

Simulación de un Concentrador Solar a Partir de la Restauración de un Disco Parabólico

Moisés Sánchez Espejel*, Vicente Flores Lara

Departamento Metal Mecánica, Instituto Tecnológico Nacional de México, Campus Apizaco, Av. Instituto Tecnológico S/N, Apizaco 90300, Mexico.

Fecha de recepción: 16 de junio de 2020 - Fecha de aceptación: 1 de enero de 2021

Resumen

Este artículo muestra la simulación de un sistema de concentración solar partiendo de la restauración de un disco parabólico de 1.80 m de diámetro y 0.675 m de distancia focal, el cual se encuentra en el Instituto Tecnológico de Apizaco (ITA), Tlaxcala, México. En este estudio se construyó una base para el disco parabólico y se recubrió el colector con aluminio de alta reflectividad (Prominox ASTM 240), posteriormente el sistema se simuló en el software de trazado de rayos “Tonatiuh” con la finalidad de analizar la distribución del flujo de la radiación en el punto focal del sistema y con la imagen focal obtener de primera instancia las dimensiones del diámetro del receptor. Para un error de 4.39 mrad se obtuvo una potencia máxima de 1829.03 W con un radio del receptor de 0.06 m. Con el error de 6.7 mrad se obtuvo una potencia máxima de 1818.52 W que corresponde al radio del receptor de 0.075 m. Se observó que a medida que el radio del receptor es mayor, la potencia aumenta y el desbordamiento disminuye, pero al tener un receptor de mayores dimensiones el factor de sombra se eleva, el cual afecta el desempeño óptico del sistema.

Palabras clave: Concentrador solar, disco parabólico, energía termosolar, simulación, trazado de rayos.

Simulation of a Solar Concentrator from the Restoration of a Parabolic Dish

Abstract

This article presents the simulation of a solar concentration system based on the restoration of a parabolic disk with a diameter of 1.80 m and a focal length of 0.675 m, which is located at the Technological Institute of Apizaco, Tlaxcala, Mexico. For this study, a base for the parabolic disk was built and the collector was coated with high reflectivity aluminum (Prominox ASTM 240), later the system was simulated in “Tonatiuh”, a ray tracing software, to analyze the distribution of radiation flux at the focal point of the system and with the focal image obtain the dimensions of the radius of the receiver as a first instance. For an error of 4.39 mrad, a maximum power of 1829.03 W was obtained with a receiver radius of 0.06 m. And for an error of 6.7 mrad, a maximum power of 1818.52 W was obtained with a receiver radius of 0.075 m. It concludes that as the radius of the receiver is greater, the power increases and the spillage decreases, but having a larger receiver, the shadow factor rises, which affects the optical performance of the system.

Keywords: Solar concentrator, parabolic disk, solar thermal energy, simulation, raytracing.

*moises.1993sa@hotmail.com

1. Introducción

La quema de combustibles fósiles es una de las principales causas del calentamiento global (Abas *et al.*, 2015), por lo que muchas organizaciones se han enfocado en el uso de las energías renovables. En el caso de los gobiernos, alrededor del mundo se promueve la generación de energía limpia, por ejemplo, existen programas de financiamiento de préstamos para proyectos de energía solar en industrias y domicilios particulares, como es el caso de Estados Unidos, India y China (Ahmed *et al.*, 2019).

El aprovechamiento de la energía solar en México se ha desarrollado principalmente en: arquitectura bioclimática, calentamiento de agua para sectores comerciales o residenciales y el uso de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en diferentes estados de la república (Lentz *et al.*, 2012). México se localiza geográficamente entre los 14° y 33° de latitud septentrional, la cual resulta ser una característica ideal para el aprovechamiento de la energía solar, pues la irradiación global media diaria en el territorio nacional, es de alrededor de 5.5 kWh/m²

(SENER, 2012). A pesar de esto, se considera un país subdesarrollado en términos de la explotación de la energía solar.

Dentro de las tecnologías empleadas para el aprovechamiento de la energía solar, se encuentran los concentradores solares (Muhammad-Sukki *et al.*, 2010), los cuales son dispositivos que se encargan de convertir la energía solar en térmica, por medio de la captación de los rayos del sol con ayuda de materiales de alta reflectividad, de esta manera se eleva la temperatura de un fluido y se genera vapor para impulsar una turbina y obtener energía eléctrica.

Los sistemas de disco parabólico son concentradores solares que generalmente consisten en un colector en forma de plato con geometría parabólica de revolución, un receptor situado en el punto focal del plato y un sistema de seguimiento solar (Reddy *et al.*, 2017), como se muestra en la figura 1. En este tipo de sistemas normalmente se utiliza un receptor de cavidad debido a su función de maximizar la absorción del flujo concentrado y minimizar las pérdidas por radiación y convección (Yosra *et al.*, 2013).

