

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE PROTOTIPOS DE HOMOGENEIZADORES DE ALTO FLUJO RADIATIVO PARA EL HoSIER

E. Anguera^{*}, R. Pérez-Enciso, C.A. Pérez-Rábago, C.A. Arancibia-Bulnes and C.A. Estrada

Instituto en Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México,
Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, 62584 México.
Tel: +52 (777) 362 0090 x 38021, *e-mail: eranr@ier.unam.mx.

RESUMEN

Los primeros prototipos de homogeneizadores de flujo radiativo, para aplicaciones de concentración fotovoltaica, son implementados en el Horno Solar de Altos Flujos Radiativos (HoSIER) del Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Como parte del diseño, se modelaron y simularon homogeneizadores con distintas geometrías para una longitud variable, mediante el software de trazado de rayos SOLTRACE. Se seleccionó el cuadrado como área transversal del homogeneizador ya que presenta el mejor valor de uniformidad en la distribución de intensidad del flujo radiativo para un receptor ubicado a 1m de distancia del foco. A fin de corroborar los experimentos computacionales se construyeron dos homogeneizadores huecos de área transversal cuadrada con paredes internas reflectivas de primera y segunda superficie, de 50 cm de largo y se caracterizaron mediante la toma de imágenes con una cámara CCD, haciendo un barrido de su longitud.

PALABRAS CLAVE: Energía solar, Concentración fotovoltaica, Concentración solar, Radiación solar concentrada, Horno solar de alto flujo radiativo, Homogeneizador de radiación.

ABSTRACT

The evaluation of the first prototypes of radiative flux homogenizers, for concentration photovoltaic applications, were tested in the High Flux Solar Furnace (HoSIER), at the Institute of Renewable Energies at UNAM. As a part of the design, homogenizers were modeled and simulated with distinct geometries for a variable length, through the ray trace software SOLTRACE. A square were selected as a transversal area of the homogenizer, since it presents the best uniformity value in the distribution of radiative flux intensities for a target placed at 1m of distance from the focus. In order to corroborate the computational experiments two hollows homogenizers with square transversal areas and reflective interior walls were built, one with front surface mirrors and the other with back surface mirrors both of 50 cm of length, and they were characterized taking pictures with a CCD camera, by scanning the length.

KEYWORDS: Solar Energy, Concentration photovoltaic, Solar Concentration, Concentrated solar radiation, High Flux Solar Oven, Homogenizer.

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto de Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar - Segunda Etapa (<http://lacyqs.cie.unam.mx/es/>), se vienen realizando estudios sobre concentración solar fotovoltaica. En particular, se sabe que las principales pérdidas en todo sistema de concentración solar fotovoltaica son de carácter óptico; las pérdidas por reflexión, geometría imperfecta del concentrador, respuesta espectral, errores en el seguimiento y la iluminación no uniforme de la o las celdas, pueden bajar la eficiencia de todo el sistema hasta en un 63%.

La no uniformidad de la iluminación producida por el concentrador incrementa la temperatura de la celda, su resistencia y disminuye su eficiencia. Aproximadamente el 40% de la energía se pierde comparando con lo que debería producirse idealmente a través del proceso. El propósito del elemento óptico de concentración es suministrar energía concentrada y direccionarla de manera uniforme a la celda solar, pero esto no pasa de manera natural.

El uso de concentradores modifica la radiación solar incidente sobre las celdas fotovoltaicas, amplificándola varias veces y generando patrones de iluminación no uniformes, los cuales son ambos discretos y discontinuos en el tiempo (Baig, 2012). La no uniformidad puede ser causada sobre la superficie de una celda sometida a iluminación no uniforme o a un arreglo de celdas conectadas entre sí, donde una o más celdas están siendo iluminadas con intensidades de radiación distintas.

Los equipos de concentración fotovoltaica, tienen como primer elemento óptico el concentrador y dependiendo de la forma de la distribución de la radiación solar que produzcan estos, el equipo puede contar con un segundo elemento óptico, para iluminar de manera uniforme el área de captación de las celdas fotovoltaicas. Estos dispositivos conocen como homogeneizadores de flujo y pueden ser reflectivos o refractivos; los homogeneizadores cuya geometría es prismática, se las da el nombre de caleidoscopios o tubos de luz, según la fuente.

