

Diseño de una superficie cuadrada como concentrador solar de revolución de forma libre tipo fresnel impreso en 3D

Design of a square surface as a solar concentrator of fresnel type revolution printed in 3D

GONZÁLEZ-GALINDO, Edgar Alfredo†*, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, J. Guadalupe y PINELO-AGUILAR, Luis Angel

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Centro Tecnológico Aragón. Avenida Rancho Seco S/N, Colonia Impulsora, Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, Código Postal 57130

ID 1^{er} Autor: *Edgar Alfredo, González-Galindo* / ORC ID: 0000-0003-4654-9595, Researcher ID Thomson: G-7927-2018, CVU CONACYT ID: 351785

ID 1^{er} Coautor: *J. Guadalupe, Hernández-Hernández* / ORC ID: 0000-0002-5093-9468, Researcher ID Thomson: G-7927-2018, CVU CONACYT ID: 98984

ID 2^{do} Coautor: *Luis Angel, Pinelo-Aguilar*

Recibido Junio 20, 2018; Aceptado Septiembre 30, 2018

Resumen

Fue desarrollado un concentrador solar tipo Fresnel de revolución, partiendo de una superficie libre de forma, realizando una impresión en 3D con un diseño cuadrado. Se utilizó una superficie cóncava por acción de la gravedad, para definir las coordenadas del contorno y aplicar el método de ajuste polinomial de Lagrange, para obtener la función que describe la superficie cóncava. Con esta función fue posible generar los trazos de rayos para observar el comportamiento de los rayos que inciden y reflejan y de esa manera conocer la distancia focal efectiva del concentrador. Este tipo de superficies presenta diversas aplicaciones, que puede beneficiar a la sociedad, debido a que se puede aprovechar y utilizar en: estufas solares, calentadores de agua, motores Stirling, generadores de vapor, en sistemas fotovoltaicos, etc. Este desarrollo ayuda a no emitir grandes cantidades de dióxidos carbono a la atmosfera, y aprovechar la energía limpia proveniente del sol, en condiciones controladas es posible obtener temperaturas que oscilan entre los (300 - 500 °C).

Concentrador, Superficie, Revolución

Abstract

A Fresnel-type solar concentrator of revolution was developed, starting from a free-form surface, making a 3D impression with a square design. A concave surface was used by gravity, to define the coordinates of the contour and apply the Lagrange polynomial adjustment method, to obtain the function that describes the concave surface. With this function it was possible to generate the ray traces to observe the behavior of the rays that affect and reflect and in this way to know the effective focal distance of the concentrator. This type of surfaces presents diverse applications, which can benefit society, because it can be used and used in: solar stoves, water heaters, Stirling motors, steam generators, in photovoltaic systems, etc. This development helps not emit large amounts of carbon dioxide into the atmosphere, and take advantage of clean energy from the sun, under controlled conditions it is possible to obtain temperatures ranging between (300 - 500 °C).

Concentrator, Surface, Revolution

Citación: GONZÁLEZ-GALINDO, Edgar Alfredo, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, J. Guadalupe y PINELO-AGUILAR, Luis Angel. Diseño de una superficie cuadrada como concentrador solar de revolución de forma libre tipo fresnel impreso en 3D. Revista del Desarrollo Tecnológico. 2018. 2-7: 8-17.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (unam_alf@comunidad.unam.mx)

Introducción

En la actualidad los países que usan combustibles fósiles están ligados a serios problemas de contaminación atmosférica debido a la gran cantidad de gases emitidos por la combustión incompleta de motores de combustión interna vehicular y actividad industrial (refinerías de petróleo, fábricas de papel, fundiciones e industria química, entre otras). Estos gases son los óxidos de nitrógeno (NO_x), Óxidos de azufre (SO_x) y monóxido de carbono (CO). Por ejemplo, el monóxido de carbono (CO), es un gas contaminante sumamente tóxico y difícil de detectar por ser un gas incoloro, inodoro y no irritante, su detección requiere de equipo analítico especializado.

La exposición a elevadas concentraciones de monóxido de carbono puede tener serias consecuencias para la salud. Los trastornos producidos en una persona están en relación directa con la cantidad de carboxihemoglobina en sangre; esta cantidad depende a su vez de la concentración de monóxido de carbono en el aire y del tiempo de exposición del individuo a esas condiciones atmosféricas (9 ppm como límite de tolerancia).

La intoxicación aguda puede producir dolor de cabeza, disminución de la visión y de la coordinación muscular, trastornos del sueño y disminución de la capacidad intelectual; en situaciones extremas, pérdida de conocimiento, convulsiones y muerte (Serrano, J. C. y col., 2005). Este gas tiene gran afinidad con el hierro (Fe) de la hemoglobina de la sangre de hasta 200 veces mayor que el oxígeno, formando carboxihemoglobina e interfiriendo en el mecanismo de transporte de oxígeno, que garantiza en un individuo, una renovación continua del abastecimiento del oxígeno necesario para mantener el metabolismo celular en funcionamiento.

