

Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2024,
Volumen 8, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2

DISEÑO GEOMÉTRICO DE UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO LINEAL

DESIGN OF A LINEAR PARABOLIC SOLAR CONCENTRATOR

Omar Christian Benítez Centeno

Tecnológico Nacional de México IT de Zacatepec

Erik López García

Tecnológico Nacional de México IT de Zacatepec

Minerva Guadalupe Vargas Vega

Tecnológico Nacional de México IT de Zacatepec

Enrique de Jesús Moreno Carpintero

Tecnológico Nacional de México IT de Zacatepec

Roger Alejandro Cundapí Arroyo

Cenidet (Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico)

Juan Carlos Sánchez Flores

Tecnológico Nacional de México IT de Zacatepec

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11644

Diseño geométrico de un concentrador solar parabólico lineal

Omar Christian Benítez Centeno¹

omar.bc@zacatepec.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5756-1912>

Tecnológico Nacional de México

IT de Zacatepec

México

Erik López García

erik.lg@zacatepec.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2667-6474>

Tecnológico Nacional de México

IT de Zacatepec

México

Minerva Guadalupe Vargas Vega

minerva.vv@zacatepec.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3900-6293>

Tecnológico Nacional de México

IT de Zacatepec

México

Enrique de Jesús Moreno Carpintero

enrique.mc@zacatepec.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5472-1503>

Tecnológico Nacional de México

IT de Zacatepec

México

Roger Alejandro Cundapí Arroyo

royer.ca@cenidet.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3510-9060>

Tecnológico Nacional de México

Cenidet (Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico)

México

Juan Carlos Sánchez Flores

119090200@zacatepec.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0007-5436-9451>

Tecnológico Nacional de México

IT de Zacatepec

México

RESUMEN

La tecnología que se desarrolle para aprovechar el recurso solar de irradiancia a nivel mundial tendrá una tendencia ascendente muy importante hacia el 2050, el presente trabajo propone el diseño geométrico de un concentrador (colector) solar parabólico para aprovechar los elementos constitutivos para su construcción basándose en materiales disponibles comercialmente (hojas de acero inoxidable acabados espejo), después de un cálculo del perfil de la parábola que es función de punto focal, se realizó un análisis para determinar el flujo de calor sobre el tubo absorbedor con diferentes distancias focales, a su vez se evaluaron las geometrías de los reflectores conforme se varía la distancia focal para asegurar que la distancia focal a usarse sea adecuada, desde el punto de vista geométrico y óptico, una distancia focal de 0.8 podría estar en un valor intermedio entre mayor zona de concentración y menor valor del pico máximo de concentración. Sin embargo, un análisis térmico debe ser hecho para garantizar que el tubo absorbedor trabajará bajo condiciones seguras desde el punto de vista térmico.

Palabras clave: diseño, concentrador solar parabólico lineal, radiación solar, transferencia de calor

¹ Autor principal.

Correspondencia: erik.lg@zacatepec.tecnm.mx

Design of a Linear Parabolic Solar Concentrator

ABSTRACT

The technology developed to harness the solar irradiance resource on a global level will have a very significant upward trend by 2050. This work proposes the geometric design of a parabolic solar concentrator (collector) to take advantage of the constituent elements for its construction based on commercially available materials (mirror-finish stainless steel sheets). After calculating the parabolic profile, which is a function of the focal point, an analysis was conducted to determine the heat flow over the absorber tube with different focal distances. Additionally, the geometries of the reflectors were evaluated as the focal distance varied to ensure that the focal distance used is adequate. From a geometric and optical standpoint, a focal distance of 0.8 could be an intermediate value between a larger concentration area and a lower value of the maximum concentration peak.

Keywords: desing, linear parabolic solar concentrator, solar radiation, heat transfer