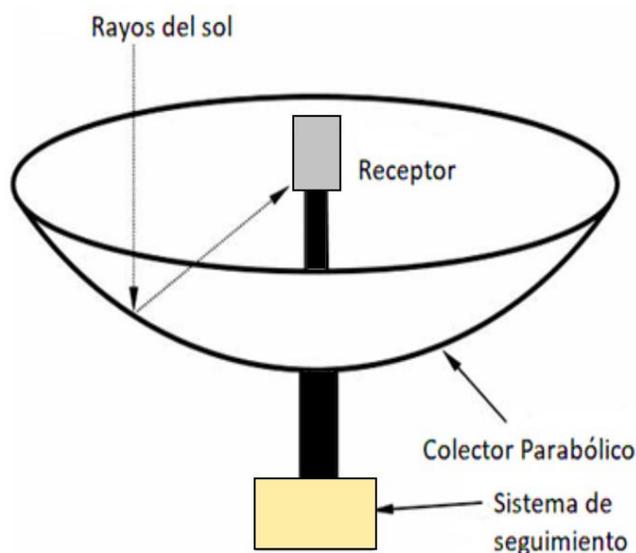


Figura 1. Esquema de un concentrador de disco parabólico y sus componentes.

Para el diseño de los sistemas de concentración solar y su análisis óptico, se utilizan softwares como Tonatiuh o SolTrace, los cuales se basan en el método de trazado de rayos de Monte-Carlo (MCRT). En estos programas el usuario puede crear el concentrador solar de acuerdo con la geometría deseada, así como modificar sus propiedades ópticas, la inclinación, forma solar, número de rayos del sol, entre otros factores (National Renewable Energy Laboratory, 2020).

Las simulaciones de trazado de rayos son muy efectivas para el diseño y la optimización de parámetros de los sistemas de concentración solar, ya que en ellas se pueden analizar las alteraciones en los sistemas y evaluarlas fácilmente. Los softwares de trazado de rayos se han utilizado para simular el fenómeno de recepción y reflexión en las superficies, incluyendo la forma solar, inclinación, propiedades ópticas, número de rayos, entre otros factores.

Diversos autores han realizado simulaciones de trazado de rayos para sistemas de concentración solar con el objetivo de predecir su comportamiento y mejorar su rendimiento, tal es el caso de Supa *et al.* (2014), quienes realizaron un estudio de trazado de rayos para observar cómo afecta el ángulo de borde de un concentrador de disco parabólico en su imagen focal. Pavlovic y Stefanovic (2015) simularon un disco parabólico para analizar los aspectos geométricos de su imagen focal, posteriormente obtuvieron el flujo de la irradiancia lo que les permitió establecer los parámetros de diseño de su receptor. Terrón *et al.* (2018) efectuaron un análisis de un CPC, mediante una simulación del sistema, observaron la interacción de los rayos del Sol con el concentrador y obtuvieron la energía disponible en el receptor en un tiempo determinado. Pavlovic *et al.* (2014) examinaron el flujo en el receptor de un concentrador de disco parabólico mediante un análisis óptico de trazado de rayos para el

diseño de un sistema de bajo costo para procesos térmicos de media temperatura. Rodríguez *et al.* (2014) utilizaron el trazado de rayos para diseñar un colector solar térmico que permita generar energía uniformemente durante el año.

En este trabajo se busca evaluar la capacidad de concentración y la distribución geométrica de la energía concentrada en el receptor de un sistema de disco parabólico de 1.80 m de diámetro mediante las simulaciones de trazado de rayos que nos demuestren como los errores ópticos y de seguimiento influyen en el rendimiento del concentrador, con el propósito de conocer la potencia y las dimensiones del receptor que mejor aprovechen la energía solar. Posteriormente con ayuda de los resultados de este trabajo, realizar una propuesta de un receptor de cavidad y de un sistema de seguimiento solar, que en conjunto formen un concentrador solar de disco parabólico funcional para su estudio e investigación en el ITA.

2. Marco Teórico

2.1 Método de Trazado de rayos de Monte-Carlo

Los softwares que se basan en el método MCRT utilizan los principios de la geometría óptica, así como el uso de cálculos estadísticos para la simulación de los sistemas de concentración solar, generando rayos a partir de una fuente simulada, permitiendo observar la interacción de los rayos en las superficies. Este tipo de programas son muy útiles para el diseño y análisis de los concentradores solares (Giovinazzo *et al.*, 2014).

El código de MCRT trabaja con un número específico de rayos, cada uno se traza a través de un sistema definido, mientras se va encontrando varias interacciones ópticas. Algunas de estas interacciones son de naturaleza probabilística y otras son deterministas. Tal código tiene la ventaja de

replicar la interacción de fotones reales y, por lo tanto, puede proporcionar resultados precisos para sistemas complejos que no se pueden modelar de otra manera. La precisión aumenta con el número de rayos trazados, pero un mayor número de rayos significa más tiempo de procesamiento (Wendelin *et al.*, 2013).

