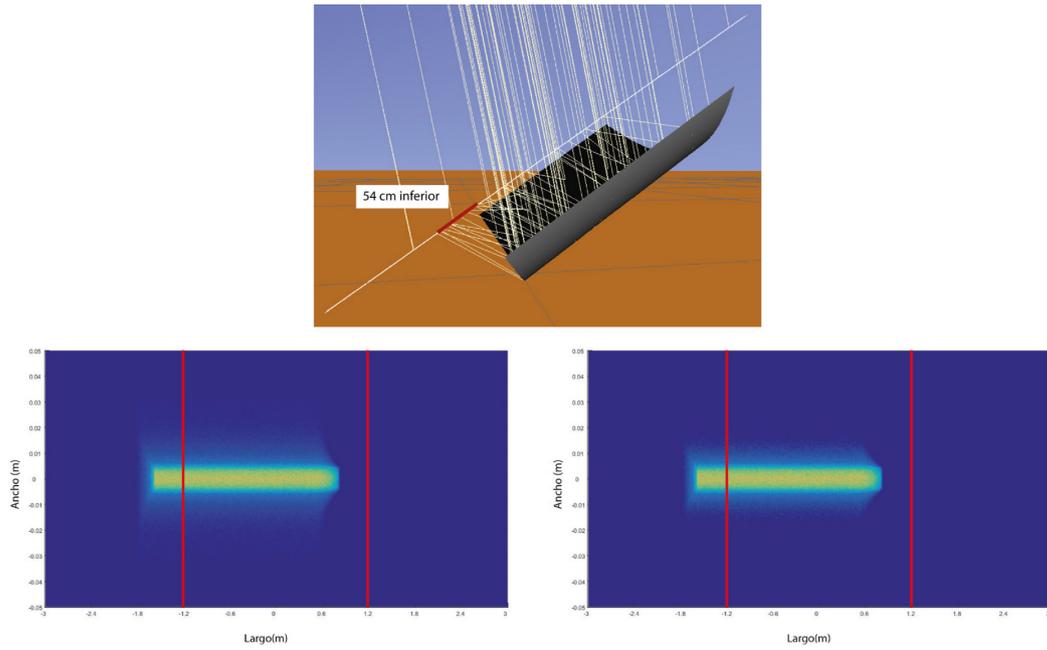


Figura 8. *Superior:* Marcha de rayos para el solsticio de verano dónde se observa que los rayos reflejados impactan en los 54 cm inferiores del blanco. *Inferior:* Imagen focal total a la izquierda y donde se ubica el 90% de la energía a la derecha. En rojo se señalan los límites del colector.