Artículo recibido 15 febrero 2024

Aceptado para publicación: 15 marzo 2024

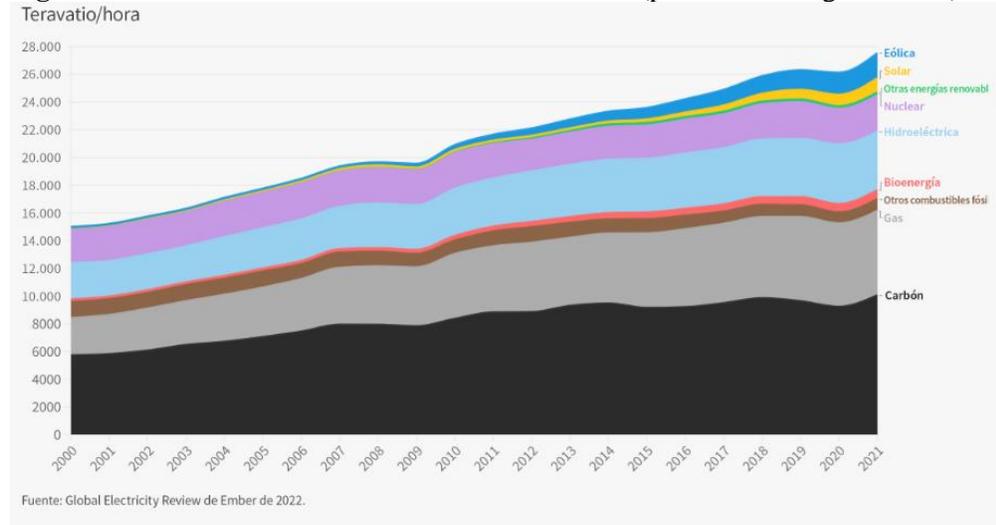


INTRODUCCIÓN

En la literatura se reportan trabajos sobre colectores solares parabólicos (CPC) y de sus aplicaciones en la industria. A continuación, se presenta un análisis de lo reportado por autores representativos y que permiten contextualizar a los CPC para la generación de energía eléctrica y aplicaciones industriales. Actualmente para generar energía eléctrica se tiene un alto consumo de combustibles fósiles (combustóleo, gas natural y carbón), esto implica también altos niveles de contaminación ambiental, a nivel mundial esto agudiza la problemática del incremento de temperatura atmosférica y el cambio climático por las emisiones de los gases de efecto invernadero, el consumo energético a nivel mundial en los próximos años prevé que el uso de gas continuará incrementándose con una tasa anual de crecimiento del 1.6 % al 1.8 % al 2040, mientras que la del petróleo será del 0.8 %. El carbón tendrá un decremento, calculándose en el 0.2 %. Se estima que el petróleo, que actualmente satisface en promedio el 31 % del total energético requerido, pasará a satisfacer solo el 25 % de la energía consumida en 2040; por su parte, el uso del carbón pasará del 35 % en 2014 al 25 % en 2040, y el uso del gas incrementará del 21 % actual al 23 %; en tanto que las energías renovables que se utilizan actualmente en un 1 %, se estima que incrementarán 4.8 % en 2040. El porcentaje restante se distribuye en hidráulico, biomasa y nuclear (Agüero-Rodríguez et al., 2015; Beltrán-Telles et al., 2017; Bose, 2013). Por otra parte, el aprovechamiento de la energía solar (radiación solar), principalmente tiene dos aplicaciones con la finalidad de satisfacer la generación de energía eléctrica y en aplicaciones industriales. Para la generación de energía eléctrica por el método fotovoltaico en el 2022, de un total de la generación mundial de energía eléctrica de 20,190 TWh, de los cuales 1,178 TWh fue producida por energía solar representando un 4.5% del total (*Global Electricity Review 2022 | Ember*, n.d.), contra un 2.6% en 2019 (*Electricidad: Generación Mundial Por Fuente Energética | Statista*, n.d.). Este porcentaje tiene una tendencia de crecimiento, ver la Figuras 1 y 2. Pero no hay toda vía un aprovechamiento en auge de la segunda aplicación de la energía solar radiante por métodos fototérmicos, es decir este es un gran campo de oportunidad y desarrollar tecnología para calentamiento de agua y generación de vapor de agua para la industria, que mitigue las emisiones de gases invernadero y no contribuir al calentamiento global terrestre (*Mapas | Secretaría de Desarrollo Sustentable*, n.d.; Welty et al., 2020).