El método de MCRT es un proceso de dos etapas. De acuerdo con Mahan (2019), en la primera etapa se estima el factor de distribución de la radiación (D_{ij}), y en la segunda etapa se calcula la multiplicación de D_{ij} por un vector, cuyos componentes son la fuente de fuerza de las superficies que forman un recinto. Los elementos individuales del factor de distribución se pueden interpretar como la sensibilidad de la potencia absorbida por una superficie j a la potencia emitida por la superficie i , es decir:

$$D_{ij} \equiv \partial Q_{ij} / \partial Q_i \quad (1)$$

Donde Q_{ij} es la potencia total en watts emitida por una superficie i que es absorbida en una superficie j , Q_i es la potencia total emitida por la superficie i . Si Q_i es la potencia total emitida desde la superficie i , es una variable conocida y el factor de distribución Q_{ij} está disponible para cualquier combinación de dos superficies i y j , entonces el calor absorbido por la superficie j es (Mahan, 2019):

$$Q_j = \sum_{i=1}^n Q_{ij} \quad 1 \leq j \leq n \quad (2)$$

Donde n es el número total de superficies.

Para el cálculo del factor de distribución Q_{ij} se emplea la siguiente ecuación:

$$Q_{ij} = Q_i D_{ij} \quad (3)$$

2.2 Parámetros ópticos-geométricos

Los concentradores solares tienen propiedades ópticas que pueden depender de la geometría del sistema. Duffie y Beckman (2013) calcularon la radiación absorbida por unidad del área de apertura que no está sombreada en un concentrador solar, empleando la siguiente ecuación:

$$S = I_b \rho \tau \alpha K_{\tau\alpha} \quad (4)$$

Donde: I_b es la radiación incidente efectiva, ρ es la reflectancia del concentrador, τ es la transmitancia del colector, α es la absorptancia y $K_{\tau\alpha}$ es el ángulo de incidencia (Duffie y Beckman, 2013).

Una parábola se define con la ecuación (5) en términos del sistema de coordenadas cartesianas.

$$y^2 = 4fx \quad (5)$$

La figura 2 muestra las dimensiones principales de un concentrador parabólico, en donde ϕ_r es el ángulo de borde, f es la distancia focal, a es diámetro de apertura de la parábola y r_r es el radio del espejo.

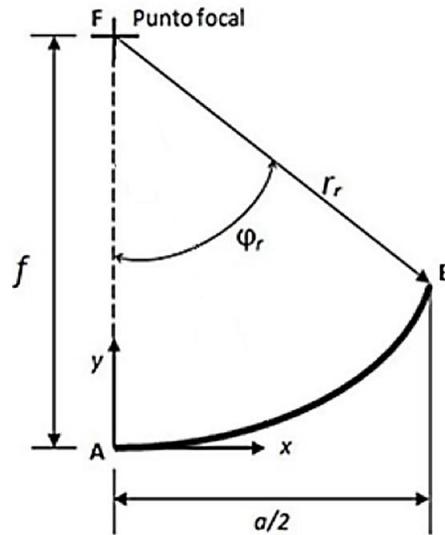


Figura 2. Dimensiones principales de un concentrador parabólico (Duffie y Beckman, 2013)

La imagen de un concentrador, de acuerdo con Duffie y Beckman (2013), se puede definir como la amplitud de la radiación que es reflejada por el colector. En un disco parabólico imperfecto se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{2r_r \sin\left(0.267 + \frac{\delta}{2}\right)}{\cos(\phi_r + 0.267 + \delta/2)} \quad (6)$$

En donde δ es el ángulo de dispersión, el cual es una medida del error angular en la superficie del concentrador. Este valor puede ser obtenido mediante medidas de distribución de flujo con el método de MCRT (Duffie y Beckman, 2013).

En un concentrador de disco parabólico existen diferentes tipos de errores ópticos que afectan la imagen producida en la superficie del receptor. Un error inevitable es causado por la distribución angular no uniforme de los rayos del sol (σ_{sol}), normalmente tiene un valor de 2.3 mrad. Otros errores son el error de pendiente del concentrador ($\sigma_{pendiente}$),

típicamente entre 2–3 mrad, la especularidad ($\sigma_{especularidad}$), generalmente entre 0.5–1 mrad, y el error de puntería ($\sigma_{puntería}$), lo que significa que el receptor no está colocado exactamente en el punto focal, su valor típico es de 2 mrad. Con la ecuación (7) se calcula el error óptico total (Dincer y Zamfirescu, 2014)

$$\sigma^2 = \sigma_{sol}^2 + \sigma_{pendiente}^2 + \sigma_{especularidad}^2 + \sigma_{puntería}^2 \quad (7)$$

De acuerdo con Stine y Greyer (2001), un valor estándar para el error en los sistemas de disco parabólico es de 6.7 mrad considerando los errores ópticos y también los errores producidos por el sistema de seguimiento, los sensores, la estructura y el alineamiento.

3. Metodología

3.1 Restauración del disco parabólico

El Instituto Tecnológico de Apizaco cuenta una antena parabólica modelo S-180-A-U fabricada

por la empresa “antenas de México”, con los parámetros principales que se muestran en la tabla 1.

Para este estudio solo se disponía de un disco parabólico, por lo que fue necesario la construcción de una base que fuera capaz de mover el concentrador sobre 2 de sus ejes. Se

utilizó PTR, placas y tubos de acero para la construcción de la base del disco y se usaron chumaceras de piso, así como de pared para que el sistema pudiera tener movimiento sobre sus 2 ejes. El recubrimiento del disco fue hecho con aluminio de alta reflectividad (Prominox ASTM 240), el cual tiene un valor de 0.85 de reflectividad. En la figura 3 se muestra el disco montado en la base y recubierto con el material reflejante.

