

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de La Laguna

División de estudios de posgrado e investigación

**“Análisis, Simulación y Diseño de un Concentrador Solar para conseguir
Flujos radiativos de perfil Homogéneo”**

por

Ing. Luis Andrés Amat Castrillón

TESIS

**Presentada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en
Ciencias en Ingeniería Eléctrica**

**DIRECTOR DE TESIS
Dr. Lúar Moreno Álvarez**

ISSN: 0188-9060



**RIITEC: (04)-TPIE-2018
Torreón, Coahuila. México,
Junio de 2018**

Agradecimientos

TECNM-ITL

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de la Laguna.

CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. (Beca para estudios de maestría).

PRODEP

Programa para el Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior. (Proyecto PTC-ITLAG-007).

LACYQS

Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar.

IER-UNAM

Instituto de Energías Renovables de la Universidad Autónoma de México.

Resumen

En el aprovechamiento de energía solar los sistemas de alta concentración son una opción viable para satisfacer energéticamente diversos procesos industriales. Las principales desventajas de estos sistemas de concentración es el control de la temperatura de operación, las pérdidas de calor asociadas al proceso y la distribución de la radiación concentrada. Los gradientes de temperatura inducidos por una distribución no uniforme ocasionan en los materiales un deterioro considerable debido a las altas temperaturas de concentración las cuales alcanzan los puntos de fusión. En este trabajo se analiza, simula y diseña un concentrador solar de alto flujo radiativo que sea capaz de generar perfiles de intensidad de flujo homogéneo, Para ello se abordan: 1) los fundamentos teóricos de la transferencia de calor por radiación para el estudio de la energía solar térmica de concentración; 2) el análisis teórico de la óptica y geometría de concentración, para conocer la relación que tienen las variables involucradas en el proceso de captación de la energía infrarroja proveniente del Sol en un receptor; 3) el análisis del modelo básico de mezcla estadística propuesto para combinar los perfiles gaussianos individuales producidos por la reflexión en los elementos de una óptica de concentración solar, y obtener perfiles homogéneos conociendo las características ópticas de los espejos reflectores; 4) simulaciones numéricas, mediante paquetes computacionales de trazado de rayos, que comprueban la homogeneización de los perfiles de concentración, considerando parámetros de alineación de los espejos para conseguir la obtención de flujos homogéneos; 5) el diseño de los elementos mecánicos y las especificaciones de diseño que proporcionen la movilidad adecuada de los espejos para poder direccionar la reflexión de los rayos a voluntad, y el diseño de del concentrador solar propuesto para la realización de pruebas y experimentación.

Contenido

1. Introducción.....	5
1.1 Importancia de la energía solar térmica en México y la región.....	6
1.2 Hipótesis.....	10
1.3 Objetivos generales.....	10
2. Antecedentes teóricos de los sistemas de concentración solar.....	10
2.1 Tipos de colectores y concentradores solares.....	10
2.2 Método de concentración solar propuesto y su panorama de desarrollo mundial.....	14
2.3 Fundamentos teóricos de la concentración solar.....	23
2.3.1 Radiación térmica y propiedades optotérmicas de los campos.....	23
2.3.2 Intensidad radiativa solar.....	28
2.3.3 Razón de concentración de flujos radiativos y límites termodinámicos.....	32
2.4 Óptica geométrica de las superficies reflectoras.....	34
2.4.1 Óptica geométrica de la superficie reflectora plana.....	34
2.4.2 Óptica geométrica de superficies reflectoras cóncavas: parábola y esfera.....	36
3. Simulación numérica del sistema de concentración para conseguir flujos radiativos.....	41
3.1 Perfiles de concentración de flujo homogéneo.....	41
3.1.4 Herramientas y metodologías para simulación numérica de flujos radiativos: SolTrace.....	45
3.2 Homogeneización de flujo por realineación de espejos.....	46
3.1.2 Región efectiva de homogeneización.....	49
3.3 Teoría de homogeneización de flujos por mezclado estadístico gaussiano.....	52
3.4 Simulación de flujo de 2 espejos.....	55
3.5 Simulación de flujo de 24 espejos.....	60
4. Diseño de sistemas de alineación de espejos concentradores y horno solar de alto flujo radiativo.....	64
4.1 Análisis geométrico del mecanismo.....	66
4.2 Análisis de los grados de libertad del mecanismo.....	68
4.3 Análisis y propuesta del mecanismo óptimo.....	70
4.4 Cálculos del concentrador solar propuesto.....	73
5. Discusión, conclusiones y trabajo a futuro.....	75
5.1 Discusión de resultados.....	75
5.2 Conclusiones y trabajo posterior.....	75
Apéndices.....	77
A1 El arco y el ángulo sólido.....	77
A2 Cálculo de los flujos lambertianos hemisféricos totales.....	80
A3 Deducción de las relaciones geométricas en la parábola y la esfera.....	82
A4 Cálculos para la realineación del punto objetivo.....	85
A5 Cálculo de Δ_s para el cono solar.....	88
Referencias.....	90
Anexos.....	94

Capítulo 1

Introducción

El desarrollo civilizado del ser humano se caracteriza por la utilización de herramientas, su adecuada implementación y el uso de su raciocinio e intelecto para el entendimiento, comprensión y manipulación de su entorno físico. A partir de la segunda mitad del siglo XVIII, el ser humano ha utilizado exponencialmente dichas características para beneficiarse y solventar necesidades de diferente índole al explotar su entorno utilizando y extrayendo elementos de la naturaleza (James L. Outman, Elisabeth M. Outman, 2003). Estas actividades se han desarrollado sin tomar en cuenta que el propio entorno natural mantiene un equilibrio en sí mismo, que al ser alterado de la forma en la que se ha venido haciendo hasta ahora, puede llegar a afectar severamente su desenvolvimiento sistémico. Una de las principales afectaciones del desarrollo industrial del ser humano es debida a la solvencia de sus necesidades energéticas mediante la utilización de combustibles fósiles (Banco Mundial, 2014), los cuales al ser utilizados producen gases de combustión que son alojados en la atmosfera. Estos gases propician un desequilibrio en la composición química del aire y la cantidad de energía absorbida la cual aumenta su temperatura y producen efectos invernadero. Es así como se provoca un desbalance en la calidad de vida de los individuos que se encuentran en las zonas urbanas, y en el equilibrio ecológico de los seres vivos que se encuentran en los ecosistemas implicados. Siendo estas cuestiones las principales justificaciones para el desarrollo de esta tesis.

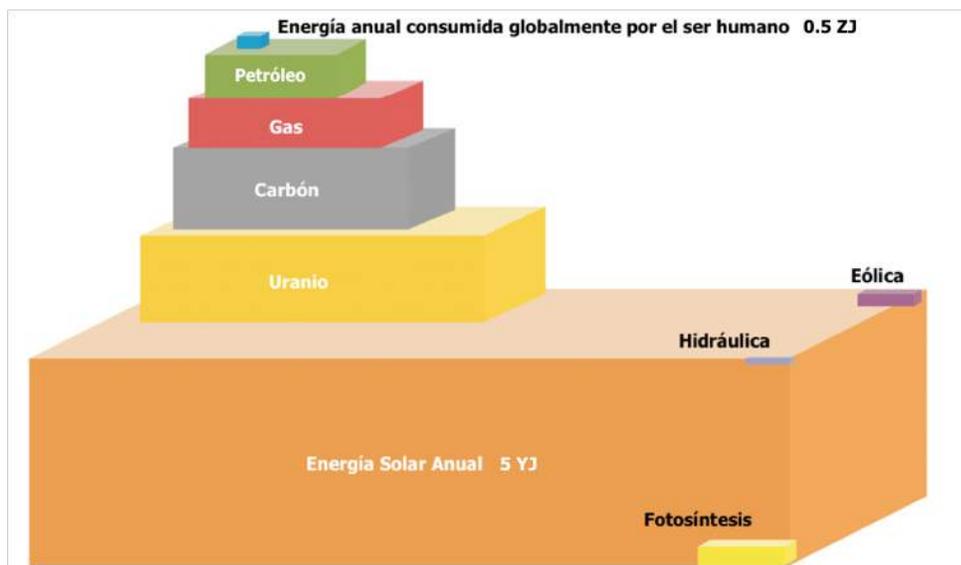


Figura 1. Reservas de energías convencionales, eólicas, hidráulicas, fotosintéticas y el consumo humano anual, comparadas con la energía solar captada por la tierra en un año (Duffie, J. A. and Beckman, W., 2013).

Actualmente, las energías renovables son una alternativa viable para satisfacer el requerimiento energético que el ser humano demanda, manteniendo un cierto equilibrio con el entorno y facilitando su desarrollo natural. Dentro de estas energías, la energía solar es la fuente más abundante en el planeta (Duffie, J. A. and Beckman, W., 2013). De acuerdo con las perspectivas de la Agencia Internacional de Energía de la OCDE publicadas en 2017 (International Energy Agency, 2017), en 90 minutos el sol entrega a la tierra energía suficiente para cubrir las necesidades mundiales de un año entero. Bastaría con captar y distribuir el 0.1% de la luz solar mediante sistemas termo solares para solucionar completamente el problema del suministro energético de la humanidad, ya que la energía recibida anualmente por el sol supera por mucho a la de todas las reservas mundiales probadas, probables y posibles, de las fuentes no renovables, incluida la nuclear (Figura 1).

A pesar de su abundancia la energía de origen solar constituye hoy en día tan solo una pequeña parte de la mezcla energética del orbe. Sin embargo, el declive en las reservas de combustibles fósiles, el aumento proyectado del consumo de energía a nivel mundial para la tercera década del siglo XXI, y la necesidad urgente de implementar acciones globales para mitigar el cambio climático, han motivado un interés internacional sin precedentes por el desarrollo de tecnologías de generación eléctrica solar tanto de organismos públicos como privados, en particular de aquellas que explotan las tecnologías termo solares, por ser las más viables para la generación de alta potencia (International Energy Agency, 2017). La estrategia utilizada para concentrar la energía solar hace uso de superficies altamente reflejantes para direccionar los rayos incidentes de un área determinada hacia otra área mucho menor, logrando así aumentar la densidad de flujo de energía W/m^2 . Esta técnica es de las que ha aportado los resultados más prometedores, ya que es posible alcanzar temperaturas de entre 200 °C y 3,400 °C (R. Pérez-Enciso Tesis Doctoral, 2015), dependiendo de las dimensiones de las áreas típicas de concentración y del recurso solar disponible en la región de interés.

1.1 Importancia de la energía solar térmica en México y la región.

En México existen actualmente severos problemas de calidad del aire en las principales zonas urbanas debido al excesivo uso de hidrocarburos, principalmente en el sector del transporte y en el sector industrial. (Mundial Banco, 2015; Banco Mundial, 2014; Banco Mundial, 2014) Los procesos de transformación del sector industrial en muchos casos requieren de altas temperaturas de operación que representan un importante consumo energético que podría ser satisfecho de manera sustentable a través de la energía solar térmica.

En el sector industrial, entre las medidas más relevantes para disminuir la polución por gases de combustión se cuentan con la utilización de combustibles de alta eficiencia como el gas natural y el correcto funcionamiento de los sistemas de combustión mediante programas de mantenimiento preventivo.

Sin embargo, los días con mayores ráfagas de viento y nubosidad son aprovechados para aumentar la actividad productiva y así conseguir que el mayor volumen de gases de combustión emitido pueda ser disipado por estas corrientes de aire, agravando así los problemas medioambientales en regiones geográficas de gran tamaño. Actualmente se tiene una tendencia negativa en la calidad del aire en las principales zonas metropolitanas del país, siendo los principales efectores el sector transporte y el sector industrial. (Gobierno de la CDMX, s.f.).