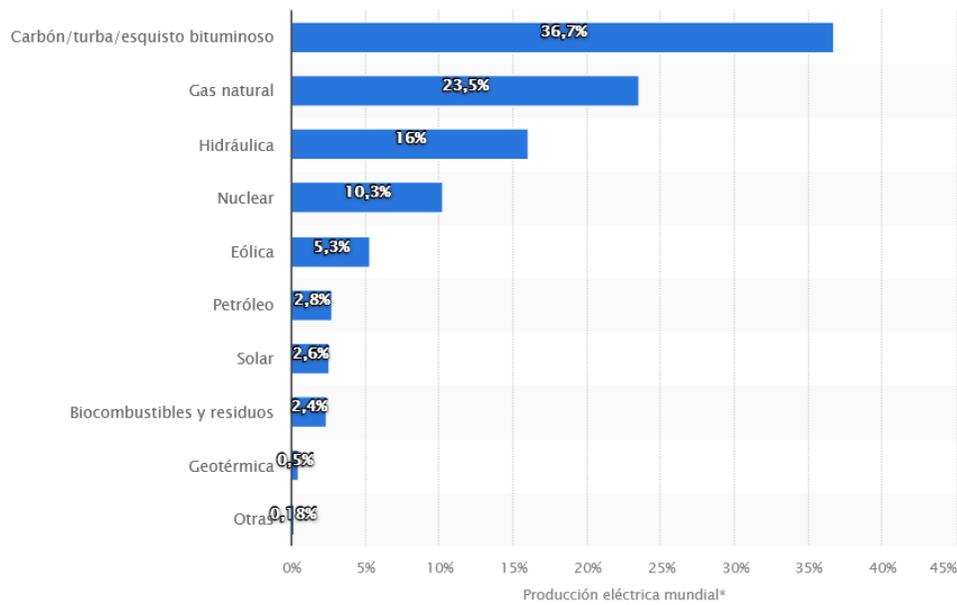


Figura 1. Generación de electricidad a nivel mundial (por fuentes de generación)



La generación de energía eléctrica a partir de un ciclo de potencia basado en las configuraciones del ciclo de Rankine pero cuya fuente calorífica en el generador de vapor pueda aprovechar en lo más posible el potencial de energía en el recurso solar, y así incrementar fuentes renovables como cultura tecnológica y social, al tiempo que se disminuyen las emisiones contaminantes y la dependencia de los hidrocarburos de los cuales aún hay una fuerte dependencia. Se aprecia la marcada dependencia de fuentes no renovables y el área de oportunidad para la fuente de origen solar con un 2.6% y su potencial de explotación. Aquí hay un nicho en investigación básica y aplicada para incrementar la eficiencia de desempeño en diversas tecnologías como: a) las centrales termo solares de colectores solares parabólicos, b) las centrales termo solares de heliostatos con central en torre, c) centrales termo solares con reflectores lineales Fresnel y d) centrales termo solares con discos parabólicos de Stirling (Barrera, 2016).

Figura 2. Porcentaje de electricidad generada en el mundo por fuente para el año 2019.



El potencial de recurso solar de radiación solar tendrá un papel importante y pasará del pequeño margen de contribución, a llegar a ser de las más importantes fuentes energética en el 2050, especialmente para los sistemas termo solares (en la industria), esta tecnología hasta ahora se insiste, ha sido poco aprovechada. Esto da pie para la propuesta de trabajos que permitan aprovechar el área de oportunidad en la tecnología fototérmica para resolver necesidades térmicas en la industria (FLORES MONTIJO, 2018).

Centrándonos en los CPC, se presentan problemas de fallas mecánicas en los materiales de la tubería y en accesorios ocasionadas por las altas temperaturas y presiones durante su operación que lleva a interrumpir la producción de vapor y hasta costo del mismo CPC. Hay varias propuestas en la literatura sobre diseños en los que principalmente se abordan las características de los concentradores CPC como la determinación de las dimensiones de la parábola (longitud de arco del CPC, punto focal, trazado de rayos), las características del fluido de trabajo (termoportador: agua o aceite), material de la superficie captadora (aluminio con plata, acero inoxidable con acabado espejo, etc), materiales y diseño de la base de soporte mecánico, viabilidad de recurso solar de irradiancia, temperatura y presión de operación como lo reportan (Al Hashmi, 2015; Ameer & Shahad, 2017; Bhalla et al., 2022; Echevarría López, 2012; Monreal, 2012; Sadhana et al., 2014), sin embargo, no se cuenta con un marco normativo específico para el diseño,

instalación y puesta en marcha de proyectos solares térmicos aplicados en procesos industriales, pero ya existe experiencia documentada de la implementación de este tipo de proyectos desde el año 2001 (proyectos solares térmicos en diferentes subsectores industriales entre el periodo 2001-2017: minería, industria de lácteos, industria farmacéutica, esterilización médica, agricultura y pesca, industria del nixtamal y la tortilla, industria del pan, industria de lubricantes, entre otras). Desde la perspectiva de toda la matriz energética del país, el Balance Nacional de Energía reporta un consumo de 0.617 PJ de energía solar en el sector industrial durante 2016, sin embargo, al estar clasificado dentro del subsector industrial denominado “Otras ramas” se desconoce el tipo de industria específica en las que fueron implementados estos sistemas solares (R Rubio et al., 2018; Rodríguez Rubio et al., 2018).