El hierro (Fe) al ser una parte esencial de la hemoglobina, una proteína globular constituida por cuatro cadenas polipeptídicas dos alfa (α) y dos beta (β) con un grupo prostético llamada *hemo* cada una pueden combinarse con el monóxido de carbono y ocasionar problemas de falta de oxígeno en la sangre (Echeverría Palacio, C. M., y col., 2006). Por lo que altas concentraciones de CO en el ambiente puede producir desde intoxicaciones hasta posibles decesos.

Datos reportados en la literatura muestran que las concentraciones de oxígeno en el ambiente son del 20%, concentraciones menores representan un grave riesgo a la salud, (concentraciones del 16% de CO en el aire pone en riesgo la salud humana) (Valle, F. A., 1995). Por otro lado, el monóxido de carbono en combinación con el oxígeno en el ambiente a caba convirtiéndose en Dióxido de Carbono (CO₂), un gas que forma parte del grupo de los gases de efecto invernadero que impiden que los rayos infrarrojos salgan, con este efecto, parte de la energía que debe salir hacia el espacio se queda en la atmósfera, éste es el llamado efecto invernadero (Corominas, J., 2014).

Entre la tierra y la atmosfera se genera un efecto de resonancia que incrementa la temperatura en ciertas regiones del mundo y provoca desastres naturales. El (CO₂) también se considera como un compuesto agresivo, si bien la cantidad de emisiones nocivas arrojadas por un sólo automóvil puede resultar insignificante, la concentración de los automóviles en las grandes urbes actuales, implica un riesgo elevado de contaminación atmosférica para la humanidad y, a mediano plazo, un deterioro irreversible para el planeta (Riesco. A. J. M., y col., 2005). El CO₂ también es emitido principalmente por vehículos aéreos, fábricas y por el ser humano al quemar combustible al momento de la preparación de los alimentos en su vida diaria.

La energía solar, es el recurso energético inagotable y disponible en gran parte del mundo, y México no es la excepción, por lo tanto, se puede utilizar concentradores solares en zonas rurales y urbanas, para mitigar la generación de CO₂ y el efecto invernadero, se han utilizado. Diversos colectores, como los cilíndricos parabólicos y/o circulares, estos colectores son de foco lineal y representan mejores posibilidades de aplicación para una amplia gama de casos; los estáticos son económicos y su diseño no es trivial, pero no son eficientes en comparación con los móviles, ya que estos son estáticos. La forma de incrementar su efectividad, es en la implementación de módulos disponibles que siguen el recorrido del sol a lo largo del día, asegurando que se concentre una gran cantidad de energía, e implican un mayor costo del dispositivo (Rodríguez, V. y col., 2010).

Existen otros tipos de concentradores como son: parabólicos, y circulares de revolución, los cuales tienen aplicaciones en estufas(Terrés, H. y col., 2008), hornos (Castañeda M. A., y col., 2012), desalinizadores (Mercado, C., y col., 2015), generadores Stirling (Ruelas R. J. E., y col., 2011), celdas fotovoltaicas (Sherif, R. A., y col., 2005), iluminación (Narasimhan, M. S. y col., 1972), termo colectores (Pacheco L. W., 2006), reflector para telescopio (Bustos Fierro, y col., 2002), concentradores de Fresnel (Neill, M. J. O., 1988), entre otros.

Para generar una superficie que presente un conjunto de puntos de coordenadas, se puede representar el comportamiento general de forma gráfica o matemática por medio de una función polinomial de orden n , cabe mencionar que una gráfica ajustada, no necesariamente pasará por cada uno de los puntos de dispersión.

El ajuste de curvas polinomiales se llevaron a cabo mediante dos métodos: el primero es la regresión e interpolación lineal, a través del ajuste de curvas por aproximación polinomial por mínimos cuadrados, aproximación polinomial mediante el polinomio de Newton, polinomio interpolador de Newton y el segundo por interpolación de Lagrange, en este último se requiere de dos puntos conocidos para generar una interpolación lineal y obtener la pendiente y la función de la recta que pasa por ambos puntos.

Este método clásico de interpolación, se le adjudica a uno de los grandes matemáticos de todos los tiempos Joseph Louis Lagrange (nacido en Turín el 25 de enero de 1736 y muerto en Paris el 10 de abril de 1813), quien a los 17 años se interesó en una memoria de Edmond Halley que lleva el título de "La excelencia del álgebra moderna en ciertos problemas ópticos", y cambio de enfoque de la física a las matemáticas, comenzando a trabajar de forma independiente. Su éxito fue tal que lo nombraron profesor del arte de las matemáticas (Sanford, 1934). Uno de los trabajos realizados es la función (1) de aproximación polinomial $P(x)$, la cual se expresa como:

$$P(x) = \sum_{i=1}^n \mathcal{Y}_i \left[\prod_{j=1, j \neq i}^n x_j \left(\frac{x-x_i}{x_i-x_j} \right) \right] \quad (1)$$

Donde $j = 1 || j \neq 1$ esto es una propiedad que indica que pasa por las coordenadas y/o puntos de una gráfica para su interpolación, para conocer anticipadamente el grado del polinomio se utiliza la expresión $(n-1)$, donde n es el número de coordenadas dependiendo de cuantos puntos se tomen (Hesthaven, J. S., 1998).