En el caso de Coahuila, según datos proporcionados por la Secretaría de Medio Ambiente del estado mediante el oficio número [DGMA/69/17](#), en la ciudad de Torreón los niveles de contaminación del aire rebasaron la norma en más del 50 por ciento de los días monitoreados durante el 2016. Esto ha provocado un entorno desfavorable para el desarrollo de sus habitantes ([Canedo, 2017](#)) (Figura 2). Generando entonces la necesidad compartida con el resto de las ciudades más importantes del país de fomentar el aprovechamiento de las energías renovables como alternativa al consumo de combustibles fósiles, tanto en las actividades residenciales como en las comerciales e industriales.



Figura 2. Fotografía tomada en el cerro de las Noas en enero de 2017, con vistas al noroeste de la Comarca Lagunera, mostrando la contaminación atmosférica ([Canedo, 2017](#)).

Dentro de la exploración de las posibilidades para el aprovechamiento de las energías alternativas, se sabe que México se encuentra ubicado entre las latitudes 14.47°N y 32.42°N, lo que la sitúa en la sección norte del cinturón solar, que es la zona del globo terrestre en donde la irradiación solar es mayor debido a la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto a la eclíptica, y la posición relativa de éste con Sol en el transcurso del año. Los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua y Coahuila tienen una irradiación solar media anual superior a 2,500 kWh/m² que es comparable con la recibida en el desierto de atacama en Sudamérica y el desierto del Sahara en África ([Solargis Solar Resource, 2018](#)).

La región de la Comarca Lagunera, localizada en la parte centro norte de los Estados Unidos Mexicanos, comprendida por la confluencia de la zona suroeste del estado de Coahuila y la zona noreste del estado de Durango, cuenta con un clima seco árido semidesértico ([Marta C. Cervantes R., Angélica M. Franco G., 2015](#)), con altas temperaturas en verano y bajas temperaturas en invierno, registradas por encima de los 40 °C y por debajo de los -7 °C respectivamente. La figura 3 muestra la media de la suma anual de la irradiación global horizontal que recibe México. Con una irradiación solar máxima de entre 900 y 1,200 W/m², y un flujo medio de 2,558 kWh/m²

(Solargis Solar Resource, 2018) por lo que se considera una zona de alta irradiación solar con respecto a otras regiones del territorio nacional (Comisión Nacional del Agua, Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), 2018), en donde la explotación del aspecto térmico de esta energía podría ser totalmente favorable debido a la disponibilidad del recurso solar de manera sostenida durante la mayor parte del año, dándole el potencial para convertirse en un centro de desarrollo científico y tecnológico en esta área. La zona metropolitana de La Laguna es junto con Monterrey, Saltillo y Monclova uno de los polos industriales de mayor actividad en la zona del centro norte-noreste. En la región de la comarca lagunera se concentran el 42% de la producción siderúrgica nacional el 10% de la industria automotriz, y las mayores empresas mineras, cementeras, cerveceras y refresqueras del país (Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero, 2013).



Figura 3. Irradiación global horizontal en México (Solargis Solar Resource, 2018).

El panorama actual del desarrollo, investigación, producción y utilización de tecnologías nacionales para el aprovechamiento térmico del recurso solar en México. El Instituto de Energías Renovables de la UNAM localizado en el municipio de Temixco, Morelos, cuenta con el único horno solar de alto flujo radiativo del país, diseñado para operar a 30 kW, con una intensidad de concentración de 12,000 soles en un área circular de 10 cm, siendo este uno de los más prominentes en su tipo a nivel internacional (D. Riveros-Rosas, 2010). En la parte del desarrollo de sistemas de concentración solar térmica para la producción de energía eléctrica en México, la infraestructura disponible se limita principalmente a una planta termo solar en el estado de Sonora, la cual utiliza tecnología de canal parabólico con una capacidad de producción energética de 14 MW (Semarnat), misma tecnología que se ocupa también en procesos industriales que requieren temperaturas de aproximadamente 200 °C.

1.2 Hipótesis

La hipótesis de este trabajo es que mediante la utilización de un de horno solar de alto flujo radiativo con superficies altamente reflectivas con una buena disipación de alineación, pueden obtenerse altas concentraciones de potencia y elevadas temperaturas, las cuales pueden ser aprovechadas para fines científicos e industriales.

1.3 Objetivos generales

Los objetivos de este trabajo son: 1) Conocer las generalidades del mecanismo de transferencia de calor por radiación, la configuración óptica y geométrica que deben tener las superficies reflectivas para una correcta concentración y el desarrollo teórico de sistemas mecánicos que puedan proporcionar una movilidad adecuada para alinear las superficies reflectivas y obtener perfiles de flujo homogéneo; 2) Analizar los requerimientos ópticos de concentración de luz que optimicen el aprovechamiento de la energía captada mediante la homogenización de altos flujos radiativos; 3) Desarrollar una propuesta de diseño para la construcción de un horno solar a escala orientado a la investigación de la energía solar térmica en el rango de alta temperatura

Los resultados obtenidos podrían ser relevantes en la generación de potencia a niveles de consumo industrial, o para su uso directo en procesos industriales donde se requieren temperaturas de operación elevadas, que actualmente suponen un alto costo monetario y ambiental al utilizar combustibles fósiles para llevarlos a cabo.

Capítulo 2

Antecedentes teóricos de los sistemas de concentración solar

De acuerdo con las definiciones encontradas en el sitio del Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS).

“Los colectores solares fototérmicos son una clase de intercambiadores de calor que transforman la energía solar en energía térmica. En ellos la transferencia de energía es desde una fuente distante de energía radiante (el Sol) a captador. Sin concentración óptica, el flujo de la radiación solar incidente es, en el mejor de los casos, aproximadamente de $1,100 \text{ W/m}^2$ (Comisión Nacional del Agua, Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), 2018). Con estos flujos radiativos, se pueden diseñar colectores solares planos para aplicaciones que utilizan temperaturas del fluido hasta de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ arriba de la temperatura ambiente. Sin embargo, existen muchas otras aplicaciones donde se requieren temperaturas mayores a las normalmente alcanzadas por los colectores planos. Estas temperaturas mayores se pueden conseguir interponiendo un dispositivo óptico entre el sol y la superficie de captación de energía, con el objetivo de aumentar la densidad de flujo radiativo incidente en el captador. Estos dispositivos (sistema óptico y captador) se denominan concentradores solares” (LACYQS, 2018).

2.1 Tipos de colectores y concentradores de energía solar térmica.

El aprovechamiento que se le puede dar a la energía solar térmica va desde el calentar fluidos para cumplir necesidades comerciales y residenciales, hasta aplicaciones industriales que requieren de altas temperaturas de operación como son procesos termoquímicos, fundición de metales, hornos y calderas. También pueden ser ampliamente utilizados en la generación de energía eléctrica mediante la evaporación de fluidos utilizando la energía térmica, que mueven una turbina acoplada a un generador, obteniendo una transformación de energía mecánica a eléctrica en este proceso, así como aplicaciones con motores tipo Stirling para obtener energía mecánica y transformarla a energía eléctrica mediante generadores. Otra de las aplicaciones de sistemas de concentración de energía solar es la utilización de celdas fotovoltaicas de concentración para generar directamente energía eléctrica con una mayor eficiencia.

Dentro de las aplicaciones más destacadas de los sistemas fototérmicos, podemos destacar las siguientes: colector plano, colector de tubo evacuado, concentrador de canal parabólico, concentrador Fresnel, concentrador de plato parabólico, concentrador de torre central y concentrador esférico, los cuales se describen a continuación.

Colector Plano

Se trata de un elemento plano que capta la energía solar tal y como incide en su superficie mediante el uso de serpentines tubulares por donde un fluido interno absorbe la energía proveniente del Sol (figura 4). Este tipo de captación solar se considera de baja temperatura ($T > 100\text{ °C}$), y no cuenta con seguimiento solar. La razón de concentración (concepto definido en la subsección 2.3.3) de este sistema es de 1 Sol.



Figura 4. Colector solar plano con serpentín interior (Spetsotoplenie, 2018).

Colector de tubo evacuado

Este tipo de colector hace uso de tubos de materiales de alta conductividad térmica que se encuentran dentro de tuberías transparentes al vacío para dejar pasar la radiación solar. Se encuentran con una cierta inclinación por debajo de un tanque de almacenamiento de fluido para hacer uso del efecto termosifón, además la inclinación aumenta la irradiación captada a lo largo del día y el transcurso del año, los tubos internos se encuentran aislados al vacío para así poder evitar el enfriamiento de estos por convección natural por parte del aire exterior (figura 5). Este tipo de captación solar se considera de baja temperatura ($T > 100\text{ °C}$) y no cuenta con seguimiento solar. La razón de concentración de este sistema es de 1 Sol.



Figura 5. Colector solar de tubo evacuado (Materiales Hissuma, 2018).

Concentrador de canal parabólico

Este es un tipo de concentración solar la cual hace uso del principio de reflexión de una superficie lineal con sección parabólica en cuya línea focal pasa una tubería de material de alta conductividad térmica dentro de una tubería transparente al vacío (figura 6). Gracias a la reflexión óptica de las superficies parabólicas se capta la energía solar para así calentar un fluido que pasa por el interior de la tubería. Este tipo de captación solar se considera de media temperatura ($100\text{ °C} > T < 350\text{ °C}$) y para su óptimo funcionamiento y aprovechamiento, requiere un grado de libertad de seguimiento al Sol, es decir un sistema que pueda variar el ángulo de seguimiento, determinado por el ángulo cenital del Sol (definido más adelante). La razón de concentración de este sistema se encuentra entre los 100 a los 200 soles.



Figura 6. Planta solar de canal parabólico, Agua Prieta II. Sonora, México (Abengoa, 2018).

Concentrador Fresnel

Este tipo de concentración hace uso de superficies reflejantes planas alargadas, independientes unas de otras, las cuales direccionan la luz en un punto lineal encima de sí mismas (figura 7). Requieren de un grado de libertad para el direccionamiento de la reflexión y el seguimiento solar en su ángulo cenital (definido más adelante). Este tipo de concentración se considera de alta temperatura ($T > 350\text{ °C}$). La razón de concentración de este sistema comprende de los 100 a los 200 soles.



Figura 7. Planta solar tipo Fresnel. Areva Solar, Italia (Group Volumatrix, 2018).

Concentrador de plato parabólico

Consiste en una superficie parabólica altamente reflejante que hace uso del principio de reflexión direccionando los rayos incidentes hacia el foco geométrico (figura 8), siendo necesarios dos grados de libertad para hacer un seguimiento a lo largo del día de los ángulos cenital y azimutal del Sol. Este tipo de sistemas de concentración solar se pueden considerar de media temperatura o de alta temperatura dependiendo de sus dimensiones de construcción. La razón de concentración de este sistema se establece de los 200 soles en adelante.



Figura 8. Planta solar de plato parabólico, Maricopa, Phoenix, Estados Unidos de América (Technology Power, 2018).

Concentrador de torre central

Este tipo de concentración hace uso de superficies planas altamente reflejantes, llamadas helióstatos, los cuales son distribuidos alrededor de una torre para direccionar toda la energía lumínica captada a la zona superior de la torre (figura 9). Cada helióstato requiere de dos grados de libertad para realizar un seguimiento de los ángulos cenital y azimutal del Sol. Este tipo de concentración solar es considerada de alta temperatura, pudiendo llegar a alcanzar temperaturas de operación de hasta 500 °C (ABC Gema Solar, 2011). La razón de concentración de este sistema se establece de los 200 soles en adelante (Gemasolar, 2018).



Figura 9. Planta solar de torre central, Gemasolar, Sevilla, España (Gemasolar, 2018).