Tabla 1. Parámetros del disco parabólico.

PARÁMETROS	VALORES
Diámetro de la antena	1.80 m
Relación f/d	0.375 m
Distancia focal	0.675 m
Tipo de óptica	Foco primario
Material de la antena	Lámina calibre 20
Numero de pétalos	6
Peso	43 kg



Figura 3. Concentrador de disco parabólico, colocado en su base y recubierto con aluminio de alta reflectividad.

3.2 Simulación del sistema

La simulación se llevó a cabo empleando el software Tonatiuh, con el fin de analizar la distribución del flujo de la radiación en el punto focal del sistema y con la imagen focal obtener de primera instancia el diámetro del receptor. Se estableció un sistema óptico, el cual está compuesto de tres elementos: Sol, concentrador y receptor.

De acuerdo con los datos proporcionados por el Sistema Meteorológico Nacional (2020), para el estado de Tlaxcala, en el mes de mayo de 2020 se tuvo un promedio aproximado de 850 W/m^2 de radiación solar entre las 16:00 y las 17:00 horas. Se eligió la elevación de 90° , ya que se considera que el concentrador contará con un sistema de seguimiento solar, el cual buscará que los rayos incidan perpendicularmente en la superficie del disco. Se utilizó el valor de 0.85 para la reflectividad, la cual corresponde al material Prominox ASTM 240.

Tonatiuh permite elegir dos formas solares: Pillbox y Buie, para este análisis se eligió la distribución Buie, ya que es más cercana a la forma real del sol. Considerando que en este caso se está analizando un disco restaurado, el cual no es perfecto, se consideran los valores máximos para los errores ópticos previamente mencionados, resultando en un error total de $\sigma = 4.39 \text{ mrad}$. Los errores del sistema de seguimiento no serán considerados, ya que en este documento únicamente se está analizando el disco parabólico y su receptor. Los parámetros principales de entrada para realizar la simulación se muestran en la tabla 2.

El disco parabólico se caracterizó, tomando en cuenta sus propiedades ópticas y dimensiones. El radio del receptor comenzó con un valor aleatorio y posteriormente se fue variando para analizar el comportamiento del flujo. Un trazado de 1000 rayos fue necesario para comprobar que los rayos llegaran a su objetivo (figura 4).

Tabla 2. Parámetros de entrada para la simulación.

SOL	
Forma solar	Buie
DNI	850 W/m^2
Azimut solar	0°
Elevación	90°
Número de rayos	7500000
CONCENTRADOR	
Distancia focal	0.675 m
Radio exterior	0.9 m
Radio interior	0 m
Reflectividad	0.85
Error óptico	4.39 mrad
RECEPTOR	
Radio	0.025 m

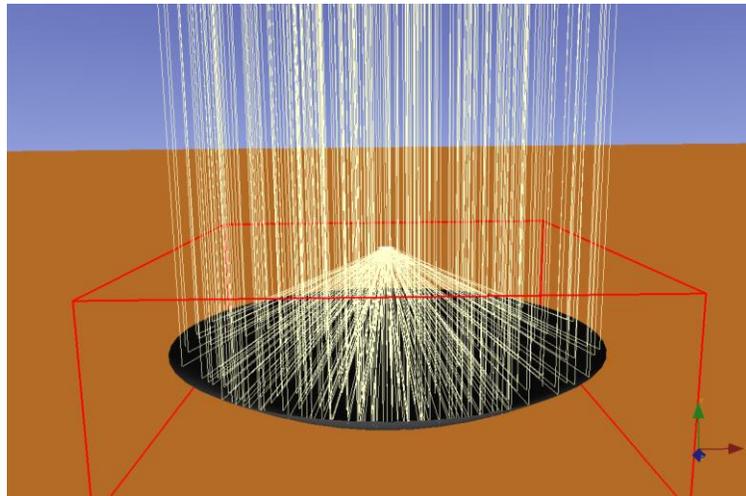


Figura 4. Trazado de rayos en el concentrador de disco parabólico.

Se ejecutó el análisis del flujo en el receptor. Para obtener un resultado más preciso en este proceso, se utilizó la máxima cantidad de rayos (7500000). La gráfica de la distribución de flujo incidente para un receptor con radio de 0.025 m se muestra en la figura 5. Visiblemente

se puede notar que la distribución es simétrica a lo largo del eje X y del eje Y. También se puede observar que el flujo máximo se encuentra en el centro del receptor y disminuye progresivamente cuando se aleja del centro.