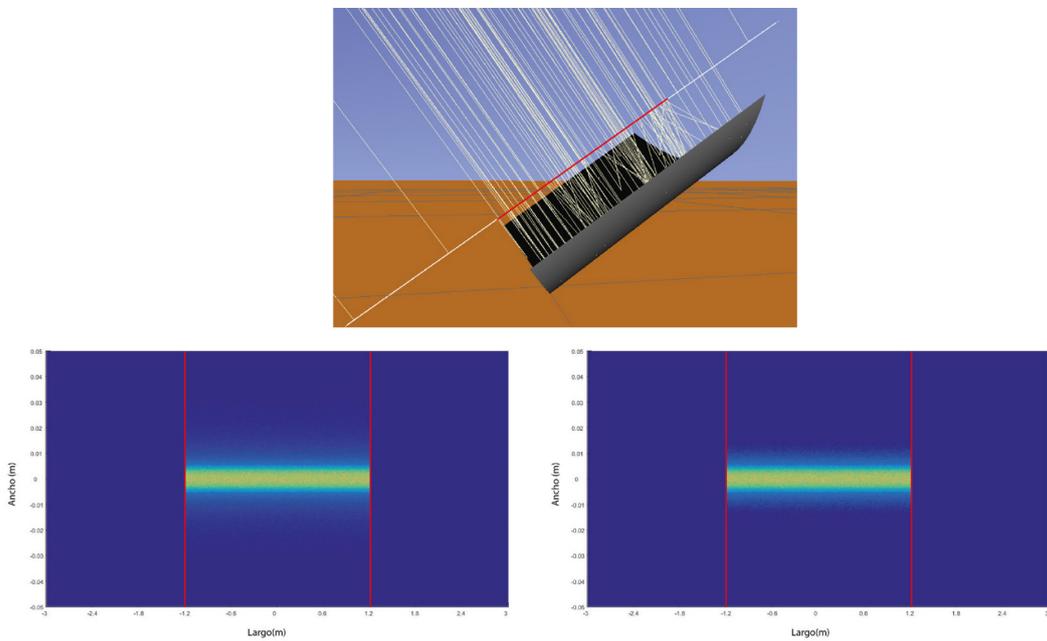


Figura 9. *Superior:* Marcha de rayos para los equinoccios. Los rayos impactan sin sobresalir del colector. *Inferior:* Idem Figura 8.

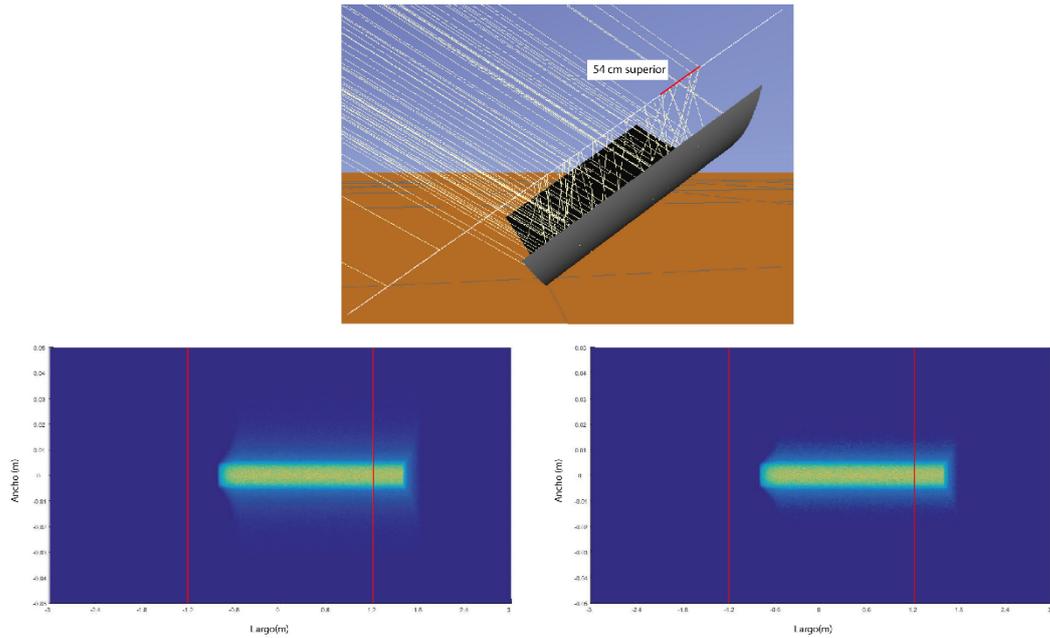


Figura 10. *Superior:* Marcha de rayos para el solsticio de invierno. Los rayos impactan sobresaliendo del colector 54 cm. *Inferior:* Idem Figura 8.