METODOLOGÍA

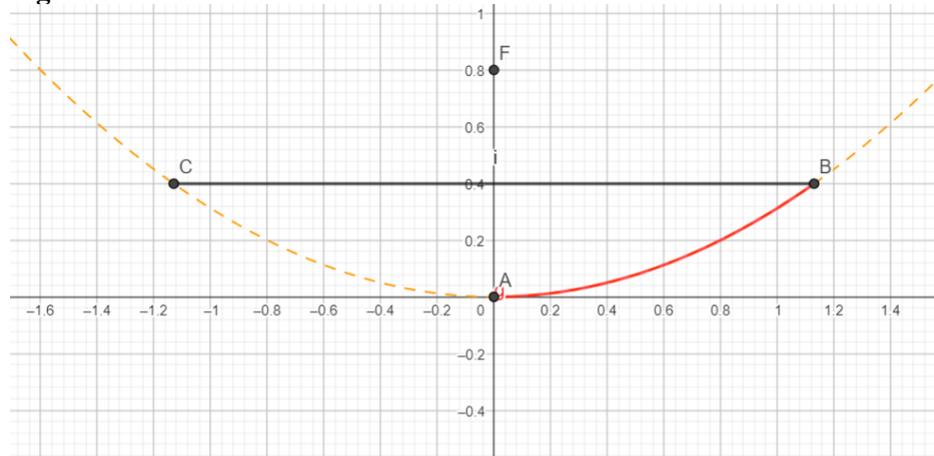
Un colector o también llamada concentrador cilindro parabólico es un dispositivo que consiste en un reflector parabólico cilíndrico con chapa de aluminio y un receptor de tubo de metal denominado tubo absorbedor colocado en el punto focal . El colector pudiera tener la característica de orientarse para seguir el movimiento diurno del sol y así incrementar la eficiencia de captación solar de irradiancia. El tubo absorbedor es de color negro para que por propiedad óptica posea una mayor absorción térmica, además el absorbedor puede estar contenido coaxialmente dentro de un tubo de vidrio al vacío para minimizar las pérdidas convectivas de calor. Al interior del tubo absorbedor se hace circular el fluido de trabajo que puede ser un aceite o agua, este incrementará su nivel energético térmico manifestado en la temperatura y presión (Atheaya, 2017; Ramachandran et al., 2022; Tiwari et al., 2017).

El presente diseño se desprende de los parametros geometricos, se puede conocer el perfil de la parabola si el vertice y su directriz coincide con el centro del origen de un plano (x,y), esto de acuerdo a la ecuación [1], donde (h) es la distancia desde el origen del plano hasta el vértice de la parábola en la dirección de las abscisas y (p) es la distancia focal:

$$(x-h)^2 = 4p(h, k+p) \quad [1]$$

La apertura (W), del colector solar parabólico equivale al lado recto (\overline{CB}), es de 2.26 m, siendo las coordenadas de los puntos $C(C_x, C_y)$ y $D(D_x, D_y)$. La distancia focal (p o F) es de 0.8 m, la longitud de arco resulta de 2.44 m, esto se puede apreciar en la Figura 3, el área o superficie reflectiva expuesta a la radiación solar es de 8.784 m^2 , pues la longitud del colector es de 3.6m:

Figura 3. Parábola del concentrador solar lineal.



Análisis de la distribución de flujo de calor al variar la distancia focal: se probaron diferentes configuraciones en función de la distancia focal (p). Aquí se analiza la distribución del flujo de calor sobre el diámetro del tubo absorbedor con un diámetro de 1 pulgada. El promedio del flujo de calor es obtenido para cada caso de distancia focal, siendo el caso que proporcione el mayor promedio con una distribución lo más homogénea posible la que se seleccione para el modelo final.

En la Tabla 1 se muestran las características geométricas del espejo reflector en función de la distancia focal. A su vez se determinó el ángulo de borde (ψ_{rim}), en la Figura 4 se aprecian las geometrías de los reflectores conforme se varía la distancia focal. En dicha figura se puede ver que cuando la distancia focal es 0.1 m, el ancho de apertura es el menor de todos los casos. Conforme la distancia focal incrementa, la apertura incrementa.