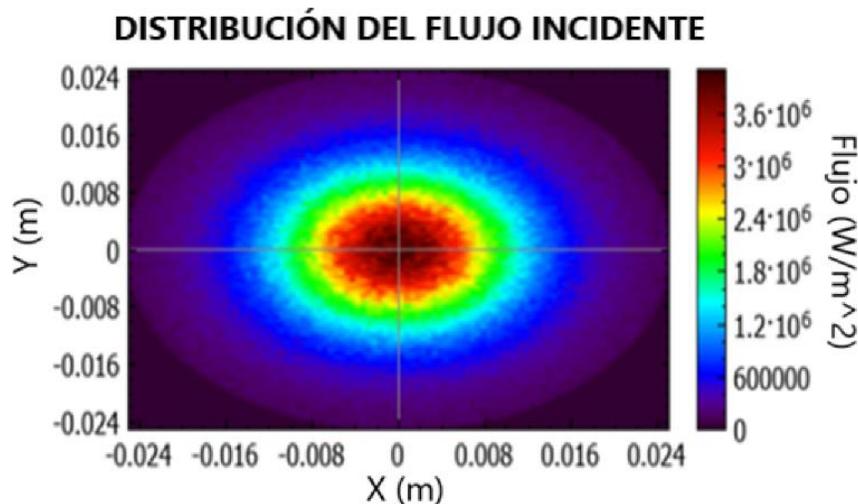


Figura 5. Flujo incidente en el receptor.

Las figuras 6 y 7 muestran las gráficas en donde se percibe de manera más detallada el comportamiento del flujo en el receptor en los sectores vertical y horizontal. En ellas

nuevamente se verifica su simetría en los dos planos y se puede observar que la mayor parte del flujo se encuentra en un diámetro aproximado de 0.016 m.

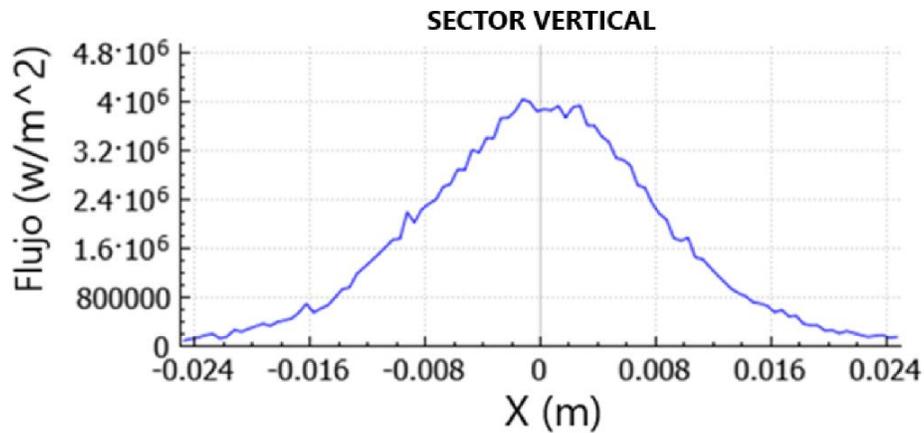


Figura 6. Distribución del flujo en el receptor en el sector vertical.

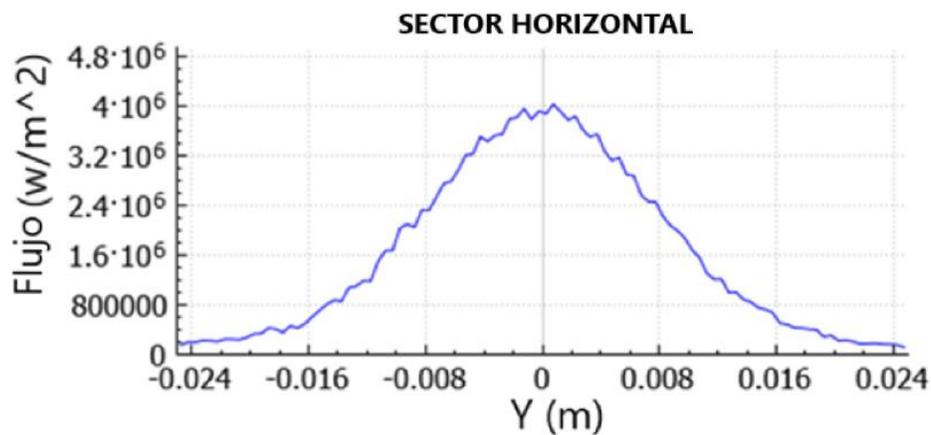


Figura 7. Distribución del flujo en el receptor en el sector horizontal.

4. Resultados

La simulación en Tonatiuh con un error de 4.39 mrad, arrojó una potencia de 1676.74W, para un radio del receptor de 0.025 m. Posteriormente se realizó la simulación con diferentes radios hasta obtener una máxima potencia de 1829.03W para un radio de 0.06 m (véase figura 8), con radios mayores a este se pudo observar que la potencia disminuía, esto se debe a que entre más grandes sean las

dimensiones del receptor, mayor será la sombra que proyecte sobre el colector, por lo tanto, una menor cantidad de rayos será reflejada. Para conocer el receptor que mejor aprovecha la energía de acuerdo con sus dimensiones, se calculó la relación Potencia/Radio. Obteniendo la mejor relación para el radio de 0.015 m con un valor de 85968 W/m, para valores más altos del radio, la relación Potencia/Radio fue disminuyendo, como se muestra en la figura 8.