El análisis numérico es muy útil en sus aplicaciones a la Ingeniería, Actuaría, Economía y otras ciencias. Este tema puede verse en algunos libros clásicos como son Hammign, Ralston, Scheid, Willers, Mineur, Pearson y otros(Poveda, R., 2016). Por lo tanto, el ajuste de una curva implica ajustar una función $f(x)$ a un conjunto de datos (x_i, y_i) , donde $i=1,2,3, \dots, n$, la función obtenida puede ser un polinomio, una función lineal o una combinación de funciones. La desventaja de este método, es que la fórmula de Lagrange es tediosa de aplicar e implica una gran cantidad de cálculos.

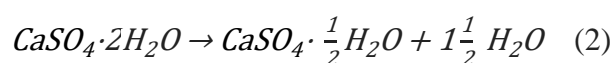
Si no se utilizan suficientes datos, entre iteración e iteración, el cálculo debe repetirse desde el inicio (Hsiao, T. C., y col., 2018). En las últimas décadas, varios trabajos de docencia están haciendo uso de la programación asistida por computadora empleando diferentes lenguajes para obtener las raíces y los coeficientes, así como en la representaciones gráficas en curvas complejas, además se está aplicando a los teoremas fundamentales de álgebra para obtener los polinomios de Lagrange(Kimberling, 1986).

En el presente trabajo se analizó una superficie de sulfato de calcio dihidratada obteniendo puntos de coordenadas equidistantes. y ajustado por la interpolación de Lagrange se consiguió la función que satisface la superficie libre de forma, seccionando y desplazando para obtener un nuevo modelo de concentrador tipo Fresnel de revolución, apoyándose en un programa asistido por computadora para el diseño en 3D, colocándole un reflector adherible que permita ser usado como concentrador y/o reflector de iluminación.

Metodología

El trabajo experimental fue desarrollado en el Laboratorio de Medición e Instrumentación y Control, del Centro Tecnológico Aragón (CTA) es de gran importancia, ya que los modelos y análisis fueron reproducidos, pero debido a la naturaleza de la energía solar no se puede obtener los mismos resultados ya que depende de la ubicación donde se toman los registros de temperatura, en nuestro caso particular tomando en cuenta la irradiancia promedio de la ciudad de México (Galindo, I., y col., 1991), correspondiente al mes de marzo donde se presentan con valores de irradiancia de $21 \frac{MJ}{m^2}$ o $5.833 \frac{kWh}{m^2}$ y en abril $24 \frac{MJ}{m^2}$ o $6.66 \frac{kWh}{m^2}$, en el mes de abril mes en que se realizaron las pruebas.

El material usado para generar la superficie, fue el compuesto de “sulfato de calcio” conocido como yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). La materia prima se obtiene a través de diversos tipos de operaciones mineras. Antes de su uso en la medicina, el sulfato de calcio debe ser examinado por sus impurezas, tales como: silicatos, estroncio, plomo y otros materiales de origen natural. Cuando el yeso se calienta a $110^\circ C$, pierde agua en un proceso conocido como la calcinación. El producto resultante es el sulfato de calcio hemihidratado, también conocido como yeso de Paris (López, J., y col., 2011) como se muestra en la reacción (2).



Utilizando el método de ajuste de interpolación de Lagrange generando un polinomio de cuarto orden, el cual se amplió para encontrar la función adecuada a la superficie del contorno. Esta función permite graficar y trazar los rayos incidentes para observar la región máxima de concentración de luz, para posteriormente trazar una gráfica seccionada, para intersecar a la ordenada al origen y genera la superficie de Fresnel que es la región de interés. Posteriormente el diseño se exporta a un programa asistido por computadora para generar la superficie simétrica de revolución y enseguida su impresión en 3D como se muestra en la Gráfica 1.

Para desarrollar el modelo de la superficie libre de forma plano-convexa se utilizaron 370 g de sulfato de calcio calcinado que fue molido y mezclado con agua (123 mL), se mezcló y agitó suavemente para evitar grumos y formar una pasta homogénea. La pasta viscosa obtenida se colocó en una superficie plana de látex de 16 cm de diámetro la cual generó la superficie libre de forma plano-convexa por acción de la gravedad y dejándose reposar durante 24 hrs para el endurecimiento final.



Figura 1 Formación de la superficie de sulfato de calcio generada por acción de la gravedad

Fuente: Elaboración Propia

Para la alineación de la superficie, se tomaron imágenes que permitieron obtener los puntos coordenados del contorno que fueron aplicados en el ajuste polinomial de Lagrange.