En la fig.1, se esquematiza el principio de homogeneización de los caleidoscopios, el cual consiste en las múltiples reflexiones de un flujo de radiación concentrado, dentro de una cavidad. Una sección transversal constante a lo largo del caleidoscopio es necesaria para reducir reflexiones en sentido opuesto al receptor; el incremento de la longitud de homogeneizador produce flujos con mayor uniformidad a la salida. (Chen et al., 1963).

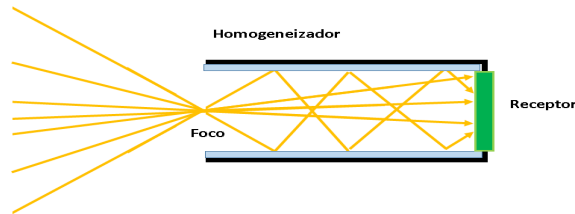


Figura 1. Ilustración esquemática del Homogeneizador Flujo analizado, basado en un caleidoscopio.

Dado que la mayoría de los sistemas de homogeneización de flujo radiativo concentrado para celdas fotovoltaicas, tienen que ver de un modo u otro con la reflexión de la luz, se realizó un análisis por trazado de rayos de las reflexiones múltiples en homogeneizadores

del tipo caleidoscopio utilizando como sistema concentrador el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER). El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de este análisis.

MODELO TEÓRICO

Se utilizó como modelo teórico la técnica de trazado de rayos implementada en el código SOLTRACE desarrollado en NREL. Los parámetros de las componentes ópticas del HoSIER fueron ingresados al software, esto es, las coordenadas de ubicación individual del vértice de cada espejo (x_i, y_i, z_i), las normales correspondientes de cada uno de ellos (x_N, y_N, z_N) y las características reflexivas y transmisivas, de los mismos. Esta información proviene de parámetros de diseño y pruebas experimentales del HoSIER, Estrada 2010.

Después se procedió a simular un primer Homogeneizador de Flujo (Light pipe), que consistió de un prisma hueco de diez caras reflexivas en su interior, a las cuales se les dio el máximo valor de reflectancia con el fin de evaluar la uniformidad que se podía obtener con las menores pérdidas a la salida.

La uniformidad se calculó como la desviación estándar del valor del flujo radiativo simulado a la salida del Homogeneizador, dividido entre el promedio de todos los valores. Este valor representa el promedio de las discrepancias entre todos los valores de flujo radiativo en una determinada área, por lo que, entre menor sea; el flujo que sale del Homogeneizador será más uniforme.

$$U = \frac{\sigma_q}{\bar{q}} \quad (1)$$

Así mismo este valor depende de otros factores, uno de ellos es el área de análisis, restringida a un cuadrado para el caso de SOLTRACE, por lo que se delimita este cuadrado a un área de 100 cm² en el centro del receptor ubicado a la salida del homogeneizador.

En programas de trazado de rayos que utilizan el método Monte Carlo ocurre que a mayor número de rayos usados en la simulación, el resultado representa una mejor aproximación. Se realizó un análisis de independencia de maya, donde se observó que la uniformidad y las variables de intensidad de flujo varían de manera asintótica con el incremento del número de rayos; por lo que una simulación con dos millones de rayos se consideró confiable.

Ries (1996) ha llevado a cabo el estudio de homogeneizadores con caras triangulares, cuadradas y hexagonales, los cuales son capaces de uniformizar el flujo radiativo a la salida del homogeneizador. Para corroborar dichas afirmaciones y tomarlas en cuenta para el diseño de los prototipos, se hicieron simulaciones con los siguientes números de paredes reflexivas: 3, 4, 5, 6, 8 y 10.

En la fig. 3, se muestra una gráfica de uniformidad, en función de la longitud del caleidoscopio, de las siete geometrías simuladas, para el área transversal de un homogeneizador de longitud variable entre 10 cm y 100 cm. El parámetro de referencia fue circunscribir las áreas transversales a un círculo de 15 cm de diámetro, para abarcar todo el flujo del spot que concentra el HoSIER. Como se puede ver en la fig. 3, con excepción del círculo, la uniformidad en todas las demás secciones tiende a bajar conforme la longitud de homogeneizador aumenta. El valor más bajo de uniformidad fue de 0.037 para el perfil de sección cuadrada.