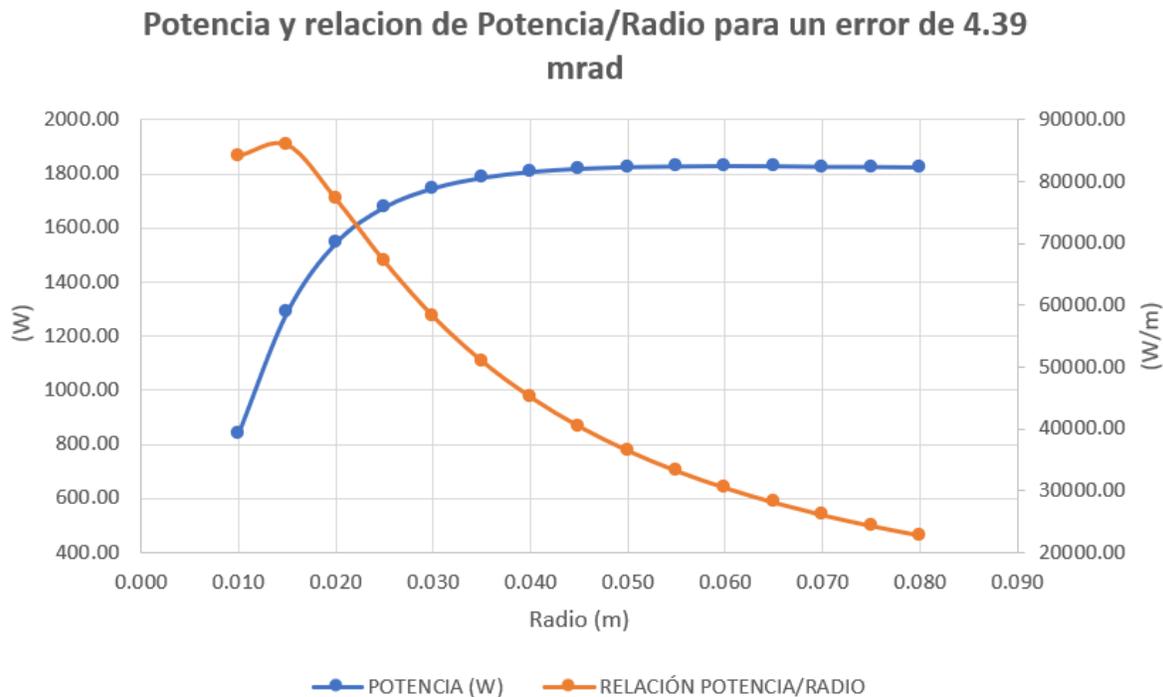


Figura 8. Resultados de la simulación del disco parabólico con un error de 4.39 mrad.

En este análisis el desbordamiento (Spillage) se calculó obteniendo el porcentaje de energía que no era aprovechado, considerando una potencia máxima de aprovechamiento de 1829.03 W. En la simulación previamente efectuada se pudo observar este fenómeno, en la figura 9 se muestra que algunos rayos no llegan a impactar sobre el receptor, por lo que no son aprovechados. El desbordamiento normalmente ocurre debido a fallas en el diseño, errores ópticos en las superficies de los concentradores y errores en los sistemas de seguimiento, esto se puede disminuir al atender con precisión estos factores. Blazquez *et al.* (2015) realizaron una comparación teórica y experimental de la distribución del flujo en el punto focal de un concentrador de disco parabólico Stirling mediante el método de MCRT y el mapeo de fotones, al realizar el análisis con un error óptico global de 6.83 mrad, considerando una capa desigual de suciedad en la superficie del disco, y el error

asociado con la forma solar, encontraron un valor de 7% para el desbordamiento en su sistema, en donde concluyeron que es un valor aceptable para este tipo de concentradores, ya que conserva su calidad óptica y se mantiene en línea con los demás concentradores en el mercado y en la literatura.

Se realizó una segunda simulación considerando los errores ópticos y los errores del sistema de seguimiento, sensores, estructura y alineamiento, con un valor estándar de 6.7 mrad [19]. En donde se pudo notar que debido a que el error es mayor, una menor cantidad de rayos impactaron sobre el receptor, lo que resulta en una menor potencia y mayor desbordamiento. Para este caso la potencia más alta fue de 1818.52 W con un radio del receptor de 0.075 m y la mejor relación Potencia/Radio fue de 58495 W/m la cual se obtuvo con el radio de receptor de 0.02 m (véase figura 10).

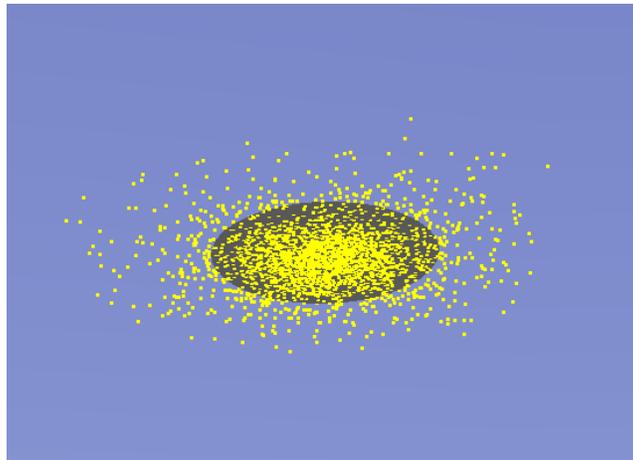


Figura 9. Desbordamiento en el receptor.