No.	x	y
1	-7.981	0.376
2	-5.822	1.18
3	-1.648	2.01
4	2.958	1.61
5	5.894	0.803

Tabla 1 Coordenadas para obtener la función

Fuente: Elaboración Propia

La altura máxima obtenida de la superficie plano-convexa en su vértice es de 2.321 cm. Partiendo del contorno se obtuvieron 56 puntos de coordenadas, de las cuales sólo se emplearon cinco puntos, para aplicar el ajuste de la curva. El tomar más de 5 puntos implicaría obtener un polinomio de mayor grado con mayor número de oscilaciones con poca visualización gráfica, restando importancia numérica es por ello que en este trabajo se empleó la función polinomial de cuarto orden función (2) como se muestra a continuación:

$$f(x) = a_0x^4 + a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x^1 + a_4x^0 \quad (3)$$

El método de ajuste de interpolación de Lagrange permite construir de una forma rápida y explícita el polinomio interpolación, donde los coeficientes toman los siguientes valores:

No.	x
a ₀	-9.599×10 ⁻⁵
a ₁	-2.494×10 ⁻⁴
a ₂	-28.09×10 ⁻³
a ₃	3.027×10 ⁻³
a ₄	2.320

Tabla 2. Valores de los coeficientes del polinomio de interpolación de Lagrange.

Fuente: Elaboración Propia

Donde $x = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots, \pm n$. El diámetro de la superficie se construye partiendo de las raíces, que forman la superficie, el resto de las raíces se eliminan. La suma de las raíces de frontera nos da el diámetro que forma la superficie libre de forma plano-convexa, y los valores de frontera utilizados fueron $x_1 = -8.374$ y $x_2 = 8.032$, como se observa en la Gráfica 1.

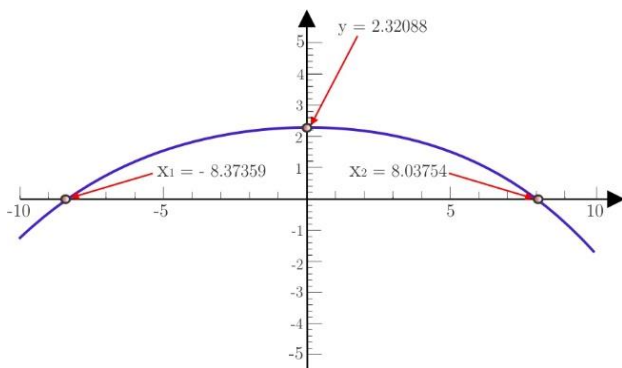


Gráfico 1 Gráfica función ajustada por la interpolación de Lagrange

Fuente: Elaboración Propia

La sustitución de los valores de cada una de las variables antes mencionadas x_1 y x_2 , permitieron estimar el área bajo la curva de la superficie de trabajo. Integrando la función (2) y sustituyendo los valores obtenidos para x_1 y x_2 , se tiene que el área de la superficie teórica fue de 26.285 cm^2 por otro lado para obtener el área bajo la curva ideal, se tomó el diámetro de 16 cm con los valores de frontera para $x_1 = -8 \text{ cm}$. Y para $x_2 = 8.0 \text{ cm}$, dando un valor de 26.329 cm^2 con un error aproximado de 0.169% entre el área bajo la curva teórica y experimental, lo cual indica que se trata de una superficie simétrica. La superficie mostrada en el Gráfico 1 fue dividida en diez secciones equidistantes, para trasladar a cada punto sobre el eje y, el cual se representa como la altura (h_s) y cada punto trasladado sobre el eje x, representa el eje óptico que son trasladados al origen.

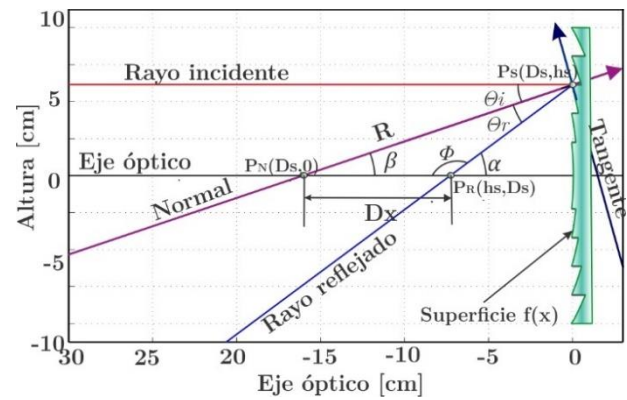


Gráfico 2 Análisis de los trazos de rayos sobre la superficie de Fresnel

Fuente: Elaboración Propia

En el Gráfico 2 se muestra el desarrollo del análisis realizado para el trazo de un solo rayo, el cual representa la distancia que interseca el rayo reflejado y el rayo de la normal con el eje óptico, obteniendo una distancia ($D_x = 7.7550 \text{ cm}$). Aplicando la ley de senos se obtiene la expresión (4).

$$D_x = \frac{R \text{ sen}[\theta_r]}{\text{sen}[\phi]} = \frac{R \text{ sen}[\theta_r]}{\text{sen}[\pi - \alpha]} = \frac{R \text{ sen}[\theta_r]}{\text{sen}[\alpha]} \quad (4)$$