Concentrador esférico (Betaray)

Este tipo de concentración solar hace uso del principio de refracción mediante un cuerpo esférico sólido transparente, el cual realiza la concentración en un punto, de manera similar al proceso óptico de concentración en una lupa (figura 10). Este tipo de concentración es considerada de alta temperatura, y requiere de dos grados de libertad para su operación. La razón de concentración de este sistema ronda de los 200 soles en adelante (Energy Alternative, 2018).



Figura 10. Concentrador solar esférico, Betaray (Energy Alternative, 2018).

2.2 Método de concentración solar propuesto y su panorama de desarrollo mundial

Horno solar de alto flujo radiativo

El nombre de horno solar de alto flujo radiativo que recibe esta configuración óptica particular mostrada en la figura 11 es debido a que el área de concentración solar es extremadamente pequeña comparada con las áreas respectivas del heliostato y del concentrador, donde se obtiene un aumento considerable en la densidad de flujo radiativo (W/m^2) con respecto al valor medido de la densidad de radiación proveniente del sol en un momento dado. Esto repercute en un aumento considerable de la temperatura del receptor en la zona de captación, pudiendo alcanzar temperaturas de hasta $3,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ en unos cuantos segundos obteniendo razones de concentración solar superiores a los 100 soles. Motivo por el cual fue empleado inicialmente para investigar materiales como los recubrimientos cerámicos del aislamiento térmico de los transbordadores espaciales, que se encuentran sometidos a choques térmicos súbitos a temperaturas muy altas.

Esta configuración de captación solar es una combinación óptica de dos superficies altamente reflectivas, una de geometría plana, conocida como heliostato, y otra cóncava, denominada concentrador. Su función es la de redirigir la luz proveniente del heliostato a una región de área muy reducida con respecto a las dimensiones de estas dos superficies reflectoras. La radiación solar pasa a través de un atenuador, que es en sí una persiana mecánica la cual abre o cierra parcialmente para regular la entrada de la radiación solar. Se plantea el uso de este tipo de configuración de concentración solar para facilitar el monitoreo del punto de concentración, ya que éste y el sistema concentrador se mantienen fijos durante un experimento, mientras el heliostato realiza el seguimiento al sol manteniendo en todo momento una reflexión de rayos idealmente paralelos hacia el concentrador lo cual es plasmado gráficamente en la figura 11.

Actualmente este tipo de tecnología de captación solar se encuentra en pleno desarrollo técnico y de investigación, buscándose aún diseños óptimos de las dos superficies reflejantes en el sistema, que permitan una mejor utilización de la energía concentrada para sus distintas aplicaciones, que van desde motores térmicos o turbinas de vapor interconectadas a generadores eléctricos. Actualmente también se hace uso de celdas solares de concentración que aprovechan mejor el efecto fotoeléctrico de la energía solar en un área reducida. Dicha tecnología también es aplicada a reactores solares que mediante reacciones químicas pueden desprender hidrogeno para su uso como combustible.

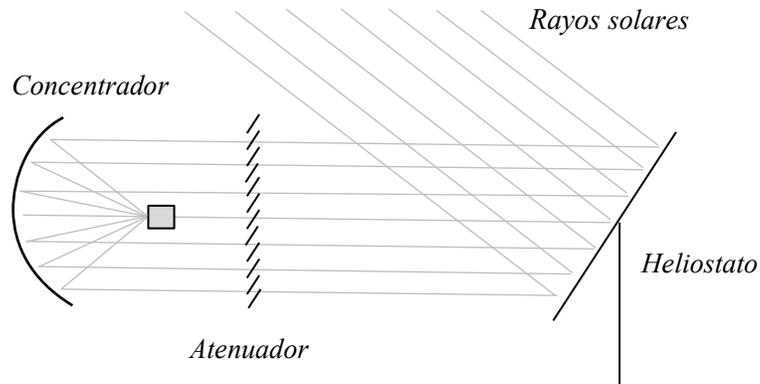


Figura 11. Diagrama del horno solar de alto flujo radiativo.

Este tipo de configuración de horno solar se encuentra operando con éxito en distintos centros de investigación en el mundo con distintos diseños y potencias siendo los más destacados los enlistados a continuación. Se incluyen también los mapas de irradiación solar normal directa de cada una de las zonas geográficas donde se encuentran dichos hornos, destacando su ubicación geográfica en el centro de una circunferencia de color negro.

1. El Horno solar del Centro Nacional de la Investigación Científica en Odeillo, Francia, que se aprecia en la figura 12, cuenta con una potencia máxima de 1,000 kW y concentración de 10,000 soles. Este sistema de concentración cuenta con 63 helióstatos y un concentrador de más de 11,000 espejos (Trombe, 1957). Actualmente este es el horno de mayor potencia en el mundo.



Figura 12. Horno solar de alto flujo radiativo en Odeillo, Francia (LACYQS, 2018).

El mapa mostrado en la figura 13 representa la irradiación solar directa media anual en el país de Francia, donde se puede apreciar que la ubicación del horno con respecto a la irradiación solar es adecuada, pudiendo contar con un promedio anual de irradiación solar directa de 2,000 kWh/m².

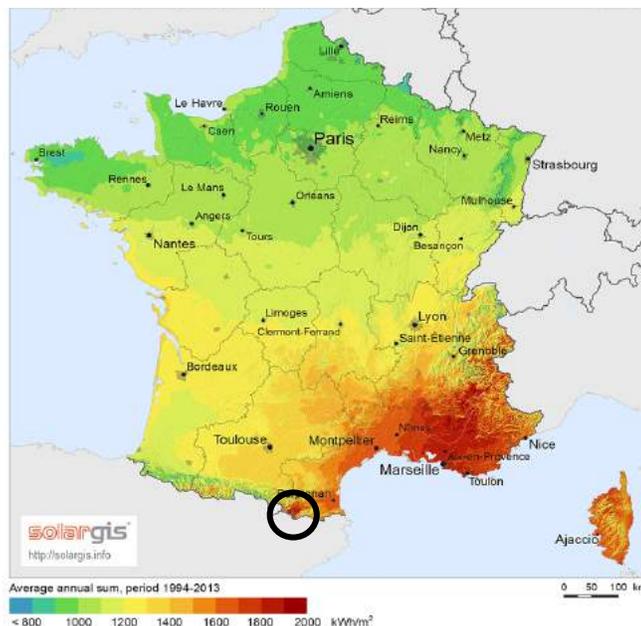


Figura 13. Irradiación solar directa media anual en Odeillo (Solargis Solar Resource, 2018).

2. Horno solar del Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas, Almería, España apreciado en la figura 14, el cual cuenta con una potencia máxima de 40 kW y concentración superior a los 5,000 soles. Este sistema de concentración cuenta con un heliostato de 100 metros cuadrados y un sistema de concentración conformado por una superficie parabólica reflectiva de sección circular de 8.5 m de diámetro (Ciemat, 2012), dicho horno puede alcanzar temperaturas de 3,000 °C e irradiaciones de 7 MW/m² (Gobierno de España, 2018).



Figura 14. Horno Solar de alto flujo radiativo en Almería, España (LACYQS, 2018).

El mapa de la figura 15 muestra la irradiación solar directa media anual en el país de España, donde se puede apreciar que la ubicación del horno con respecto a la irradiación solar es adecuada, pudiendo contar con un promedio anual de irradiación solar directa de 2,100 kWh/m².

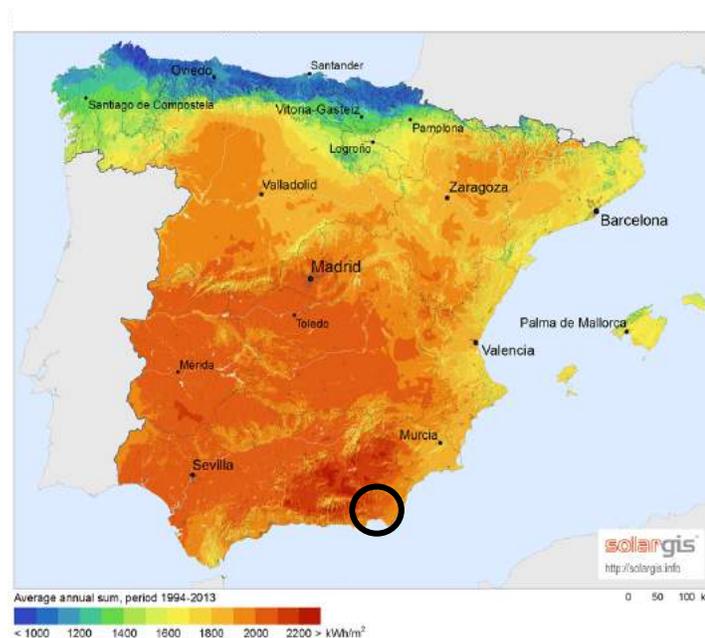


Figura 15. Irradiación solar directa media anual en España (Solargis Solar Resource, 2018).

3. Horno solar del Instituto de Investigación Paul Scherrer, Villigen, Suiza mostrado desde una vista posterior al heliostato de Figura 16, el cual cuenta con una superficie de 100 metros cuadrados y una superficie parabólica con apertura circular de 8.5 metros de diámetro (Paul Scherrer Institute, 2013). Dicho horno solar proporciona una potencia máxima de 40 kW y concentración de 5,000 soles (Sollab, 2018) siendo muy similar al horno de Almería España.



Figura 16. Horno Solar de alto flujo radiativo en Paul Scherrer, Suiza (LACYQS, 2018).

El siguiente mapa mostrado en la figura 17 representa la irradiación solar directa media anual en el país de Suiza, donde se puede apreciar que la ubicación del horno cuenta con un promedio anual de irradiación solar directa de 1,100 kWh/m². Se desconoce hasta el momento, ya revisada la literatura, porque se decidió ubicar el horno solar en dicha zona.

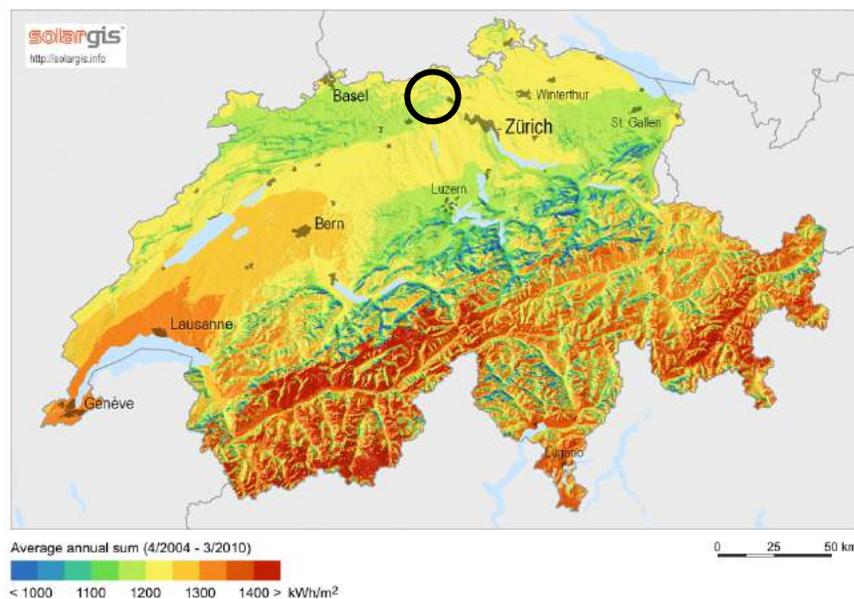


Figura 17. Irradiación solar directa media anual en Suiza (Solargis Solar Resource, 2018).