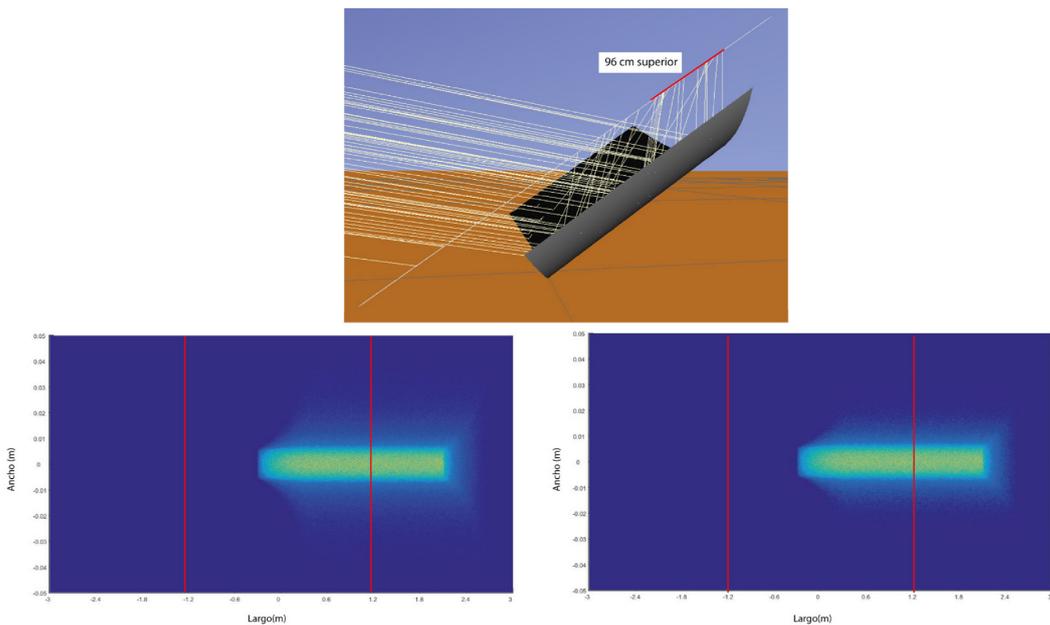


Figura 11. *Superior:* Marcha de rayos para 10° de elevación. Los rayos impactan sobresaliendo del colector 96 cm. *Inferior:* Idem Figura 8.

Según lo expuesto hasta ahora, el receptor deberá contar con una longitud de 3,9 m, comenzando a 0,54 m del comienzo del colector (borde inferior) y finalizando 0,96 m por encima del final del colector. El diámetro teórico del tubo obtenido es de 4,5 cm para el caso más extremo. De esta forma logran eliminarse casi completamente las pérdidas por final de colector.

Además de estudiarse el largo de las zonas focales para cada punto de revisión también se estudia el ancho de la misma obteniéndose para los equinoccios 2,8 cm de ancho, para los solsticios 3,1 cm y para 10° de elevación 4,5 cm. Esto datos nos indica también que, como efecto positivo de la inclinación del colector, al disminuir el ángulo de incidencia la franja focal también lo hace permitiendo que la geometría del receptor sea más compacta y reduciendo pérdidas térmicas por radiación y convección.

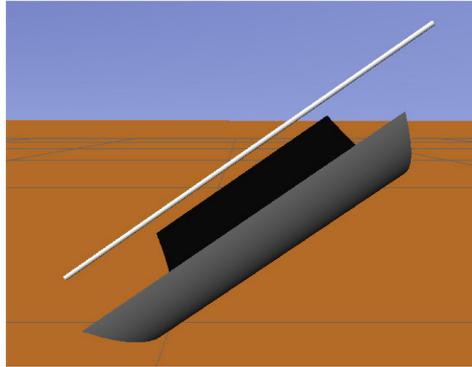


Figura 12. Composición final con el tubo receptor de 3,90 metros.

Las pérdidas de eficiencia debido al efecto coseno pueden cuantificarse según la época del año para ambos sistemas: Para el CCPI, las oscilaciones varían entre los valores de 30% al 8% para el solsticio de invierno, de 30% a 0% para el solsticio de verano y equinoccios, en comparación con un sistema CCP tradicional que cuenta con una oscilación del 83% a 48% para el invierno, de 83% a 18% para los equinoccios y de 83% a 2% para el solsticio de verano.