Tabla 1. Configuraciones geométricas en función de la distancia focal

p [m]	C_x [m]	B_x [m]	W [m]	ψ_{rim} [°]
0.1	-0.6277	0.6277	1.2554	144.65
0.2	-0.8163	0.8163	1.6327	127.79
0.3	-0.9276	0.9275	1.8552	114.21
0.4	-1.0004	1.0004	2.0007	102.7
0.5	-1.0504	1.0504	2.1008	92.82
0.6	-1.0861	1.0861	2.1722	84.29
0.7	-1.1122	1.1122	2.2243	76.93
0.8	-1.1317	1.1317	2.2634	70.54
0.9	-1.1466	1.1466	2.2932	64.99
1	-1.1582	1.1582	2.3164	60.15

También se analizaron las distribuciones del flujo de calor sobre la tubería con diferentes distancias focales. Para ello, primero obtenidas las distribuciones se calculó el promedio (media aritmética) de cada caso, y se observó que, con la menor distancia, el promedio de la Relación de Concentración Local (LCR) es muy bajo, mientras que conforme se incrementa la distancia focal, la LCR promedio incrementa tendiendo a un valor casi constante a partir de 0.9 m, aproximadamente. Arriba de esos valores el promedio no incrementa (ver Figura 5).

Figura 4. Geometrías de los reflectores conforme se varía la distancia focal.

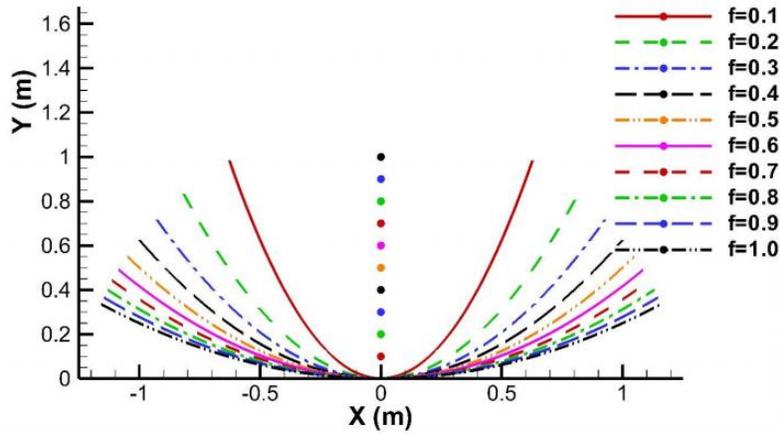
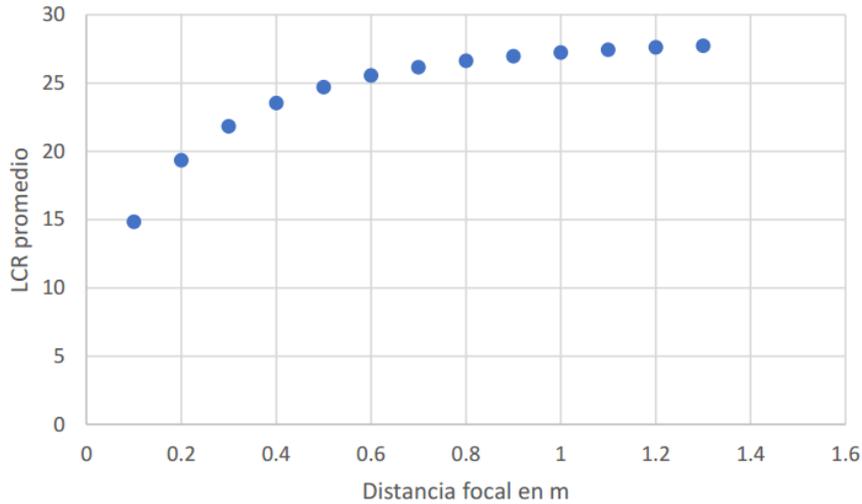
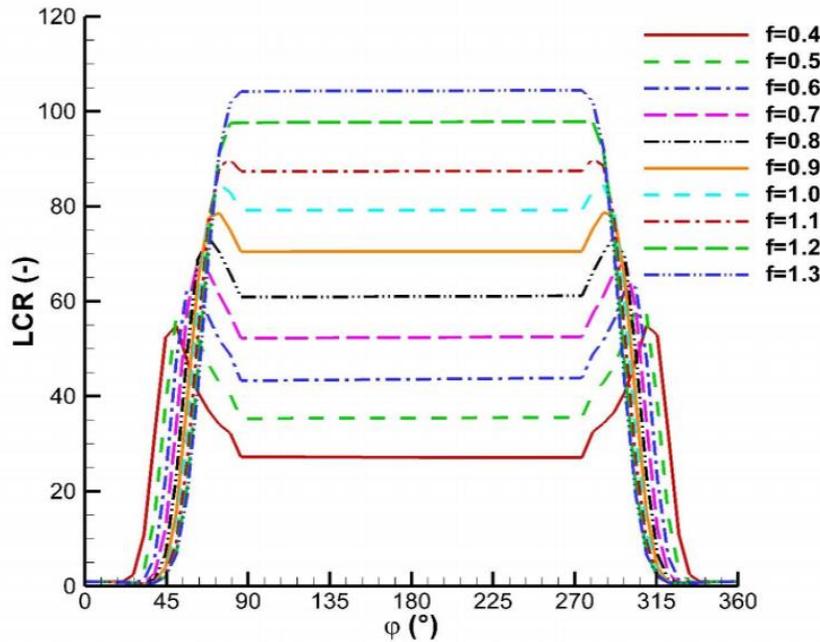