4. Horno solar del Instituto de Energías Renovables de la UNAM en Temixco, México mostrado en la figura 18, el cual proporciona una potencia térmica máxima de 30 kW y concentración de 10,000 soles. Cuenta con un heliostato de 81 m² y un concentrador de 409 espejos esféricos con sección hexagonal (D. Riveros-Rosas. , 2010), dicho concentrador se muestra en la figura 18.



Figura 18. Horno Solar de alto flujo radiativo (HOSIER) en Temixco, México (LACYQS, 2018).

El mapa de la figura 19 muestra la irradiación solar directa media anual en el país de México, donde se puede apreciar que la ubicación del horno con respecto a la irradiación solar no es del todo adecuada, ya que en dicha zona se cuenta con un promedio anual de irradiación solar directa de 2,200 kWh/m², a diferencia del norte del país donde se alcanzan irradiaciones en el orden de los 2,700 a los 3,000 kWh/m².



Figura 19. Irradiación solar directa media anual en México (Solargis Solar Resource, 2018).

5. Horno solar del Centro Aeroespacial Alemán en Colonia, Alemania el cual cuenta con una potencia máxima de 20 kW y concentración de 5,200 soles ([German Aerospace Center , 2018](#)). Este concentrador solar presenta una variación en su configuración óptica ya que el heliostato se encuentra fuera del eje del concentrador, enviando los rayos de concentración a una edificación a su costado como se muestra en la figura 20. Alcanzando irradiaciones de 5 MW/m² y temperaturas de 2,500 °C ([DLR Institute of Solar Research, 2018](#)).



Figura 20. Horno Solar de alto flujo radiativo en Colonia, Alemania ([LACYQS, 2018](#)).

Apreciando el mapa de la figura 21 se muestra la irradiación solar directa media anual en el país de Alemania, donde se puede apreciar que la ubicación del horno cuenta con un promedio anual de irradiación solar directa de 1,000 kWh/m².



Figura 21. Irradiación solar directa en Alemania ([Solargis Solar Resource, 2018](#)).

6. Horno solar del Laboratorio Nacional de Energía Renovable en Golden, Estados Unidos, apreciado en la figura 22, proporciona una potencia de 10 kW y concentración de 2,500 soles. Este concentrador cuenta con 25 espejos hexagonales formando una superficie total de concentración de 12.5 m², siendo posible alcanzar irradiaciones de 2.5 MW/m² (NREL, 2018).



Figura 22. Horno Solar de alto flujo radiativo en Golden, Estados Unidos de América (LACYQS, 2018).

El mapa de la figura 23 muestra la irradiación solar directa media anual en el país de Estados Unidos, donde se puede apreciar que la ubicación del horno cuenta con un promedio anual de irradiación solar directa de 2,100 kWh/m².

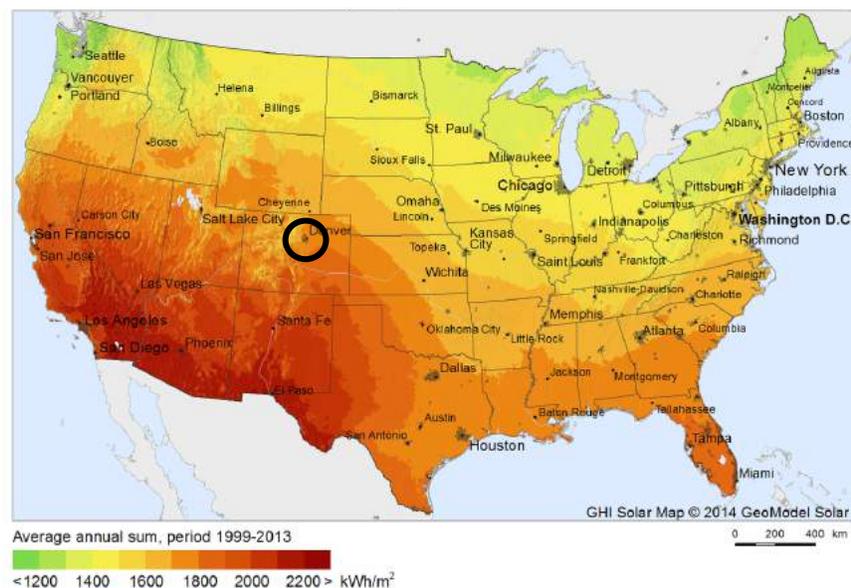


Figura 23. Irradiación solar directa media anual en Estados Unidos de América (Solargis Solar Resource, 2018).

Este tipo de configuración de horno solar también puede utilizarse a escala, como prototipo de pruebas y optimización óptica y mecánica además de pruebas térmicas en materiales. El Instituto de Energías Renovables de la UNAM, campus Temixco, cuentan con dos prototipos a escala, los cuales se utilizan para experimentar con mesas de trabajo las metodologías de alineación y los perfiles de concentración del sistema óptico. Estos prototipos, mostrados en las figuras 24 y 25 cuentan con una concentración reportada de 4,590 soles y temperaturas superiores a los 2,000 K los cuales tienen una dimensión de 2.3 m de altura, 1.6 m de largo y 0.8 m de fondo (IER-UNAM, 2005). Dichos prototipos junto con el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HOSIER) fueron estudiados durante una estancia de investigación.



Figura 24. Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Altamente Concentrados (DEFAC) Del Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM, 2005).



Figura 25. Horno solar a escala del Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

El corporativo IBM y la compañía [Airlight Energy](#) cuentan con un prototipo localizado en Suiza, para la generación de energía eléctrica mediante celdas de concentración solar. La potencia máxima reportada del equipo es de 10 kW, una concentración de 2,000 soles y una temperatura de 1,500 °C. Dicho prototipo fue construido en el año 2013 (Figura 26).



Figura 26. Concentrador solar tipo flor de la corporación IBM (Forbes, 2014).

La presente tesis explora el análisis teórico y numérico para la construcción de uno de estos prototipos basándose en los mismos principios de construcción contando con la capacidad adicional de conseguir altos flujos radiativos con perfiles de concentración homogéneos. Mas adelante será establecido que dicha cualidad constituye una innovación necesaria para ampliar el rango de aplicación y la eficiencia de estos sistemas de concentración.

2.3 Fundamentos teóricos de la concentración solar

2.3.1 Radiación Térmica y propiedades optotérmicas de los cuerpos

En física moderna, el análisis de las ondas electromagnéticas se fundamenta en la frecuencia de dichas ondas, mientras que en la ingeniería de la energía solar el parámetro de análisis preferido es la longitud de onda. La figura 27 (a) muestra el caso específico de una superficie sólida donde el proceso de radiación se refiere al desprendimiento de paquetes discretos de energía producidos por el movimiento térmico de las partículas dentro del sólido, llamados fonones. Los desprendimientos del cuerpo en forma de cuantos de luz toman el nombre de fotones que se desplazan a una determinada longitud de onda.

La figura 27 (b) muestra las variables involucradas en la radiación térmica siendo T_s la temperatura superficial en K, T_{alr} la temperatura de los alrededores en K, q_{rad} la energía neta emitida por el sólido en W y q''_{rad} la energía por unidad de área emitida por el sólido en W/m^2 . La radiación térmica es un mecanismo de transferencia de calor que se manifiesta en el intercambio de energía entre un material y sus alrededores mediante ondas electromagnéticas, siendo estas las principales características sobre el interés específico en este tipo de radiación y no en otras.

Principalmente de longitudes en la región entre 0.7 y $17 \mu m$, de manera que la temperatura de las superficies de los materiales involucrados determina la tasa a la que la radiación neta es emitida ($T_s > T_{alr}$) o absorbida ($T_s < T_{alr}$) por el material, y que será nula en el estado de equilibrio termodinámico ($T_s = T_{alr}$) (Frank P. Incropera, David P. De Witt).

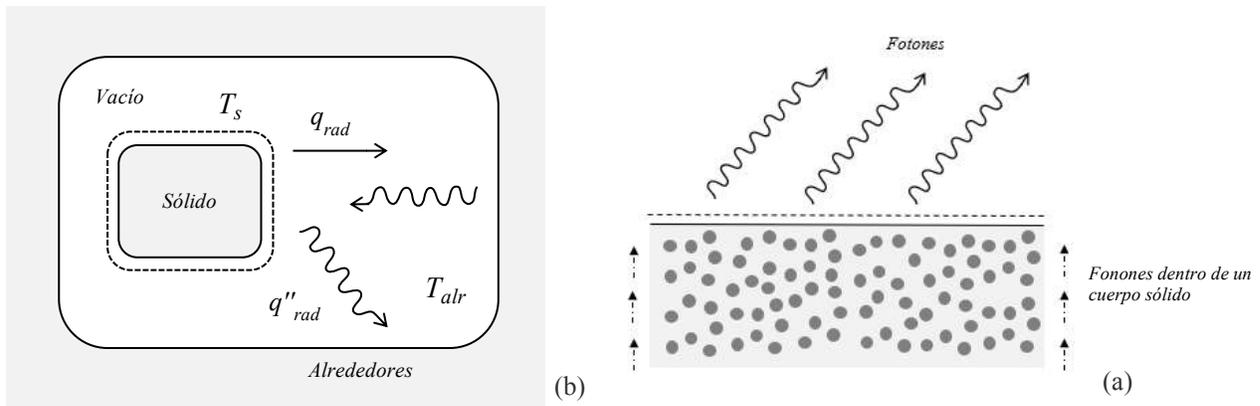


Figura 27. (a) Superficie emitiendo fotones. (b) Mecanismo físico de la transferencia de calor por radiación.

La radiación térmica que emite una superficie se propaga en todas las direcciones como se ve en la figura 28 (a) y longitudes de onda posibles, por lo que es de interés el conocimiento de su distribución direccional y espectral, es decir, la longitud de onda determinada de dicha radiación la cual se aprecia gráficamente en la figura 28 (b). Para entender los procesos de intercambio térmico por radiación, es necesario emplear algunos conceptos que nos ayuden a definir las propiedades físicas y el origen de la radiación térmica analizada. Uno de ellos es el concepto de flujo radiativo, que se define como la potencia (energía por unidad de tiempo, en Watts) de la radiación que alcanza un área determinada m^2 , teniendo como unidad de medida el W/m^2 .

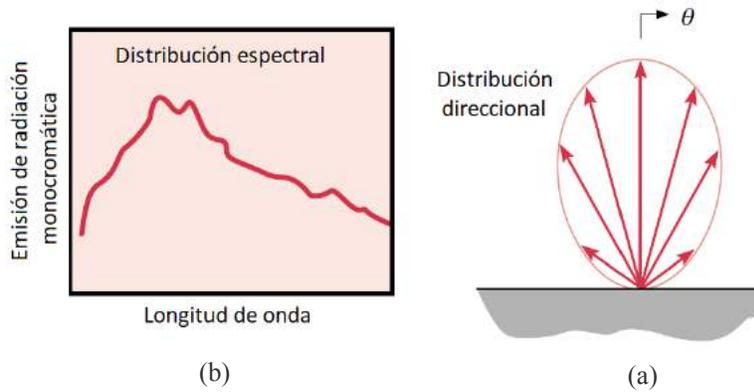


Figura 28. Distribución espectral (a) y direccional (b) de la radiación (Modificada de (Frank P. Incropera, David P. De Witt)).

De acuerdo con el origen de la radiación que compone un determinado flujo radiativo, se reconocen cuatro tipos de flujos los cuales son mostrados en la figuras 29 (a): 1) la emisión o potencia emisiva E , que es el flujo emitido por un cuerpo debido a la agitación térmica de sus partículas componentes descrito en el apartado anterior; 2) la irradiación G , que es el flujo debido a la radiación incidente sobre una superficie, que puede provenir de distintas direcciones y estar compuesto de múltiples longitudes de onda. Siendo la suma de la irradiación reflejada, absorbida y transmitida; 3) la radiosidad J , que es la suma de la potencia emisiva y de la componente de la irradiación reflejada por el cuerpo, y 4) el flujo radiativo neto q''_{rad} , que es la resta entre la radiosidad y la irradiación, como se muestra en la figura 29 (Frank P. Incropera, David P. De Witt).