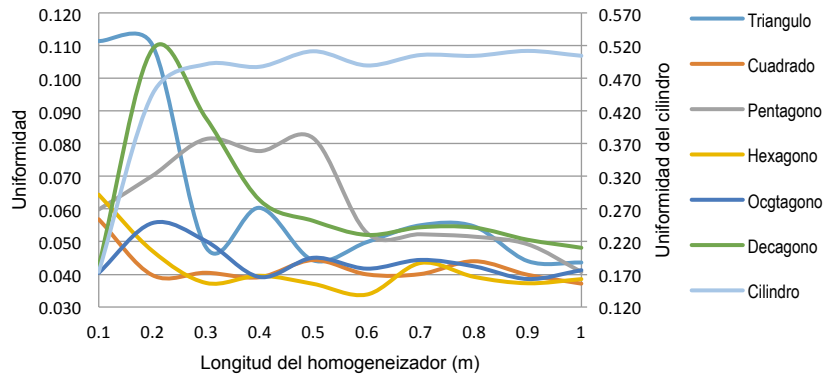


Figura 3. Uniformidad del flujo para homogeneizadores con geometrías con diferentes secciones transversales.

Experimentación

Se diseñó un primer homogeneizador de flujo radiativo altamente concentrado utilizando los experimentos computacionales previamente descritos. Se construyó un caleidoscopio homogeneizador de flujo hueco, con un área transversal cuadrada, de paredes internas reflexivas. Para corroborar el trabajo previamente simulado, se realizó un experimento, en el cual el receptor pueda ser desplazado en el interior del homogeneizador, a fin de observar el comportamiento del flujo radiativo a diferentes longitudes.

En la Figura 4 se muestra un esquema que detalla el experimento realizado en el HoSIER; para prevenir el desenfoque de la cámara durante el experimento, esta se sujetó mediante un brazo al receptor, de tal manera que ambos se encuentran unidos a una mesa que se desplaza paralela al eje óptico; el homogeneizador está fijo sobre la base de dicha mesa, esto permite tomar imágenes del flujo incidente en la superficie lambertiana del receptor para después ser procesadas y analizadas en una computadora mediante el programa MATLAB.

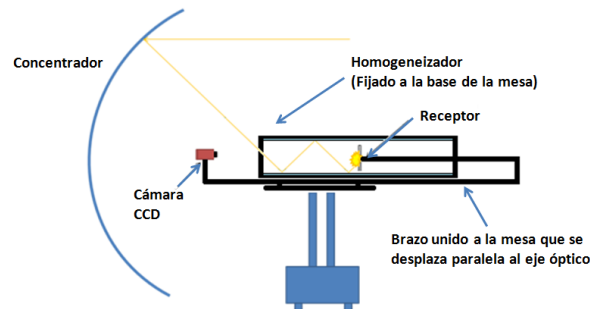


Figura 4. Esquema del experimento para la toma de imágenes de un receptor dentro de un caleidoscopio, sometido a altas intensidades de flujo radiativo en el HoSIER.

Para la construcción del primer dispositivo también llamado Homogeneizador 1, se fabricó una carcasa de aluminio angular y estructurado, dentro se colocaron 4 espejos planos de segunda superficie de 50 cm de largo por 13 cm de ancho, y como receptor se colocó sobre un cuadrado de acero de 11cm de lado, por su resistividad térmica y propiedades ópticas lambertianas, una superficie de alúmina que actuó como receptor. Este receptor y la cámara CCD son unidos con perfil de aluminio estructurado mediante un brazo a la mesa. El experimento montado se muestra en la fig.5.