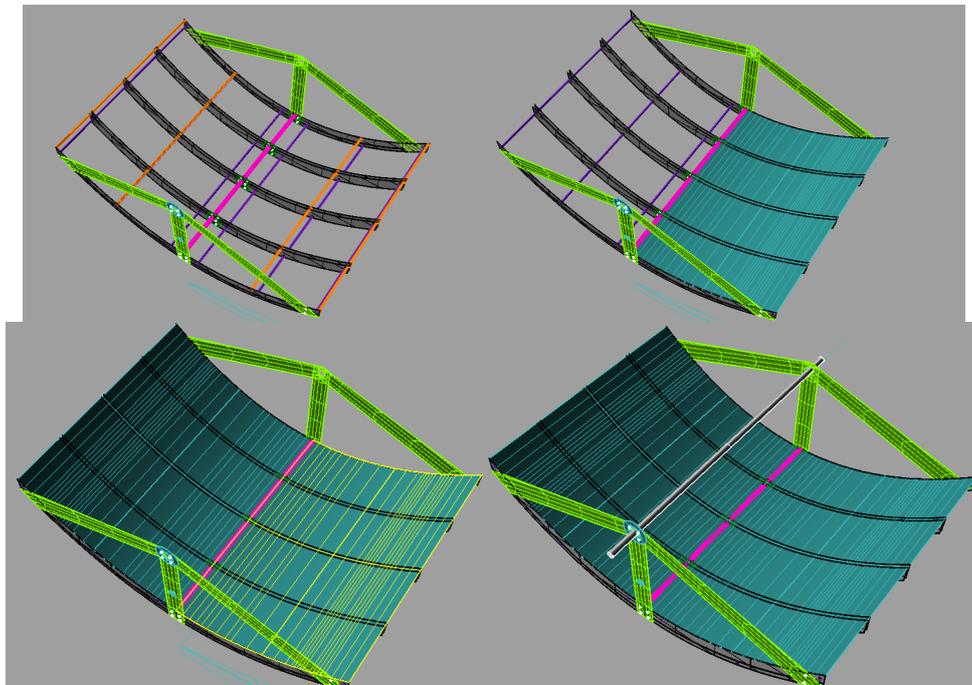


Figura 13. Esquema de la estructura de soporte del colector.

4. Conclusiones

Lo expuesto hasta ahora nos muestra las ventajas que presenta el CCPI sobre los sistemas tradicionales CCP: Una mejora considerable en la eficiencia óptica a lo largo del año y del día debido a una reducción del efecto coseno.

Por otra parte, se mejora en la transferencia térmica entre el receptor y el fluido de trabajo a causa no existir un fluido bifase, esto debido a la imposibilidad de la acumulación de vapor en la luz del tubo que emigran constantemente hacia el sector superior del sistema.

Un beneficio adicional se debe a una reducción del ancho de la zona focal, que permite receptores más compactos, con menores pérdidas térmicas.

Como desventajas, el sistema presenta la imposibilidad de utilizar colectores de gran largo debido al exceso de altura que ocasiona la inclinación, lo que limita esta modalidad para aplicaciones de baja y mediana escala. Adicionalmente hay un incremento en las pérdidas térmicas del receptor al tener un largo mayor que los CCP convencionales del mismo tamaño (para el CCPI un 66% más largo), pero puede reducirse cubriendo con aislación térmica según la época del año en la que se esté trabajando.

Se concluye que la utilización de sistemas CCPI inclinados resulta prometedora para la aplicación en latitudes por debajo de los trópicos (23°) permitiendo un mejor aprovechamiento del recurso solar sobretodo en aplicaciones de mediana y baja escala, tanto para la obtención de calor de proceso como para la generación de energía eléctrica.

Referencias

- [1] Nakicenovic, N., & Jefferson, M. (1995). Global energy perspectives to 2050 and beyond.
- [2] Höök, M., & Tang, X. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy*, 52, 797-809.
- [3] E Michaelides Alternative Energy Sources ISSN1265 3529 DOI 10.1007/978-3-642-20951-2
- [4] Gallegos, H. G. (2004). Notas sobre radiación solar. *Universidad Nacional de Lujan—Departamentos de Ciencias Básicas*.
- [5] Lovegrove, K., & Stein, W. (Eds.). (2012). *Concentrating solar power technology: principles, developments and applications*. Elsevier.
- [6] Zarza Moya, E. (2003). Generación directa de vapor con colectores solares cilindro parabólicos Proyecto Direct Solar Steam (DISS).
- [7] Blanco, M. J., Amieva, J. M., & Mancilla, A. (2005). The Tonatiuh Software Development Project: An open source approach to the simulation of solar concentrating systems. *Proceedings of the IMEC2005, Orlando, FL*, 157-164.