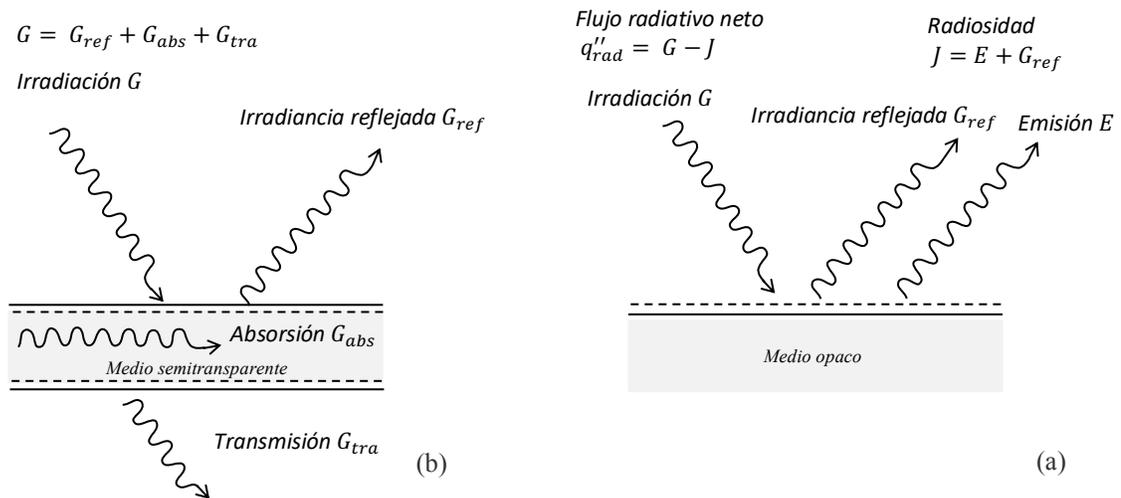


Figura 29. Transferencia de calor por radiación en superficies. (a) Medio semi transparente (b) Medio opaco.

El efecto térmico de un flujo de calor radiativo depende de las propiedades optotérmicas de la superficie con la que esté interactuando. En el caso del medio semitransparente, la energía irradiada, que se define como toda energía en forma de ondas electromagnéticas que incide en un cuerpo o materia, se descompondrá, por la primera ley de la termodinámica, en la energía reflejada, la energía absorbida y la energía transmitida por el medio mostrando gráficamente dicha descomposición en la figura 29 (b). En el caso de un medio opaco, la energía irradiada se descompondrá solamente en las energías reflejada y absorbida por el cuerpo (Frank P. Incropera, David P. De Witt).

En la interacción con un medio semi transparente se le conoce con el nombre de reflectividad ρ a la fracción de irradiación que es reflejada, absorptividad α a la fracción de irradiación que es absorbida y transmisividad τ a la fracción de irradiación que es transmitida por el medio.

El balance de energía de la primera ley de la termodinámica entre los flujos energéticos es expresado matemáticamente como:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.1)$$

La emisividad ε es la fracción de la emisión generada desde una superficie comparada con la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, E_b , calculada con la ley de Stefan-Boltzmann: $E_b = \sigma T^4$, siendo T la temperatura absoluta de la superficie en K y σ la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. La potencia emisiva superficial está dada por $E = \varepsilon \sigma T^4$.

En el caso de la interacción con un medio opaco, donde no se presenta la transmisividad $\tau = 0$, ni la absorptividad, $\alpha = 0$, toda la energía irradiada es reflejada, $\rho = 1$.

Usando estos conceptos, podemos también expresar matemáticamente a la radiosidad como (Frank P. Incropera, David P. De Witt) se ve en la ecuación 2.2.

$$J = E + G_{ref} \quad (2.2)$$

y al flujo radiativo neto en las ecuaciones 2.3 a 2.5.

$$q''_{rad} = G - J \quad (2.3)$$

$$q''_{rad} = G - (E + G_{ref}) \quad (2.4)$$

$$q''_{rad} = G - (\varepsilon \sigma T^4 + G_{ref}) \quad (2.5)$$

La potencia radiativa neta de una superficie de área A se expresa entonces como se ve en la ecuación 2.6.

$$q_{rad} = q''_{rad} A \quad (2.6)$$

La intensidad de radiación I_λ es la tasa por unidad de área y ángulo sólido $d\omega = A/r^2$, a la que la energía radiante de longitud de onda entre λ y $\lambda+d\lambda$ emitida desde (o irradiada sobre) una superficie dA atraviesa un área $dA_n = dA \cos \theta$ que subtende un ángulo sólido $d\omega$ y es normal a la dirección angular (θ, ϕ) (Apéndice 7.1), como puede verse en la figura 30 para el caso de la irradiación mostradas numéricamente en las ecuaciones 2.7 y 2.8 (Frank P. Incropera, David P. De Witt).

$$I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{dq_\lambda}{dA \cos \theta d\omega d\lambda} \quad (2.7)$$

donde

$$dq_\lambda = I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) dA \cos \theta d\omega d\lambda \quad (2.8)$$

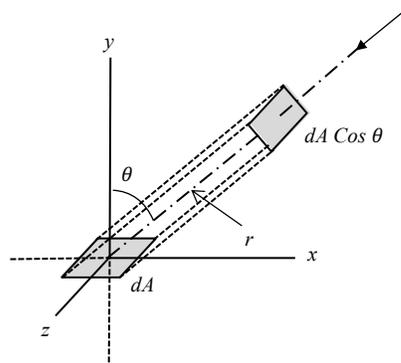


Figura 30. Geometría para el cálculo matemático de la intensidad de irradiación.

Dividiendo la ecuación 2.8 por la diferencial de área y sustituyendo la expresión en coordenadas esféricas de la diferencial de ángulo sólido, obtenemos la expresión para el flujo radiativo en términos de la intensidad de la radiación se obtiene la ecuación 2.9.

$$dq''_\lambda = I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.9)$$

Las ecuaciones 2.7 a 2.9 nos permiten calcular las tasas de energía y los flujos radiativos de interés, conociendo la distribución $I_\lambda(\lambda, \theta, \phi)$ de la radiación considerada.

En la ingeniería de concentración solar, en los casos de análisis teórico y práctico se tiene un interés especial en las distribuciones correspondientes a superficies lambertianas ya que son aquellas superficies en las que la intensidad de la radiación no depende de la dirección, sino únicamente de su densidad energética espectral; es decir, aquellas superficies para las que $I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) = I_\lambda(\lambda)$.

En el caso particular de la intensidad de emisión $I_{\lambda,e}$, la ecuación 2.10 corresponde a la diferencial de la potencia emisiva graficada en la figura 31.

$$dE_\lambda(\lambda) = dq''_\lambda(\lambda) = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.10)$$

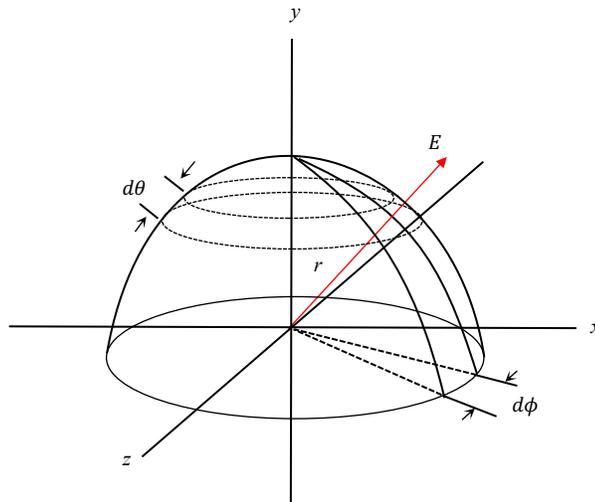


Figura 31. Geometría para el cálculo de la emisión hemisférica total.

De acuerdo con la geometría de la figura 31, la integración de la ecuación 2.10 sobre toda la semiesfera y todas las longitudes de onda dará el flujo hemisférico total de la radiación emitida, o emisión hemisférica total E de la superficie de interés. En el caso particular de una superficie lambertiana, esta integración da como resultado la ecuación 2.11.

$$E = \pi I_e \quad (2.11)$$

en donde I_e es la potencia espectral total de la radiación emitida, en W/m^2 .

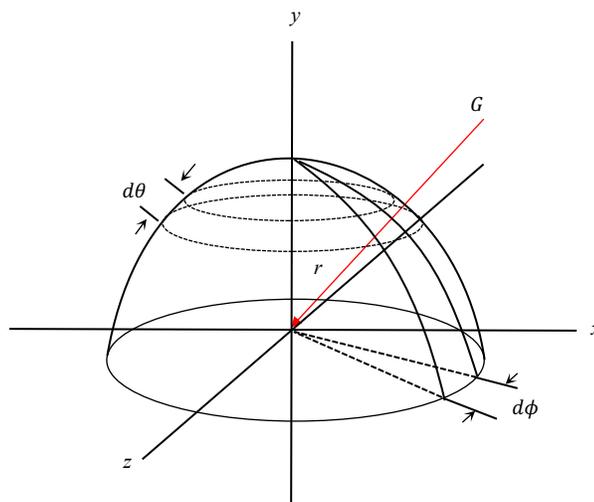


Figura 32. Geometría para el cálculo de la irradiación hemisférica total.

Para el caso de la irradiación, la dirección radial de la energía radiada se invierte, aunque las coordenadas angulares permanecen sin cambios como se grafica en la figura 32. Lo que permite hacer la integración de la distribución de la intensidad sobre todo el hemisferio de manera análoga a la distribución en el caso emisor, obteniendo la expresión para la irradiación hemisférica total en una superficie lambertiana, como se ve en la ecuación 2.12.

$$G = \pi I_i \quad (2.12)$$

Siendo I_i la potencia espectral total de la radiación recibida por la superficie, en W/m^2 . De igual forma, la radiosidad hemisférica total para una superficie lambertiana con una potencia espectral total de radiosidad I_{e+r} , como se ve en la ecuación 2.13.

$$J = \pi I_{e+r} \quad (2.13)$$

El flujo neto de radiación en una superficie lambertiana estará dado simplemente por el cálculo en la ecuación 2.14.

$$q''_{rad} = J - G = \pi (I_{e+r} - I_i) \quad (2.14)$$

Usando las ecuaciones 2.12 y 2.13. Los flujos dados por las ecuaciones 2.11 a 2.14 reciben el nombre de flujos lambertianos hemisféricos totales, o simplemente flujos lambertianos, y los detalles de su cálculo se presentan en el Apéndice A.2.

2.3.2 Intensidad radiativa solar

Se denomina constante solar G_{SC} a la cantidad de radiación que se recibe en la capa superior de la atmósfera sobre una superficie normal a los rayos solares (y que por las propiedades direccionales de la intensidad de radiación vistas en el apartado anterior, en general variará con el coseno de la latitud de otros puntos de observación). Se debe considerar que debido a que la distancia del Sol con respecto a la Tierra varía en el transcurso del año, la constante solar tiene una leve variación en función de lo anterior. No obstante, el valor aceptado para su empleo en los cálculos de la ingeniería solar es $G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2 \pm 1\%$ (Duffie, J. A. and Beckman, W., 2013).