Potencia y relacion de Potencia/Radio para un error de 6.7 mrad

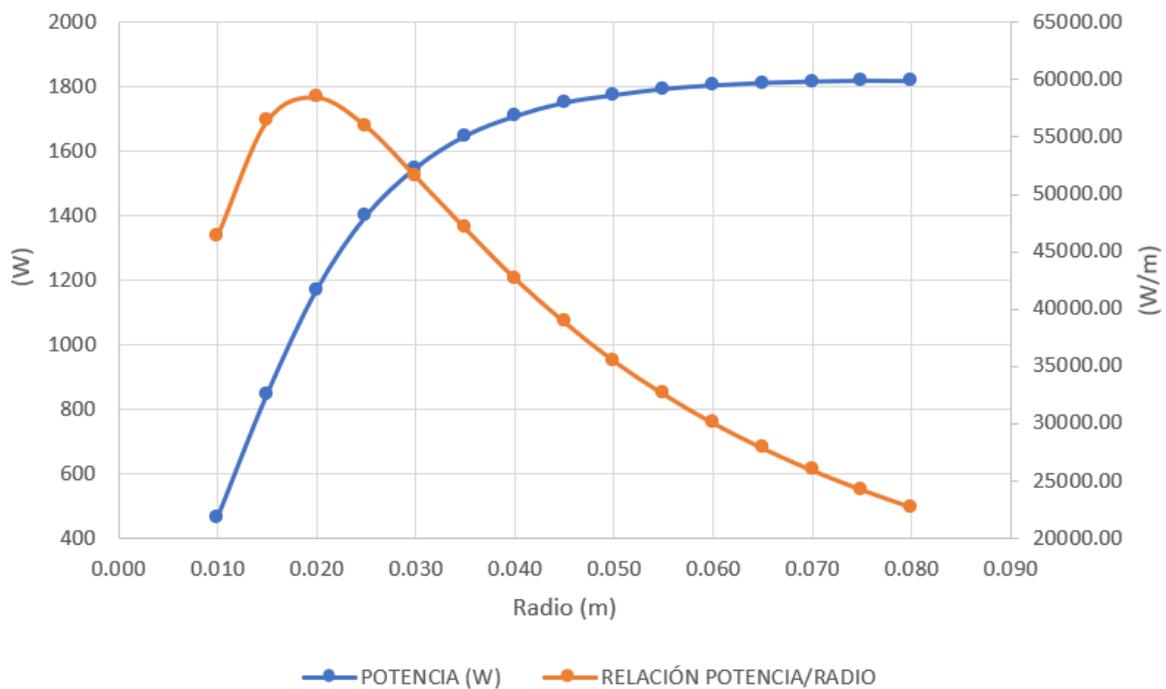


Figura 10. Resultados de la simulación del disco parabólico con un error de 4.39 mrad.

5. Conclusiones

Después de realizar las simulaciones de trazado de rayos del sistema de concentración

correspondientes a un error de 4.39 mrad se obtuvo una potencia máxima de 1829.03 W con un radio del receptor de 0.06 m. Y para el error de 6.7 mrad se obtuvo una potencia máxima de

1818.52 W con un radio del receptor de 0.075 m. De acuerdo con la potencia obtenida en la simulación del disco parabólico, el posible uso del sistema se enfocaría para fines domésticos, ya que diversos autores han obtenido resultados similares, tal es el caso de André-Charles *et al.* (2019), los cuales obtuvieron una potencia de 1660 W utilizando un concentrador solar para proveer de agua caliente a una casa habitación. Y Arteconi *et al.* (2019), quienes consiguieron una potencia de 2000 W utilizando la energía termosolar para el suministro de agua caliente de un complejo residencial de apartamentos.

Por otro lado, se puede concluir que los errores ópticos no afectan demasiado a la potencia ya que solo hubo una diferencia del 0.57% entre las potencias de ambas pruebas, pero las dimensiones de la imagen focal si sufren cambios más drásticos, ya que hubo una diferencia del 20% entre los radios del receptor de ambas pruebas. Esto se debe a que, al aumentar el error, los rayos del Sol tienden a tener una mayor dispersión sobre la superficie del receptor, por lo tanto, es necesario una mayor área para obtener una potencia más alta. Se debe tener en cuenta que entre más grandes sean las dimensiones del receptor, el factor de

sombra aumenta y la relación de concentración disminuye.