Figura 5. Comportamiento de la LCR promedio en función de la distancia focal para un diámetro de tubería de 1m.



En la figura 6 se muestran los perfiles de la distribución de flujo de calor para un diámetro del tubo absorbedor de 1 pulgada de diámetro como función de la LCR, se gráfica el ángulo circunferencial (φ) contra la LCR.

Figura 6. Perfiles de distribución de flujo de calor para diferentes distancias focales para un diámetro de tubería de 1 in



Los parámetros termofísicos se calculan de acurso a las siguientes relaciones, primero el calor ganado por el fluido de trabajo en watts (Q_f) que pasa por el concentrador, siendo (T_{fs}) la temperatura del fluido a la salida en [°C] y (T_{fi}) la temperatura del fluido en la entrada en [°C] y (\dot{m}) el flujo másico [kg/s]:

$$Q_f = \dot{m}cp(T_{fs} - T_{fi}) \quad [2]$$

El flujo de calor entregado por el calor entregado por el concentrador solar (Q_c) en [W], aquí (T_a) es la temperatura ambiente en [W], F_R es el factor de flujo del concentrador solar, (A_a) es el área de apertura del concentrador solar [m²], (A_r) es el área externa del tubo absorbedor [m²], (U_L) es el coeficiente de pérdidas totales del concentrador solar [W/m²K]:

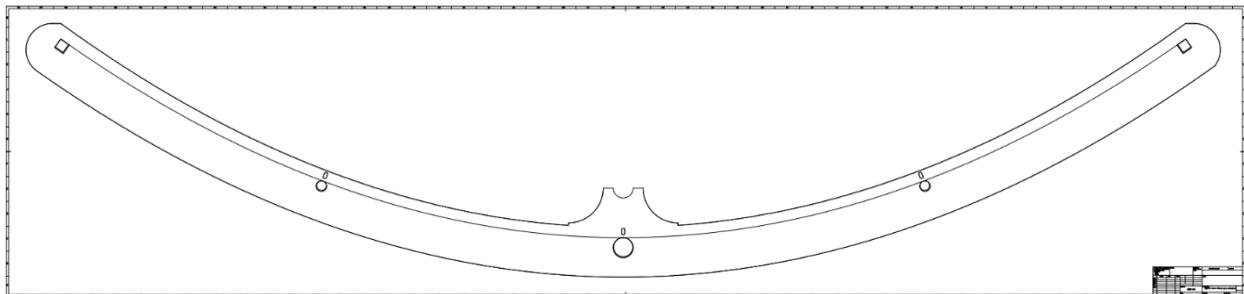
$$Q_c = F_R A_a \left[S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_{fe} - T_a) \right] \quad [3]$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se muestra la comparación de los perfiles azimutales del LCR para diferentes distancias focales. En interés particular para estos perfiles que están centrados para los rangos de 0.7 hasta 1.3 m de distancia focal. Ya que a partir de esas distancias focales se está tendiendo a los valores máximos. Se debe