Para una superficie paralela a la superficie de la Tierra, la radiación solar aparece como un haz de rayos casi paralelos que forman un ángulo θ , el ángulo cenital, con respecto a la normal de la superficie de la Tierra. Parte de esa radiación es dispersada por la atmósfera terrestre. El efecto acumulativo de los procesos de dispersión atmosférica en la distribución direccional de la radiación solar golpeando la superficie de la tierra se muestra en la figura 33 (b). La parte de la radiación que ha penetrado en la atmósfera sin haber sido dispersada (o absorbida) por la atmósfera está en la dirección del ángulo cenital y se denomina irradiación normal directa (*Direct normal irradiance* DNI, por sus siglas en inglés). La radiación dispersada incide desde todas las direcciones, aunque su intensidad es mayor para direcciones cercanas a la de la radiación directa como se aprecia en la figura 33 (a). La radiación dispersada puede variar desde aproximadamente el 10% de la irradiación solar total en un día despejado, hasta casi el 100% en un día muy nublado. El componente disperso de la irradiación solar a menudo se aproxima como independiente de la dirección mostrado en la figura 33 (b), por lo que se le denomina irradiación difusa (o lambertiana, de acuerdo con los conceptos del apartado previo) (Frank P. Incropera, David P. De Witt).

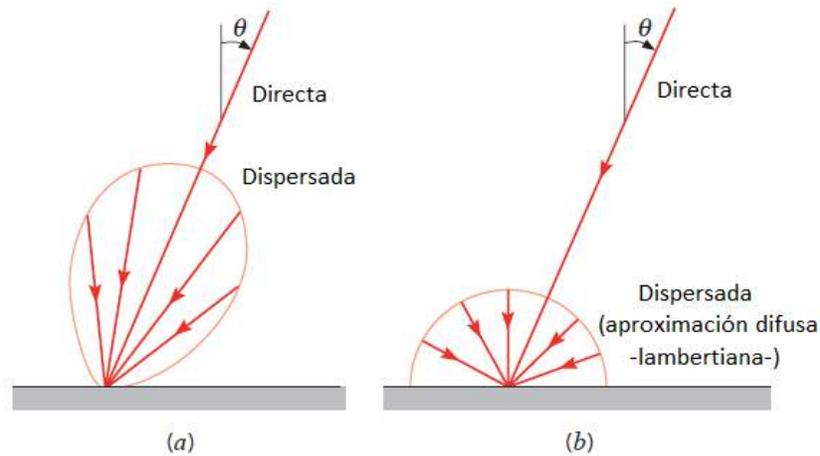


Figura 33. Distribución direccional de la radiación solar en la superficie de la tierra.
 (a) Distribución real. (b) Aproximación difusa (Modificada de (Frank P. Incropera, David P. De Witt)).

La geometría solar es la medición de la posición angular del Sol respecto de la superficie terrestre, la cual es considerada teóricamente como una superficie plana conocida como el plano ecuatorial, a una determinada hora del día solar, es decir, a un tiempo solar. Es necesario conocer la geometría y el tiempo solar para determinar la irradiación normal directa, y para poder orientar los equipos de captación en esa dirección.

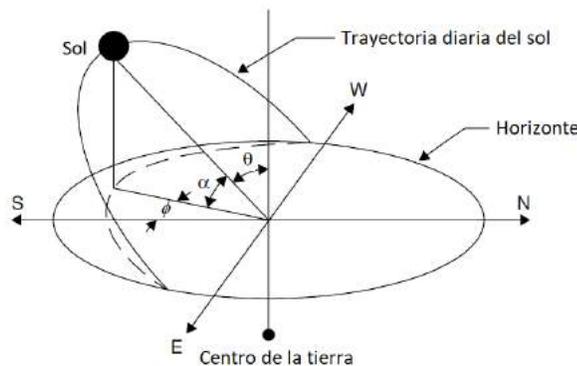


Figura 34. Geometría solar respecto del plano terrestre. (Modificada de (Duffie, J. A. and Beckman, W., 2013)).

La figura 34 muestra los ángulos más representativos de la geometría solar: el ángulo cenital θ , que es el ángulo que hacen los rayos solares con la vertical perpendicular al plano terrestre; la elevación solar α , que es el ángulo entre los rayos solares y el plano horizontal. En todo momento se cumple que $\theta + \alpha = 90^\circ$, y ambos ángulos tienen valores absolutos entre 0 y 90° , siendo positivos en el hemisferio norte y negativos en el hemisferio sur. El ángulo azimutal o azimut solar ϕ , que es el ángulo del haz solar sobre el plano horizontal medido desde el sur para el hemisferio norte, o desde el norte para el hemisferio sur, designándose como positivos los ángulos hacia el oeste (W en la figura 34), y negativos hacia el este (Soteris A. Kalogirou), aunque también se acostumbra en ocasiones medirlo desde el norte (para el hemisferio norte) en dirección horaria hacia el oeste, teniendo el valor de 180° justamente cuando el Sol está en el sur, sobre la línea del meridiano, al mediodía solar (University of Oregon, 2007).

Conforme transcurre el año, el ángulo de la altura solar tiene una variación debido a que el eje de rotación de la tierra tiene un ángulo de declinación δ con respecto a la eclíptica (el plano de traslación de la tierra alrededor del Sol), que varía a su vez entre cada solsticio y equinoccio graficado en la figura 35. La variación en la declinación terrestre está dada por la ecuación 2.15 (Soteris A. Kalogirou).

$$\delta = 23.43 \sin \left[\frac{360}{364} (284 + N) \right] \quad (2.15)$$

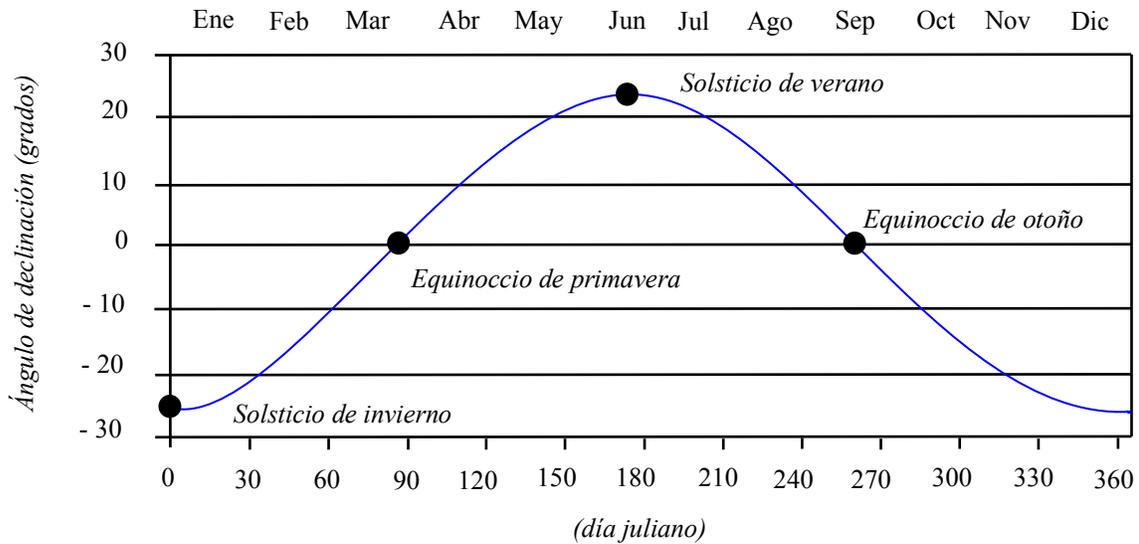


Figura 35. Declinación solar anual.

Debido a ello, los valores de las variables de descripción de la posición solar dependen directamente del día juliano en que se midan, ya que astronómicamente la Tierra varía su posicionamiento con respecto al Sol en el transcurso del año, haciendo que en verano este posicionamiento sea distinto del que tiene en invierno. La variación evidente en el transcurso de un día, que se manifiesta en el desplazamiento del Sol por la bóveda celeste de este a oeste, cambiando su ángulo azimutal y su elevación como se ve en la figura 34. Así, en el transcurso del año la duración del día varía alrededor de una media de 24 horas debido al posicionamiento de la Tierra en su órbita alrededor del Sol. El incremento o decremento en la duración de un día solar según el día del año N mostrado gráficamente en la figura 36 está determinado por la ecuación 2.16 y 2.17 (Soteris A. Kalogirou).

$$ET = 9.87 \sin (2B) - 7.53 \cos (B) - 1.5 \sin (B) \quad (2.16)$$

En donde:

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \quad (2.17)$$

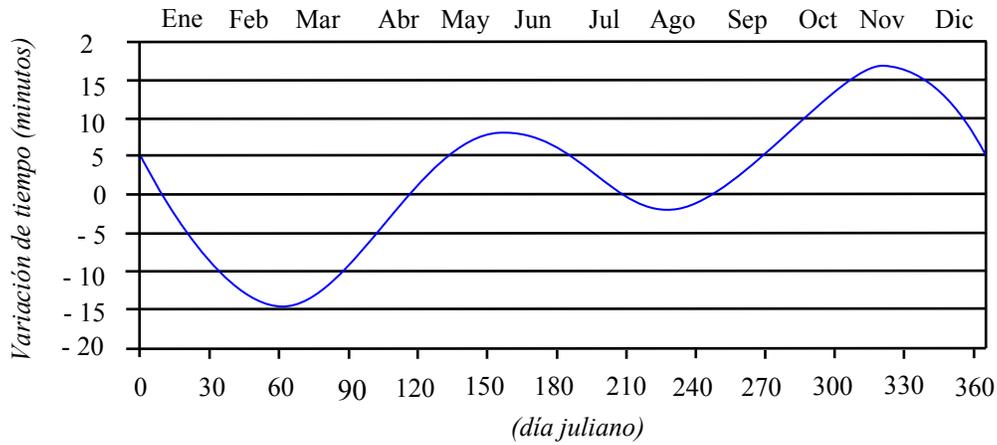


Figura 36. Variación anual de la duración del día.

Las consideraciones más refinadas de la geometría y el tiempo solares (que están fuera del alcance de esta tesis, pero que se encuentran en la literatura referida) permiten la elaboración de cartas de la posición solar para una determinada situación geográfica a distintas fechas y en distintas horas. La figura 37 muestra una de estas cartas para la ubicación geográfica de la ciudad de Torreón, en el estado de Coahuila, México (Latitud: 25.5444, Longitud; -103.44, Zona Horaria: UTC-6h (CST)), entre los solsticios, de diciembre hasta junio (University of Oregon, 2007).

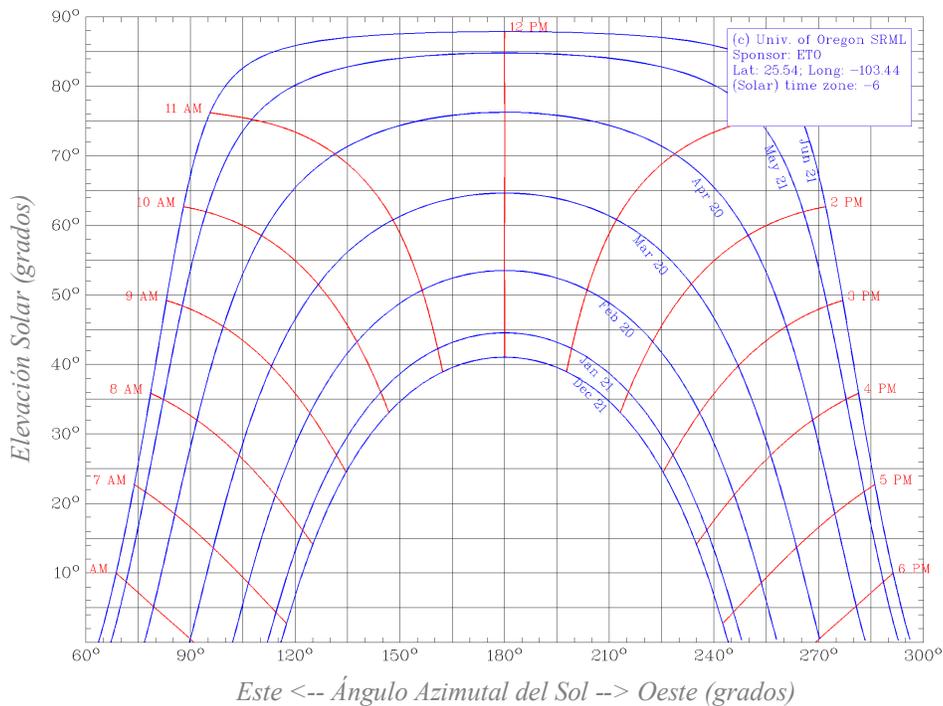


Figura 37. Carta de posición solar para Torreón, Coahuila, México (University of Oregon, 2007).