Con esta investigación fue posible conocer el comportamiento del concentrador de disco parabólico de acuerdo con sus propiedades óptico-geométricas y se pudo observar la variación de la potencia y la imagen focal dependiendo de los errores ópticos y de seguimiento. Con los resultados es posible continuar la investigación con la propuesta de un receptor de cavidad partiendo de la imagen focal y potencia obtenidos en la simulación, posteriormente el diseño de un sistema de seguimiento solar preciso que presente el menor error posible.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para cursar un posgrado y realizar una estancia de investigación en el extranjero

Asimismo, al departamento de posgrado del Instituto Tecnológico de Apizaco, por brindar el apoyo necesario para la realización de este proyecto

Referencias

- Abas, N., Kalair, A. and Khan, N. (2015). Review of fossil and future energy technologies. *Futures*, 69, 31-49. doi: 10.1016/j.futures.2015.03.003
- Ahmed, A., Tyurina, Y. G., Smailova, Z. P., Kurilova, A. A. and Shulus, A. A. (2019). Government Policy and Financing Options for Solar Energy: World Prospects. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9, 131-145. doi: 10.32479/ijeeep.8212
- Lentz, A., Rincón, E. y Estrada, V. (2012). Presente y Futuro de la Energía Solar en México. *XV Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, Galicia, España.
- Secretaria de Energía (SENER). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*.
- Muhammad-Sukki, F., Ramirez-Iniguez, R., McMeekin, S.G., Stewart, B.G. and Clive, B. (2010). *Solar Concentrators*. IJAS, 1.

Reddy, G.C.M., Rao, G. A., Prasad, V.V.S.H and Mukkoti, V. V. (2017). Design of concentrated parabolic dish collector for vapor absorption refrigeration system. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8, 714-724.

Yosra, K., Nizar, D., Aribia, B. and Abdallah H. (2013). Design of a solar dish concentrator according to the needed energy for a given application. *14th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering*, Sousse, Tunisia.

National Renewable Energy Laboratory (2020), SolTrace. [Online], Available: <https://www.nrel.gov/csp/soltrace.html>

Supa, B. A., Zainudina, M. F., Zanariah, T., Alia, S., Bakara, R. A. and Minga, G. L. (2014). Effect of rim angle to the flux distribution diameter in solar parabolic dish collector. *2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*, ICSEEA.

Pavlovic, S. R. and Stefanovic, V. P. (2015). Ray Tracing Study of Optical Characteristics of the Solar Image in the Receiver for a Thermal Solar Parabolic Dish Collector. *Journal of Solar Energy*, 2015, Article ID 326536

Terrón, M., Peña, M. I., Carrillom, J. G., Ayala, U. D. and Flores, V. (2018). Solar Ray Tracing Analysis to Determine Energy Availability in a CPC Designed for Use as a Residential Water Heater. *Energies*, 11.

Pavlovic, S., Vasiljevic, D. and Stefanovic, V. (2014). Optical Design of a Solar Parabolic Thermal Concentrator Based on Trapezoidal Reflective Petals. *Conference paper*. doi: 10.2298/TSCI160213104Y

Rodriguez, D., Rosengarten, G., Belmonte, J. F., Izquierdo M., Molina A. and Almendros, J. A. (2014). Ray Tracing of a Solar Collector Designed for Uniform Yearly Production. *Energy Procedia*, 57, 2221-2230. doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.189

Giovinazzo, C., Bonfiglio, L., Gomes, J. and Karlsson, B. (2014). Ray Tracing Modelling of an Asymmetric Concentrating PVT. ISES, *EuroSun* 2014.

Wendelin, T., Dobos, A. and Lewandowski, A. (2013). SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems”, *Technical Report*, NREL/TP-5500-59163

Mahan, J. R. (2019). *The Monte Carlo Ray-Trace Method in Radiation Heat Transfer and Applied Optics*. Virginia, USA, ISBN 9781119518525

Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. *Solar Energy laboratory*, University of Wisconsin, USA.

Dincer, I., Zamfirescu C. (2014). *Advanced Power Generations Systems*. 369-453. doi: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63866-6>

Stine, B. W. and Greyer, M. (2001). *Power from the sun*. [Online], Available: <http://www.powerfromthesun.net/book.html>

Sistema Meteorológico Nacional. (2020)., *Gobierno de México*, [Online], Available: <https://smn.conagua.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas>

Blázquez, R., Carballo, J., Cadiz, P., Frassetto, M., Silva, M., Fontela, P. and Ballesteros, J. C. (2015). Optical test of the DS1 prototype concentrating Surface. *Energy Procedia*, 69, 41-49. doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.006

André-Charles, M. A., Gael, L., Norman, H., Gabriel, H. and Arthur, L. (2019). Low temperature and power solar energy conversion for domestic use. *Energy Procedia*, 161, 454-463. doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.072

Arteconi, A., Zotto, L., Tascioni, R., Mahkamov, K., Underwood, C., Cabeza, L. F., Gracia, A., Pili, P., Mintsas, A. C., Bartolini, C. M., Gimbertani, T., Botargues, T., Halimic, E. and Cioccolanti, L. (2019). Simulation analysis of an innovative micro-solar 2kW Organic Rankine Cycle plant coupled with a multi-apartment building for domestic hot water supply. *Energy Procedia*, 158, 2225-2230. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.168