Donde R representa la distancia de la normal de la superficie de Fresnel, y tiene un valor de 10.48 cm ; según Snell el ángulo reflejado (θ_r) es igual al ángulo de incidencia (θ_i), bajo esta condición aplicando identidades trigonométricas, el ángulo ϕ se obtiene a partir del rayo reflejado intersecado por el eje óptico dando como resultado $\phi = \pi - \alpha$, aplicando identidades trigonométricas $\text{sen}[\phi]$ se convierte en $\text{sen}[\pi - \alpha]$ dando como resultado $\text{sen}[\alpha]$, en el caso del ángulo interno (α) el rayo reflejado intersecado con el eje óptico se convierte en $\alpha = \theta_i + \theta_r$ si $\theta_i = \theta_r$, $\alpha = 2\theta_i$. En el caso del ángulo β identificado en el Gráfico 2 se observa que es igual al ángulo del rayo incidente θ_i .

La recta de la normal se calcula usando el ángulo incidente $\theta_i = \arctan \left[\frac{h_s}{D_s} \right]$, donde h_s y D_s son las coordenadas sobre el contorno que forma la función de la superficie, para mostrar la familia de las normales se presenta la expresión (5).

$$F(x)_n = \frac{h_s}{D_s} x \quad (5)$$

Por otro lado, la tangente a la superficie de Fresnel (Gráfico 2) es perpendicular a la normal como se muestra en la función (6)

$$F(x)_t = \frac{h_s}{D_s} (x - D_s) + h_s \quad (6)$$

Para obtener el rayo reflejado a la superficie de Fresnel se consideró la siguiente expresión: $\text{sen}[\alpha] = \text{sen}[2\theta_i]$, donde $\theta_i = \arctan\left[\frac{h_s}{D_s}\right]$ y sustituyendo en la expresión anterior da $\text{sen}[\alpha] = \text{sen}\left[2\left(\arctan\left[\frac{h_s}{D_s}\right]\right)\right]$ que es la expresión general que representa a la familia de todos los rayos reflejados como se observa en la función (7)

$$F(x)_t = \tan\left[2\left(\arctan\left[\frac{h_s}{D_s}\right]\right)\right] (x - D_s) + h_s \quad (6)$$

Las ecuaciones anteriores permiten trazar un solo rayo de incidencia, el cálculo de todos los rayos se logra mediante la iteración de cada uno de los puntos de las coordenadas de la superficie usando un lenguaje de programación y mediante “n” divisiones equidistantes de la superficie se forma la superficie de Fresnel como se muestra en el Gráfico 3, la envolvente que se genera de todos los rayos incidentes se denomina “Cáustica” (Cardona, N., y col., 1983), la cual permite concentrar a todos los rayos en una Distancia Focal Efectiva (DFE).

Las ecuaciones mostradas anteriormente son las que expresan de forma general cada trazo de rayo. Las ecuaciones anteriores no permiten trazar todos los rayos debido a que, su análisis es para uno sólo, pero usando un lenguaje de programación se puede mostrar todos los rayos, asignándole los valores que corresponde a cada punto de las coordenadas sobre la superficie, y también se puede generar el traslado de “n” divisiones equidistantes para formar la superficie de Fresnel, como se muestra en la Gráfico 3.

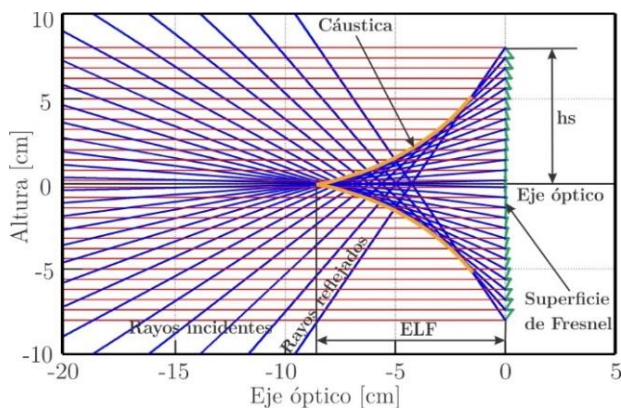


Gráfico 3 Trazo de “n” rayos para una superficie reflectora tipo Fresnel.
Fuente: Elaboración Propia

La envolvente que se genera de todos los rayos se le denomina “cáustica” para concentrar los rayos a una distancia focal efectiva (EFL). Las ecuaciones mostradas anteriormente son las que expresan de forma general cada trazo de rayo.

Resultados

La superficie de Fresnel fue construida empleando la función de la expresión (2), dividiendo e iterando la función en once puntos equidistantes generando la misma cantidad de prismas en revolución asimétricas del polinomio, se considera que los rayos incidentes provienen del infinito. Se trazaron los rayos observando que son paralelos y equidistantes como se observa en el Gráfico 4.