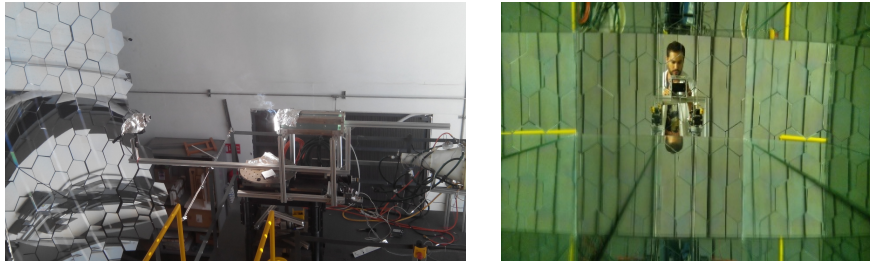


Figura 5. Izquierda; fotografía del experimento. Derecha; fotografía tomada a la salida del primer homogeneizador de flujo con paredes internas de espejos de segunda superficie.

Procesamiento

Las primeras imágenes son tomadas en un rango de 25 a 50 cm, esto es debido a que la mesa sobre la cual están sujetos tanto la cámara como el receptor, cuenta con 25 cm de carrera, por lo que después de cubrir esta longitud, se debe reposicionar el brazo en la mesa.

En la figura 6 se muestran las imágenes tomadas por la cámara y referenciadas a un solo valor mediante MATLAB, lo que permite ver el decremento de la intensidad a medida que nos alejamos del foco, también se observa claramente un aumento en la uniformidad.

La uniformidad de las imágenes tomadas por la cámara CCD se calcula como la desviación estándar de todos los valores de cada pixel divididos entre el promedio de estos. Sin embargo, la cámara CCD debe ir ajustando su obturador a medida que la intensidad decrece, ya que los valores de los pixeles con información a analizar puede llegar a ser muy bajos y por ende se pueden despreciar; esto es debido a que la cámara cuenta con valores por pixel que varían solo dentro de un rango de 0 a 255, por lo que para que los pixeles no sean saturados o despreciados se hace un ajuste electrónico del obturador sin tener que interrumpir el experimento, sin embargo el número de la muestra crece, respecto a las mediciones previas al ajuste.

En la figura 7, se muestran los ajustes del obturador respecto a la distancia como la diferencia entre el valor mínimo y máximo, para saber dentro de que rango realmente se calculó la uniformidad y como se vio está afectada. Se observa en la imagen el primer ajuste que se hace a los 8 cm, incrementando el diferencial de valores máximo-mínimo que puede tener un determinado bin cercano a los 200. Recordando que el máximo es 255, las imágenes no tienen pixeles saturados.

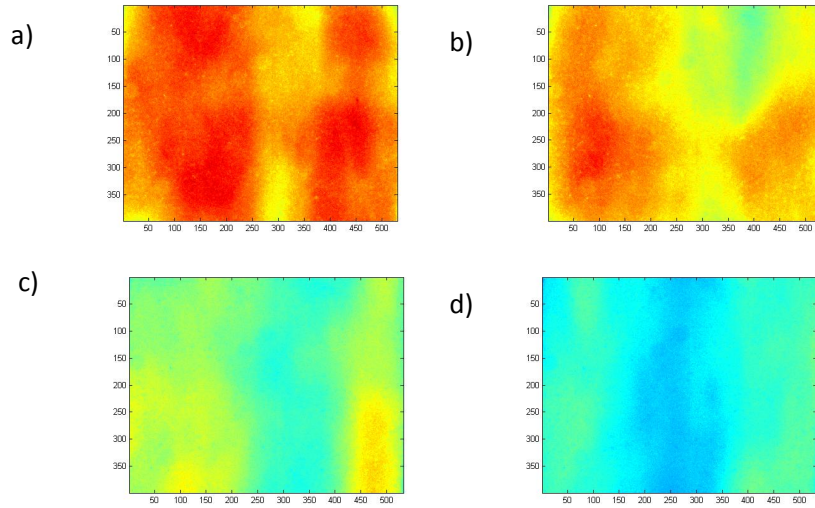


Figura 6. Imágenes tomadas al receptor con el atenuador al 10% de apertura de la potencia solar del HoSIER para diferentes distancias dentro del homogeneizador: a) 25cm, b) 30cm, c) 40cm y d) 50cm