2.3.3 Razón de concentración de flujos radiativos y límites termodinámicos

El proceso de concentración de luz se caracteriza típicamente por la razón de concentración C , dado por la ecuación 2.18, que físicamente es el factor por el cual el flujo de energía incidente I_o se modifica al flujo de energía concentrada I_r sobre la superficie receptora A_a como se muestra en la figura 38, que al estar confinada en un área A_r más pequeña que el área de la apertura del concentrador, debe incrementarse (PennState Collage of Earth and Minerals Sciences, 2018).

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.18)$$

La definición geométrica de C es adecuada solamente cuando los flujos radiativos en la apertura del concentrador y en el receptor son uniformes, es decir, homogéneos, y tienen un valor constante sobre A_r y A_a respectivamente.

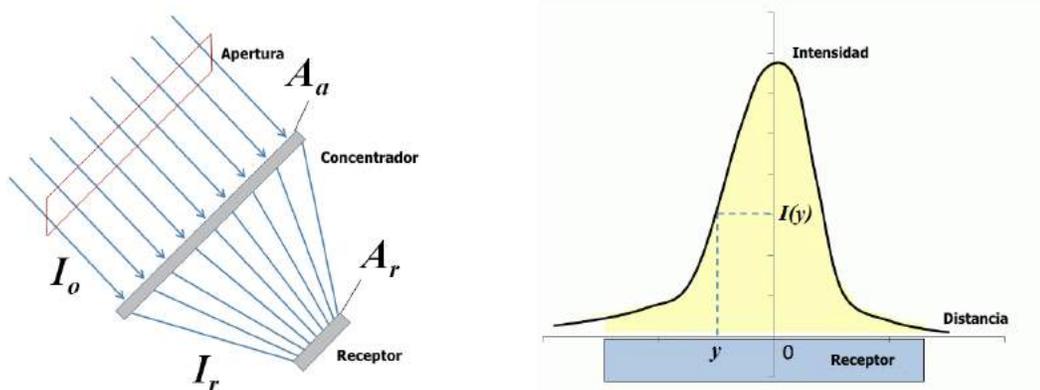


Figura 38. Esquema geométrico de la Razón de concentración y perfil de flujo radiativo no homogéneo (PennState Collage of Earth and Minerals Sciences, 2018).

En general, la mayoría de los sistemas de concentración del tipo de horno solar producen perfiles de flujo radiativo no homogéneos, como se muestra en la figura 38, que en general originan un gradiente de temperaturas muy elevado entre la región central y la periferia del área de concentración A_r (región de concentración). Pudiendo llegar a comprometer la integridad estructural del material receptor, aunque esto es de utilidad en algunas investigaciones de materiales, en la mayoría de las aplicaciones técnicas constituye una característica indeseable. Por lo que es necesario explorar una estrategia para conseguir flujos de irradiación homogéneos sobre la superficie receptora, para los cuales se cumple también lo mostrado en la ecuación 2.19.

$$C = \frac{I_r}{I_o} \quad (2.19)$$

La temperatura máxima que se puede alcanzar en un receptor por el flujo de irradiación producido por un sistema de concentración solar depende de los límites impuestos por las leyes de la termodinámica. La ecuación 2.20 permite determinar la temperatura máxima que es posible alcanzar teóricamente en un sistema de concentración con una razón de concentración C , respecto del valor de concentración ideal para los sistemas análogos de acuerdo con su dimensionalidad, que en el caso tridimensional es $C_{ideal} \approx 45,300$ y de 213 para el caso planar (Ari Rabl, 1985).

$$T_{abs} = T_{sun} \left[(1-\eta) \tau \frac{\alpha}{\varepsilon} \frac{C}{C_{ideal}} \right]^{1/4} \quad (2.20)$$

En esta ecuación, T_{abs} es la temperatura máxima (en K) que puede alcanzarse termodinámica-mente por el material absorbente del receptor; T_{sun} es la temperatura absoluta media del Sol, 5,778 °K, η es el porcentaje de pérdidas de calor en el receptor; τ son las pérdidas de flujo radiativo debidas a la atmósfera y a las propiedades optotérmicas de los materiales reflectivos en la óptica del sistema de concentración; α es la absorptividad, y ε la emisividad del material de la superficie receptora (Ari Rabl, 1985). La figura 39 muestra la gráfica de la ecuación 2.20 para distintos valores de C y η en un sistema de concentración de geometría tridimensional, con $\alpha = \varepsilon$, y $\tau = 0.7$.

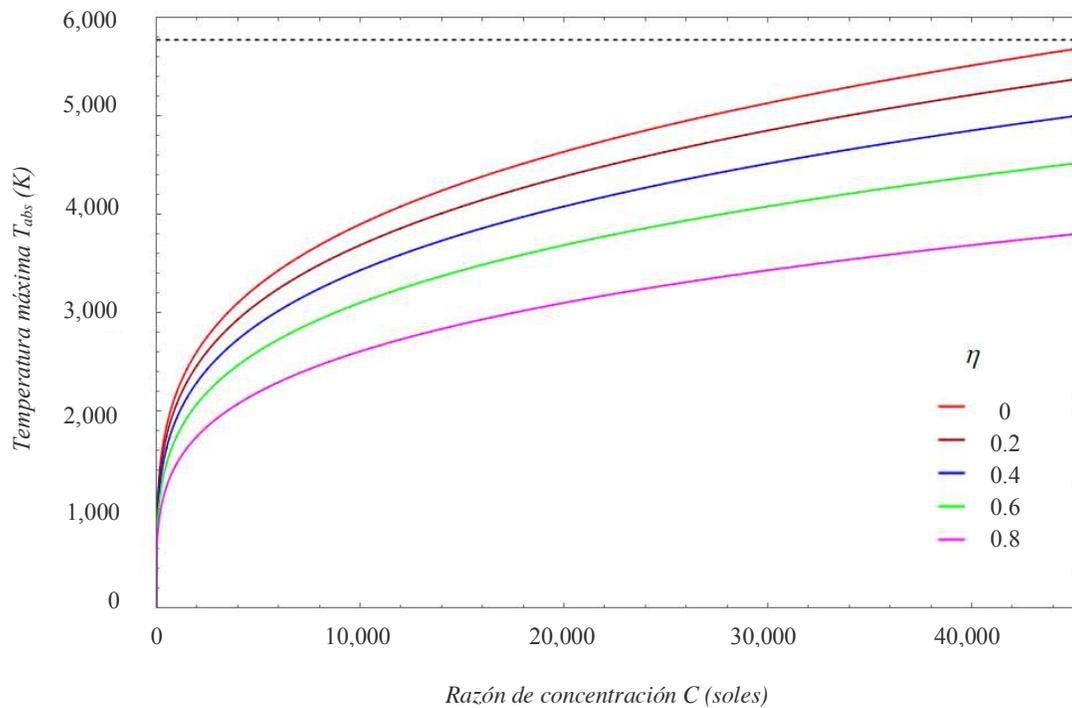


Figura 39. Distribución de la temperatura respecto a la concentración para diferentes porcentajes de pérdidas en el receptor. La temperatura de la superficie del Sol se indica con línea punteada.

Aunque las investigaciones de materiales que pueden conducirse en los hornos solares de alta potencia radiativa generalmente abarcan rangos de temperatura muy elevados, por encima de los 1,500 °C, la mayoría de las aplicaciones solares térmicas para generación eléctrica ocurren en rangos más bajos, de entre 400 y 700 °C (Ari Rabl, 1985). La ecuación 2.19 nos indica que considerando pérdidas de calor extremas del 99 % ($\eta = 0.99$) en una superficie gris ($\alpha = \varepsilon$), y con el valor típico $\tau = 0.7$, una razón de concentración $C \approx 12,900$ será suficiente para obtener una temperatura de alrededor de 950 °C en el material absorbente térmico.

Si consideramos el diseño de un prototipo de horno solar a escala, consistente en espejos esféricos de diámetro de apertura $D = 30$ cm y radio de curvatura $R = 4$ m (como los empleados por el prototipo en funciones del IER-UNAM, figura 25). El área de captación/reflexión efectiva de cada espejo será de $\pi(0,30 \text{ m}/2)^2 \approx 0.0707 \text{ m}^2$, que es aproximadamente 1/178 del área de captación máxima del casquete con radio de curvatura focal $\pi f_o^2 \approx 12.5664 \text{ m}^2$.

Si usamos un número n_e de estos espejos, tendremos un área de captación $A_a = n_e \pi (D/2)^2$. El diámetro típico del spot de concentración de un sistema concentrador de 24 espejos es de aproximadamente 6 cm, por lo que su área efectiva es $A_r = \pi (0.03 \text{ m})^2 \approx 0.0028 \text{ m}^2$. La razón de concentración de este sistema es pues $C = 24 (0.15 \text{ m}/0.03 \text{ m})^2 = 600$.

Si adicionalmente asumimos que obtendremos un flujo de irradiación concentrada homogéneo, se tendrá por la ecuación 2.18 un valor de flujo de irradiación $I_r \approx 1 \text{ MW/m}^2$ para un I_o estándar de 1 kW/m² proveniente de un helióstato standard de 2 m², lo que implica una potencia efectiva de 2.83 kW. Si suponemos que las pérdidas de calor son del orden de las que se encuentran en un motor de combustión interna común ($\eta = 0.8$), la ecuación 2.19 con un $\tau = 0.7$ y $C = 600$ predice una temperatura máxima en un cuerpo gris de 925 °C. Que es del orden de la conseguida con un sistema de alta concentración con pérdidas de calor elevadas, por lo que usando un aislamiento térmico más eficiente en el receptor ($\eta = 0.74$), o empleando una superficie selectiva en la que $\alpha/\varepsilon > 1.3$, es posible alcanzar temperaturas superiores a los 1,000 °C con este prototipo.

2.4 Óptica geométrica de las superficies reflectoras

El conocimiento de las propiedades de la óptica geométrica de las superficies reflejantes es fundamental para el diseño adecuado de un sistema de concentración solar, por lo que es necesario abordarlo en esta sección (Warren, 2000).

2.4.1 Óptica geométrica de la superficie reflectora plana

La reflexión especular mostrada en la figura 40 ocurre cuando un rayo incidente se refleja en una superficie plana teóricamente lisa. En este caso, el ángulo θ formado por el rayo incidente y el ángulo β formado por el rayo reflejado con respecto a la normal al punto de reflexión, son iguales presentados en la ecuación 2.21.

$$\theta = \beta \quad (2.21)$$

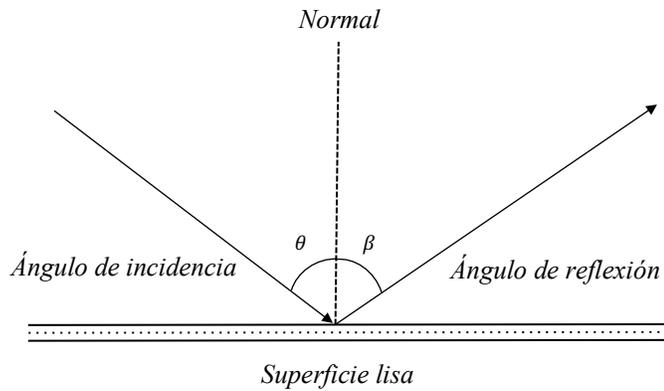


Figura 40. Reflexión especular.