En la superficie se muestra una altura máxima (h_s), que es el límite de la región de interés útil para generar un concentrador tipo Fresnel. Para este caso particular, no podemos hablar de reflexión total interna y de una altura crítica, ya que al trazar los rayos incidentes en la superficie de Fresnel no genera dobles reflexiones a la superficie, indicando que se trata de una superficie simétrica como se ve en la Gráfico 4.

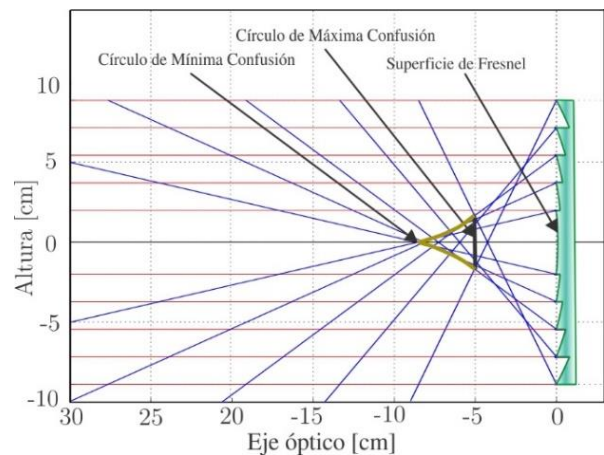


Gráfico 4 Trazo de “11” rayos para una superficie reflectora tipo Fresnel
Fuente: Elaboración Propia

Al graficar el trazo de rayos se observa el comportamiento de los rayos que forman la superficie de revolución de forma libre tipo Fresnel que se utilizó en el arreglo experimental, en ella se puede apreciar que el círculo de máxima confusión y el círculo de mínima confusión en el intervalo [-8.0 cm -5.0 cm]. esto permite conocer la distancia a la cual se colocará el absorbedor, para ver la envolvente que generan todos los trazos de rayos reflejados.

Para el caso de una superficie circular el análisis del trazo de rayos del absorbedor se coloca a una distancia de $[\frac{R}{2}, cm]$, debido a que es una superficie totalmente simétrica. Para este caso particular el absorbedor está colocado a $[\approx 8.0 cm]$. Valor generado por el ajuste de interpolación de Lagrange.

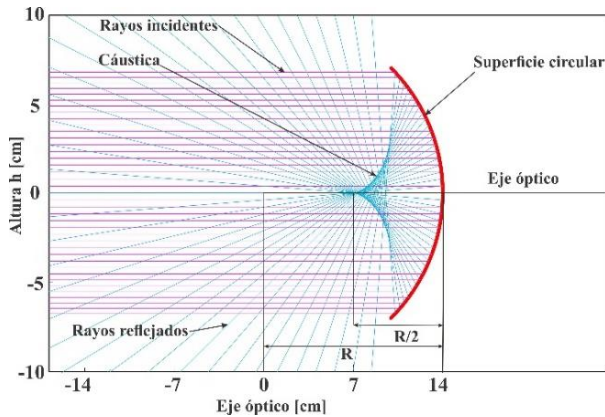


Gráfico 5 Trazo de rayos en una superficie circular
Fuente: *Elaboración Propia*

El modelo de la superficie libre de forma tipo Fresnel fue elaborado empleando un programa en CAD ver Figura 1. El cual fue exportado en el formato para su impresión en impresora 3D usando la extensión *.stl.

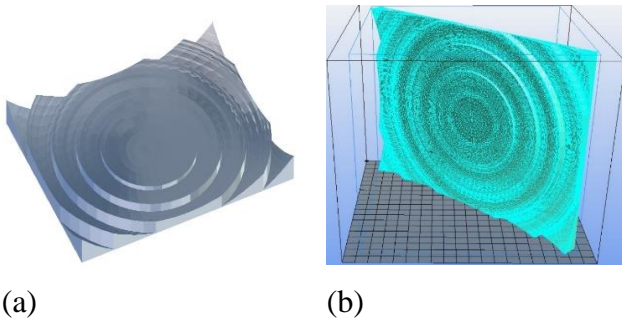


Figura 2 (a) Diseño en CAD de la superficie de revolución tipo Fresnel. (b) La Superficie de revolución para su impresión en

Una vez desarrollado el modelo, se extrae el archivo, empleando el software libre llamado "Repetier", y se coloca adecuadamente la pieza respetando el ángulo y la posición en los tres ejes, para posteriormente enviarse a la impresora 3D y de esa manera generar ambas piezas por separado, como se observa en la Figura 2 y Figura 3. Para el diseño se empleó un filamento PLA de color azul.

Hoy en día el uso de impresoras 3D presenta muchas ventajas debido a que sus aplicaciones son muy diversas en diferentes áreas como procesos industriales, ensamblajes, energía y en materiales de desecho, además de aplicaciones en medicina, salud, cultura, educación, construcción, alimentos, etc. Considerando que por medio de la impresión 3D se obtienen prototipos de producción rápida, ágil y variable en pequeños y grandes lotes, también presentan desventajas como son: desprendimiento de gases contaminantes al momento de fusionarse, el material PLA, al provenir de plantas similares al maíz, cuando se imprime genera partículas que invaden los pulmones y pueden provocar enfermedades respiratorias (Mejía, F., 2016).