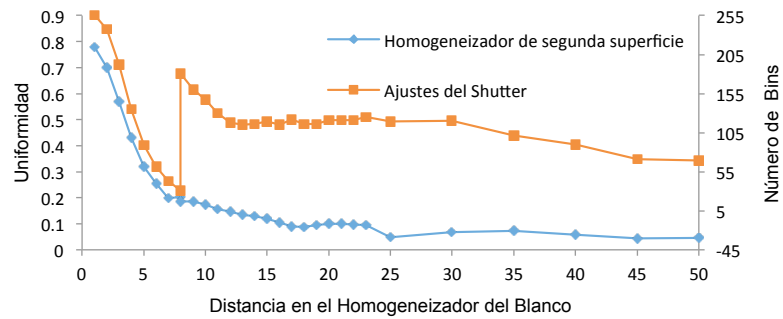


Figura 7. Uniformidad y diferencial de número de Bins vs Distancia para el Homogeneizador 1.

Con base en las experiencias con el homogeneizador 1, se realizó una segunda versión de este, llamado homogeneizador 2, el cual fue diseñado con una carcasa ajustable fabricada con aluminio estructurado, se mantuvo la longitud de 50 cm, para poder comparar ambos diseños y se realizaron las mejoras evidenciadas por los dispositivos de instrumentación.

En este segundo homogeneizador se implementaron aletas a 8 cm del foco, distancia en la cual el spot se abre lo suficiente para realizar la primer reflexión dentro del homogeneizador; en segundo lugar se redujeron las dimensiones del receptor a 10 cm por lado, así como el área de apertura a 11 cm, con el fin de reducir las pérdidas por el espaciado que había entre el receptor y las paredes del homogeneizador y reducir los ajustes del obturador, lo cual también requirió, un barra estabilizadora que sirviese de contrapeso, para mejorar la estabilidad del receptor.

Por último, se intercambiaron los espejos de segunda superficie, por lámina de aluminio Alanod, material cuya reflectividad es del 95%, contra el 80% de los espejos anteriores, el cual fue adherido a la carcasa con silicón para altas temperaturas, de modo tal que las paredes internas de la carcasa hicieran contacto en su totalidad con la superficie posterior del Alanod; esto, para evitar que la flexibilidad del material incremente los errores de especularidad.

RESULTADOS

En la figura 9 se muestra el comportamiento de la uniformidad del flujo radiativo para ambos homogeneizadores en un rango de 6 a 50 cm. Se eligió esta longitud de análisis, ya que el Homogeneizador 2 actúa a los 7cm debido a que su área de entrada es menor. Se observa un incremento en la pendiente de 6 a 7 cm, para el receptor ubicado en el homogeneizador 2. Puede decirse que el Homogeneizador 2 es más eficaz a lo largo de su longitud que el homogeneizador 1, aunque coincidan en su valor final.

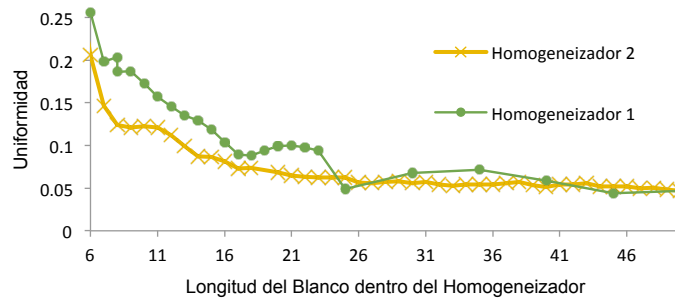


Figura 9. Uniformidad del flujo radiativo en el receptor ubicado a varias distancias del foco en el rango de 6 a 50 cm para los Homogeneizadores 1 y 2.

La figura 10 muestra la frecuencia con la que aparece un mismo valor de pixel para las imágenes en receptor ubicado a 0, 25 y 50 cm. Se observa que a los 50 cm la frecuencia con la que aparece un mismo valor de pixel, se aproxima a las 3500 cuentas mientras que a los 25 cm este valor es de 2500, lo que indica que el número de puntos con la misma intensidad de radiación para el área del receptor a 50 cm es mayor, esto se traduce en una mejor uniformidad, sin embargo, aún hay pixeles con valores diferentes al de mayor frecuencia y carecen de una agrupación compacta. En el caso de la primera imagen a la izquierda, también se ve un valor preponderante aproximadamente de 2×10^4 , pero esta cercano al cero, lo que implica que en el spot los valores más intensos se encuentran en una menor

proporción en el área de la imagen. Si esta misma gráfica de frecuencia la encontráramos con su pico en un valor bin de pixel de 255 hablaríamos de un flujo altamente uniforme de gran intensidad.