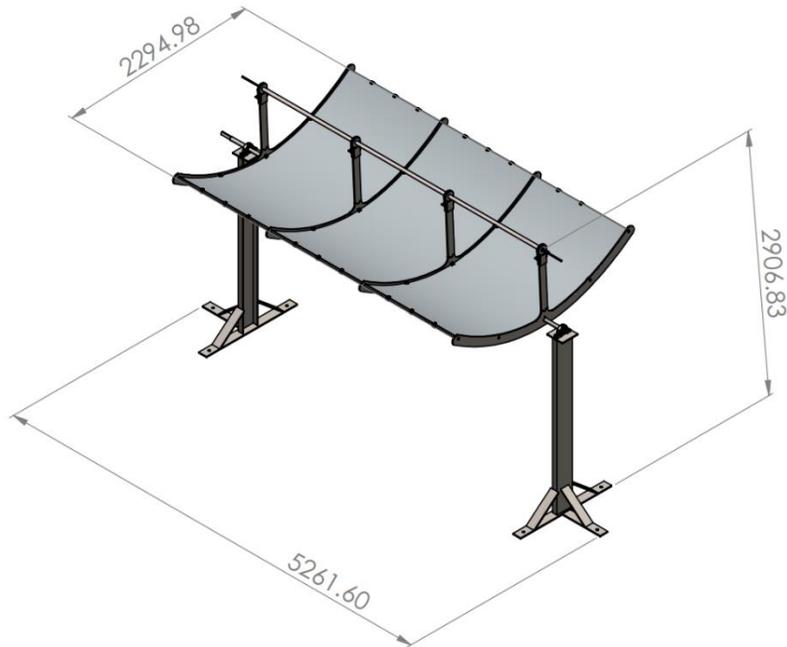
observar que conforme la distancia focal incrementa, el valor máximo alcanzado (en la zona más amplia de LCR) es mayor, pero el perímetro que abarca esa concentración disminuye. Lo cual hace que se esté enfocando la radiación en menor perímetro, pudiendo ocasionar gradientes de temperatura elevados. Por otra parte, a valores más pequeños de distancia focal, se tienen picos máximos de concentración. Que también pudieran ocasionar gradientes térmicos grandes. Un análisis térmico debe ser realizado para poder determinar la distancia focal adecuado para garantizar que no se presentarán gradientes térmicos indeseables. Sin embargo, desde el punto de vista geométrico y óptico, una distancia focal de 0.8 podría estar en un valor intermedio entre mayor zona de concentración y menor valor del pico máximo de concentración. Con lo anterior se obtuvo el diseño geométrico del concentrador parabólico lineal. A continuación se presenta en la Figura 7, el soporte que contiene el perfil de la parábola que guarda las características geométricas ya desarrolladas previamente, este es el diseño antes de su manufactura.

Figura 7. Soporte que contienen el perfil parabólico del concentrador parabólico lineal.



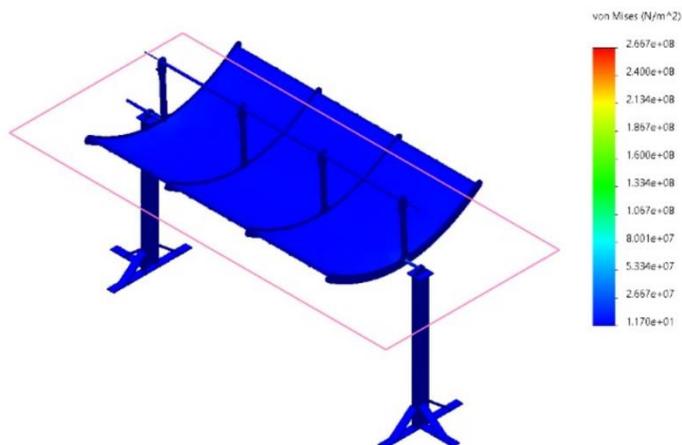
Ya integrado con los demás elementos del diseño (lámina reflectora en acabado espejo, bases y tubo absorbedor), en la Figura 9 se aprecia el diseño del concentrador solar parabólico lineal en su ensamble:

Figura 9. Ensamble del concentrador parabólico lineal del presente proyecto.



Finalmente, en la Figura 10, aparece el análisis estático de esfuerzos en el concentrador solar parabólico lineal, del cual se puede ver que no hay esfuerzos en el límite de fallos para el material elegido que es acero A36.

Figura 10. Análisis estático del concentrador solar parabólico lineal.



CONCLUSIONES

Un análisis geométrico y óptico puede ser útil para calcular los parámetros de diseño y para obtener una referencia de un valor adecuado de la distancia focal. Sin embargo, un análisis térmico debe ser hecho para

garantizar que el tubo absorbedor trabajará bajo condiciones seguras desde el punto de vista térmico. Para los casos analizados, se puede manejar una distancia focal de 0.8 m de acuerdo al estudio aquí presentado, del cual se desprenden las subsecuentes razones geométricas del concentrador solar parabólico líneal.