Figura 3 Superficie de revolución impresa en 3D con material PLA
Fuente: *Elaboración Propia*

En el espectro electromagnético, un concentrador solar sólo usa el rango de la "Radiación Infrarroja" que es la fuente primaria de radiación y se le conoce como "calor" o "Radiación térmica". La cual se encuentra entre los $618 nm - 780 nm$ con una frecuencia de $400 THz - 470 THz$. En la Figura 4 se observa, la colocación de papel aluminio en la superficie de revolución 3D, debido a que tiene un alto valor de reflectancia en su máxima nivel (77 %), y el valor de la longitud de onda se encuentra dentro del rango ($660 nm - 690 nm$) de la reflectancia espectral aproximadamente (Echazú, R., y col., 2000).

Por otro lado, también se puede colocar en lugar de aluminio un espejo debido a que la Reflectancia del espejo aumenta un 4% más que el aluminio. Sin embargo, adherir el vidrio a la curvatura de la superficie es difícil, es por eso que en este trabajo se empleó el papel aluminio.

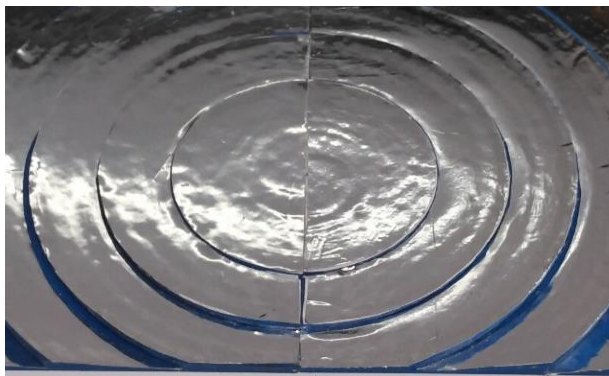


Figura 4 Colocación del reflejante usando aluminio adherible para realizar las pruebas de concentración
Fuente: *Elaboración Propia*

En el Gráfico 6 se muestra el comportamiento de la temperatura registrado en el arreglo experimental como se observa en la Figura 5, la medición se realizó empleando un sensor de temperatura tipo *K*, elaborado con alambre cromel- alumel calibre 20 el cual tiene un rango de temperatura de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una sensibilidad de $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. Posee resistencia a la oxidación cuando se aísla con fibra cerámica. Su resolución es de 0.1°C , con tolerancia de $\pm 0.1\%$ en las lecturas.

La temperatura fue medida en la parte interior del absorbedor colocándolo dentro de la distancia máxima confusión y Mínima confusión.



Figura 5 Pruebas del modelo impreso en 3D de temperatura a una DFE en el punto de concentración de la radiación solar
Fuente: *Elaboración Propia*

Los datos registrados durante un tiempo $t = 8.67\text{ seg}$, alcanza una temperatura de 505°C , observando un comportamiento lineal. Durante la medición se observaron variaciones de temperatura como se muestra en el Gráfico 6, debido a las variaciones que absorben, refractan o reflejan la irradiancia.

Se puede deber a fenómenos externos como son: el vapor de agua, el dióxido de carbono, las nubes y el polvo. Esta temperatura se registró en un área de 0.0256 m^2 , que es el área de la superficie libre de forma tipo Fresnel.

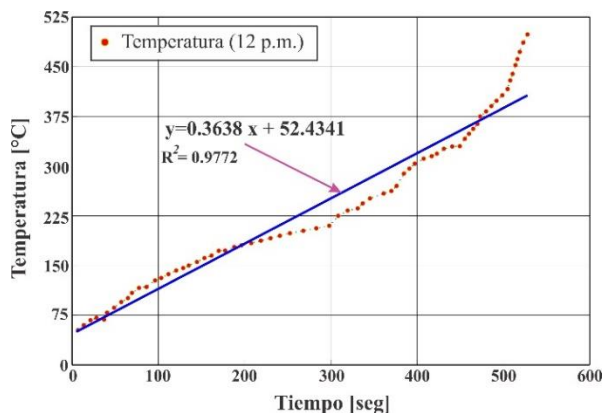


Gráfico 6 Comportamiento de la temperatura al aire libre sobre el círculo de confusión
Fuente: *Elaboración Propia*

Agradecimiento

Los autores agradecen al Centro Tecnológico de la Facultad de Estudios Superiores Aragón de la Universidad Nacional Autónoma de México, por las facilidades en el uso del Laboratorio de Medición e Instrumentación y Control, y al Laboratorio de Ingeniería Ambiental, por el manejo de los equipos de instrumentación, y a Jorge Pérez García y a Víctor Hugo Soriano Hernández por su colaboración técnica.