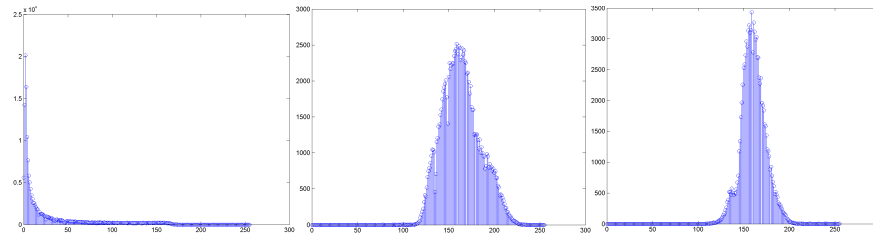


Figura 10. De izquierda a derecha histogramas de la imagen del receptor a 0, 25 y 50cm.

CONCLUSIONES

Se comprobó que el Homogeneizador de paredes reflectivas es eficaz a la hora de uniformizar la radiación solar concentrada. Sin embargo, para aplicaciones fotovoltaicas los prototipos diseñados siguen teniendo variaciones significativas en distintos puntos de la superficie del receptor. El valor de uniformidad debe ser menor aún y distribuido en toda el área, ya que aunque ciertas secciones de una imagen presentan buenas uniformidades, otras presentan valores de intensidad de radiación superiores a los que hay en estas secciones, incluso en uno o dos órdenes de magnitud. Esto implicaría que en un arreglo de celdas fotovoltaicas densamente compactado a la salida del homogeneizador estas celdas estarían produciendo de 10 a 100 veces más corriente que las que se encuentran en las áreas uniformes, generando calentamiento en el sistema por disipación de potencia eléctrica a modo de IR².

Los espejos de segunda superficie se calientan a mayor temperatura que los de primera superficie al absorber radiación por las propiedades de transmisión y absorción del material, así como por efectos de reflexiones totales internas dentro del vidrio; esto corroborado mediante simulaciones. Lo primero puede ser optimizado utilizando espejos de menor grosor y vidrios con menor contenido de hierro.

Conforme a la teoría, el nivel de uniformidad mejora con la longitud del homogeneizador, sin embargo las pérdidas por absorción son mayores y pueden deteriorar el dispositivo, si estos no son refrigerados. Los experimentos se realizaron con una apertura del 10% del atenuador del HoSIER y el primer homogeneizador se fracturó al 20% de apertura.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado con fondos de CONACYT (proyecto 123767). M.I Ernesto Anguera Romero y M. Ricardo Pérez Enciso, agradecen el apoyo de CONACYT a través de becas de doctorado. Los autores agradecen el apoyo técnico de los Ingenieros José de Jesús Quiñones y José Jaime Villalobos Gómez.

REFERENCIA

Estrada C.A., C.A. Arancibia, S. Vázquez, C.A. Pérez, D. Riveros, R. Pérez, J. Quiñones, R. Castrejón, M. Montiel, F. Granados, 2011. “A new high-flux solar furnace at CIE-UNAM in Temixco, México, first stage”, SolarPACES 2011 Symposium, España.

Baig, H., Heasman, K. C., & Mallick, T. K. (2012). Non-uniform illumination in concentrating solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5890–5909. doi:10.1016/j.rser.2012.06.020

Chen, M. M., & Glaser, P. E. (1963). The Use of a Kaleidoscope to Obtain Uniform Flux Over a Large Area in a Solar or Arc Imaging Furnace. *Applied Optics*, 2(3), 265–272.

Ries, Harald Gordon, J.M. Lasken, Michelle, “High-flux photovoltaic solar concentrators with kaleidoscope-based optical designs”, *Solar Energy* (1996).