El análisis térmico nos ayudo a determinar la distancia focal adecuado para garantizar que no se presenten gradientes térmicos indeseables. Sin embargo, podemos considerar otros factores que pueden mejorar nuestro diseño, haciendo con esto que tengamos un mejor aprovechamiento de la energía recibida o captada por dicho colector.

La radiación en menor perímetro, ocasiona gradientes de temperatura elevados. Por otra parte, a valores más pequeños de distancia focal, se tienen picos máximos de concentración. Que también pudieran ocasionar gradientes térmicos grandes. Es importante considerar estos factores para cualquier tipo de diseño de colector solar, para poder garantizar la eficiencia energética de dicho equipo.

Es evidente que otros factores a mejorar podría ser el tiempo de material a seleccionar, que contribuyan a una mejor captación de la radiación solar, sin embargo, debemos tener considerar que el calor que puede estar recolectando podría afectar a nuestro colector, y es aquí donde entrar otro tema a tratar, que sería el sistema de enfriamiento que podemos tomar en cuenta más adelante.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agüero-Rodríguez, J. C., Tepetla-Montes, J., & Torres-Beristáin, B. (2015). Producción de biocombustibles a partir de la caña en Veracruz, México: perspectivas y riesgos socio-ambientales. *CienciaUAT*, 9(2), 74. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v9i2.728>
- Al Hashmi, S. S. A. (2015). *Design, Fabrication and Testing of Hybrid Parabolic Dish Concentrator, Stirling Engine & PCM-Storage in Oman*. University of Leeds.
- Ameer, S. A. A., & Shahad, H. A. K. (2017). Characteristics review of optical concentrators. *Int. J. Curr. Eng. Technol*, 7(1), 168–182.
- Atheaya, D. (2017). *Review on solar thermal power concentrators*.
- Barrera, G. R. (2016). Prototipo de un colector solar parabólico para la generación de energía eléctrica. *UGCiencia*, 22(1), 149–158.



- Beltrán-Telles, A., Morera-Hernández, M., López-Monteagudo, F. E., & Villela-Varela, R. (2017). Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica. *CienciaUAT*, 11(2), 105. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v11i2.742>
- Bhalla, V., Khullar, V., & Parupudi, R. V. (2022). Design and thermal analysis of nanofluid-based compound parabolic concentrator. *Renewable Energy*, 185, 348–362.
- Bose, B. K. (2013). Global energy scenario and impact of power electronics in 21st century. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(7), 2638–2651. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2203771>
- Echevarría López, C. (2012). *Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua*.
- Electricidad: generación mundial por fuente energética* | Statista. (n.d.). Retrieved June 22, 2024, from <https://es.statista.com/estadisticas/600383/electricidad-generada-en-el-mundo-por-fuente-energetica/>
- FLORES MONTIJO, N. O. É. A. R. I. (2018). *Evaluación de la eficiencia térmica de un colector solar de tubos evacuados para aire de secado*.
- Global Electricity Review 2022* | Ember. (n.d.). Retrieved June 22, 2024, from <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/>
- Mapas* | Secretaría de Desarrollo Sustentable. (n.d.). Retrieved June 22, 2024, from <https://sustentable.morelos.gob.mx/cc/mapas>
- Monreal, J. A. (2012). *Diseño de un concentrador solar lineal tipo fresnel de baja entalpía para calor de procesos*. Xalapa, Veracruz: UNIVERSIDAD VERACRUZANA.
- R Rubio, F., Navas, S. J., Ollero, P., Lemos, J. M., & Ortega, M. G. (2018). Control óptimo aplicado a campos de colectores solares distribuidos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 15(3), 327–338.
- Ramachandran, S., Nene, A. A., & Suyambazhahan, S. (2022). Studies on Scheffler solar concentrator to optimise thermal efficiency. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 3138–3145.
- Rodríguez Rubio, F., Navas Herrera, S. J., Ollero de Castro, P. A., Lemos, J. M., & Ortega Linares, M. G. (2018). Control Óptimo Aplicado a Campos de Colectores Solares Distribuidos. *Revista*



Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 15 (3), 327-338.

Sadhana, B., Prasad, L. S. V., & Satyanand, G. (2014). Design aspects of cylindrical parabolic concentrator for sterilization. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(8), 203–209.

Tiwari, G. N., Atheaya, D., & Tiwari, A. (2017). Review on solar thermal power concentrators. *Open Access J. Photoenergy*, 1, 16.

Welty, J., Rorrer, G. L., & Foster, D. G. (2020). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. John Wiley & Sons.