Conclusiones

La superficie reflectora tipo Fresnel fue construida empleando la función de ajuste polinomial de interpolación de Lagrange. Le superficie fue probada experimentalmente en los meses de abril y mayo, en la zona norte del Municipio de Nezahualcóyotl Estado de México. Registrando temperaturas promedio entre los $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los valores de temperatura muy por encima de las alcanzadas con absorbedores formados con termopares convencionales ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $250\text{ }^{\circ}\text{C}$), se encontró que el sulfato de calcio con material de uso para la construcción de superficies de revolución tipo Fresnel mejora las eficiencias de irradiación en comparación a superficies formadas con resinas. El uso de la impresora 3D permitió diseñar la superficie adecuadamente.

Referencias

- Bustos Fierro, I. H., & Calderón, J. H. (2002). Small field CCD astrometry with a long focus reflector telescope. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 38(2), 215-224.
- Cardona-Núñez, O., Pedraza-Contreras, J., Cornejo-Rodríguez, A., & Cordero-Dávila, A. (1983). Significado de las superficies causticas en óptica. *Rev. Mex. Fís.*, 29, 245-258.
- Castañeda Miranda, A., González Parada, A., Guzmán Cabrera, R., & Ibarra Manzano, O. G. (2012). Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. *Acta Universitaria*, 22(3), 14-19.
- Corominas, J. (2014). Los primeros minutos del efecto invernadero. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 11(1), 100-107.
- Echazú, R., Cadena, C., & Saravia, L. (2000). Estudio de materiales reflectivos para concentradores solares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4(8.118), 19.
- Echeverría Palacio, C. M., Ramírez Grueso, R., Coba Torres, K., & Orfa Roja, M. (2006). Bioquímica en la vida diaria: el equilibrio químico y la función transportadora de la hemoglobina. *Revista Ciencias de la Salud*, 4(2), 109-115.
- Galindo, I., Castro, S., & Valdés, M. (1991). Satellite derived solar irradiance over Mexico. *Atmósfera*, 4(3), 189-201.
- Hesthaven, J. S. (1998). From Electrostatics to Almost Optimal Nodal Sets for Polynomial Interpolation in a Simplex. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 35(2), 655-676.
- Hsiao, T. C., Chen, T. L., Chen, T. S., & Li, Y. (2018, 13-17 April 2018). *Based on lagrange interpolation for smart sensors*. Paper presented at the 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI).
- Kimberling, C. (1986). Lagrange Polynomials. *The Mathematics Teacher*, 79(5), 368-373.
- López, J., & Alarcón, M. (2011). Sulfato de calcio: propiedades y aplicaciones clínicas. *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*, 4, 138-143.
- Mejía Flores, H. J. (2016). Ventajas Y Desventajas de las impresoras 3D. *Revista Tecnológica*, 12, 30-34.
- Mercado, C., & Lam, E. (2015). Evaluación de un sistema de desalinización solar, Tipos de concentrador cilíndrico parabólico de agua de mar. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6(4), 19-28.
- Narasimhan, M. S., & Malla, Y. B. (1972). Paraboloidal-reflector illumination with conical scalar horns. *Electronics Letters*, 8(5), 111-112. doi: 10.1049/el:19720080
- Neill, M. J. O. (1988, 26-30 Sept. 1988). *An advanced space photovoltaic concentrator array using Fresnel lenses, gallium arsenide cells, and prismatic cell covers*. Paper presented at the Conference Record of the Twentieth IEEE Photovoltaic Specialists Conference.
- Pacheco Luján, W. (2006). Colector parabólico compuesto para therma solar. *Industrial Data*, 9(2), 7-9.
- Poveda Ramos, G. (2016). La interpolación de Lagrange en el espacio Rm. *Revista EIA*, 13(25), 29-44.
- Riesco-Ávila, J. M., Gallegos-Muñoz, A., Montefort-Sánchez, J. M., & Martínez-Martínez, S. (2005). Procesos alternativos de combustión en motores de combustión interna. *Acta Universitaria*, 15(1), 36-54.
- Rodríguez, V., & Mejía, Y. (2010). Optimización De Un Concentrador Solar Para Celdas Fotovoltaicas. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 8(2).
- Ruelas Ruiza, J. E., Velázquez Limón, N., & Beltrán Chacón, R. (2011). Diseño de un Concentrador Solar Acoplado a un Motor Stirling Fijo. *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, 4(1), 15-21.
- Sanford, V. (1934). Joseph Louis Lagrange: Born at Turin, January 25, 1736 Died in Paris, April 10, 1813. *The Mathematics Teacher*, 27(7), 349-351.

Serrano, J. C., & Carranza SÁNchez, Y. A. (2005). Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural. *Scientia Et Technica*, XI(29), 139-143.

Sherif, R. A., King, R. R., Karam, N. H., & Lillington, D. R. (2005, 3-7 Jan. 2005). *The path to 1 GW of concentrator photovoltaics using multijunction solar cells*. Paper presented at the Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.

Terrés, H., Ortega, A., Gordon, M., Morales, J. R., & Lizardi, A. (2008). Evaluación de reflectores internos en una estufa solar de tipo caja. *Científica*, 12(4), 175-183.

Valle, F. A. (1995). Riesgo de asfixia por suboxigenación en la utilización de gases inertes. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, 340, 1-6.