En una situación real, una superficie reflejante tiene irregularidades que hacen que el ángulo de reflexión de cada rayo incidente no sea en general igual al ángulo de incidencia (a lo que se denomina error de especularidad), dispersando la concentración de flujo radiativo apreciado en la figura 41. Como ya se mencionó anteriormente, una superficie lambertiana es una superficie con una reflexión difusa ideal, que refleja la energía incidente en todas las direcciones posibles por igual, por lo que, al variar el punto de observación de la radiación reflejada, su intensidad no cambia. Si se observara la amplificación de una superficie difusora lambertiana, se notaría que es áspera, por lo que no genera ángulos de reflexión bien definidos. En la práctica, una aproximación a una superficie lambertiana se consigue dando un baño de arena a una superficie de aluminio, para producir una rugosidad regular.

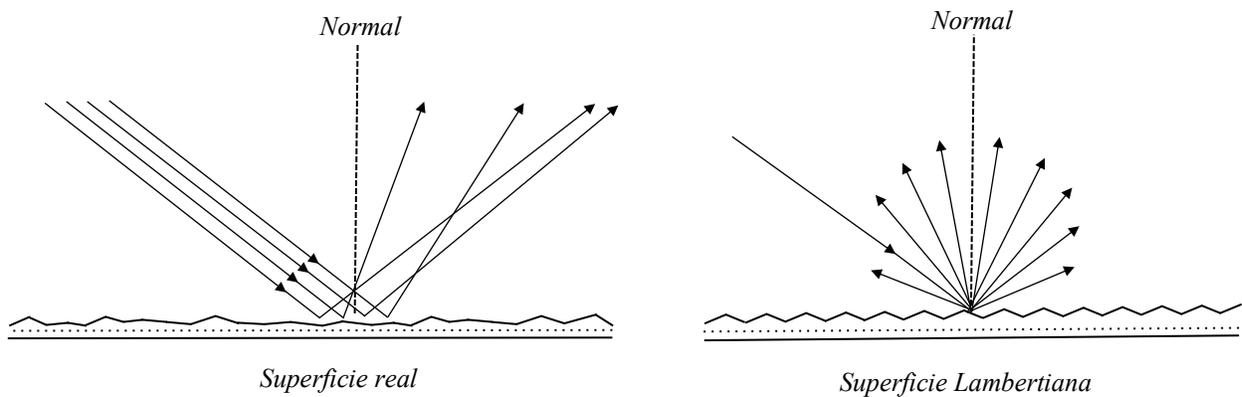


Figura 41. Reflexión difusa.

2.4.2 Óptica geométrica de superficies reflectoras cóncavas: parábola y esfera

El análisis de la geometría de las secciones cónicas, particularmente de la parábola y la esfera, nos permite obtener ciertas relaciones geométricas entre sus elementos que son de mucha utilidad cuando se les da un contexto físico en su contraparte óptica, con la que mantienen una relación estrecha al asociarse directamente con las leyes de la reflexión.

La tabla 1 muestra un comparativo de las relaciones matemáticas realizadas que surgen al expresar las magnitudes de los segmentos más representativos de la geometría de estas cónicas en función del ángulo θ formado por los segmentos FPS (Figura 42) que hacen las rectas SP paralelas al eje óptico-geométrico AO con el segmento FP . La constante f_0 , que corresponde a la distancia focal en la parábola, y al semirradio $R/2$ en la esfera (Apéndice A.3).

En ambos casos, el segmento AP es la normal al cono de reflexión en el punto P , y bisectriz del ángulo θ , que es la propiedad geométrica que permite asociar estas relaciones con la física de la reflexión especular (ecuación 2.20), como puede verse en la figura 42. Cuando se ha hecho la asociación de la geometría de estas cónicas con las leyes de la reflexión, el punto A adquiere un significado físico importante, al ser el punto en el que la normal interseca al eje óptico del sistema concentrador, y recibe el nombre de punto objetivo (o *Aim point*, de su expresión en inglés), ya que es hacia donde ‘apunta’ el sistema de concentración.

Tabla 1. Comparativo entre las relaciones geométricas de los segmentos principales en la parábola y la esfera

Segmento	Parábola	Esfera
FV	$f_0 = cte$	$f_0 + [1 - 1/\cos(\theta/2)] f_0$
$FP = AF = r$	$f_0 / \cos^2(\theta/2)$	$f_0 / \cos(\theta/2)$
AP	$2 f_0 / \cos(\theta/2)$	$2 f_0 = R = cte$
PZ_P	$2 f_0 \sin(\theta/2) / \cos(\theta/2)$	$2 f_0 \sin(\theta/2)$
FZ_P	$[2 - 1/\cos^2(\theta/2)] f_0$	$[2 \cos(\theta/2) - 1/\cos(\theta/2)] f_0$
AZ_P	$2 f_0 = cte$	$2 f_0 \cos(\theta/2)$
$Z_P V$	$[(1/\cos^2(\theta/2)) - 1] f_0$	$[1 - \cos(\theta/2)] f_0$
AV	$[(1/\cos^2(\theta/2)) + 1] f_0$	$2 f_0 = R = cte$

Los espejos parabólicos son ideales para conseguir una concentración máxima, ya que idealmente son capaces de concentrar toda la energía recibida en un solo punto, sin embargo, en la práctica, la fabricación de espejos parabólicos requiere de un proceso técnico muy elaborado, lo que repercute en un mayor costo de fabricación, por lo que la alternativa más viable técnica y económicamente es la utilización de espejos esféricos, pues para valores de θ muy pequeños (es decir, cuando los rayos inciden en la vecindad del vértice V), el $\cos(\theta/2) \approx 1$, y el término de la aberración esférica $[1 - 1/\cos(\theta/2)] f_0$, por el que el valor FV del foco real se aleja de la distancia focal ideal, es prácticamente nulo, de modo que el espejo esférico se comporta dentro de una buena aproximación como un espejo parabólico de distancia focal f_0 .

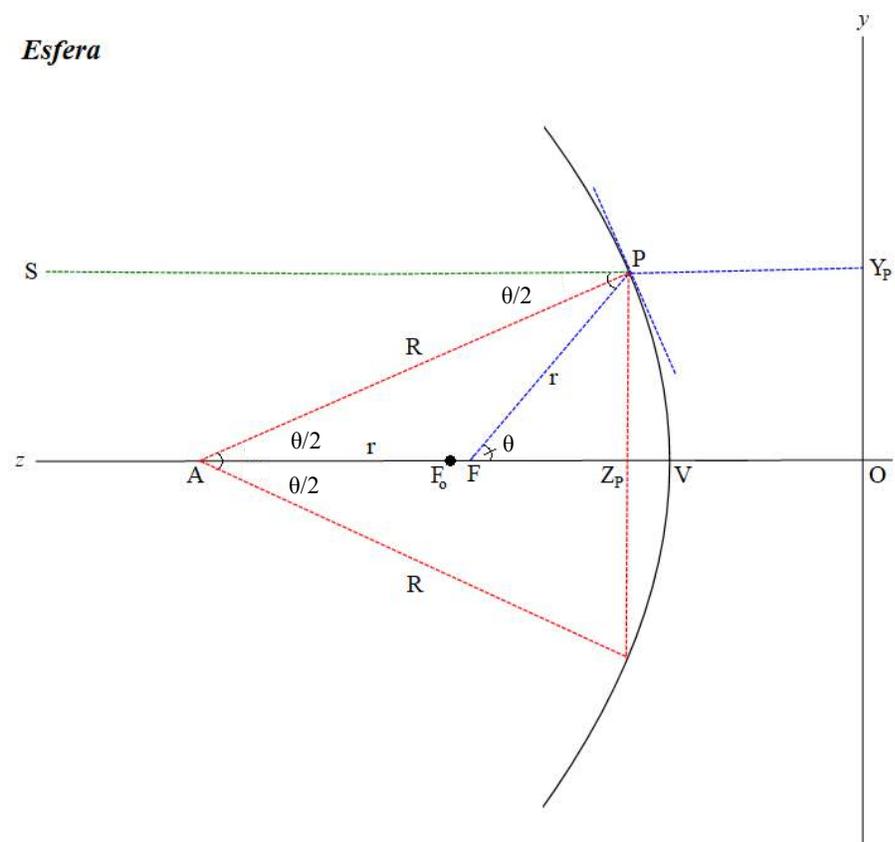
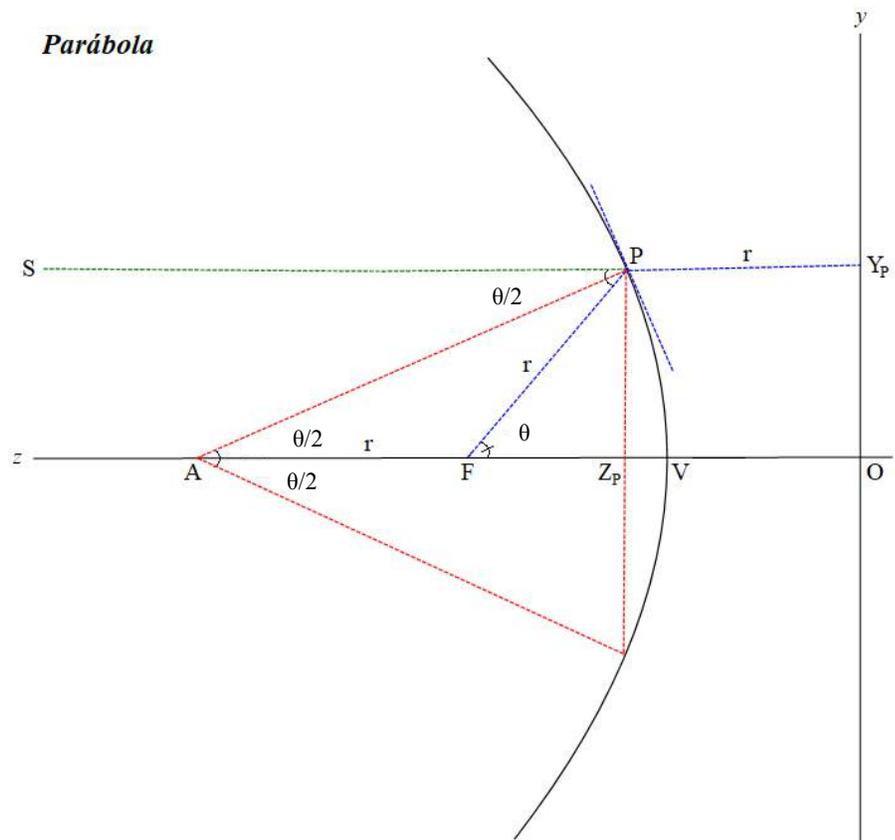


Figura 42. Relaciones geométricas en la parábola y la esfera.

Para tener un panorama más claro del efecto de la aberración esférica para ángulos pequeños, la figura 43 muestra el error porcentual respecto del valor del foco ideal de f_0 para distintos diámetros de un espejo esférico con un radio de curvatura de 4 m, donde puede verse que para el caso $D = 0.30$ m comentado en la sección anterior, el error es menor a 0.1%.

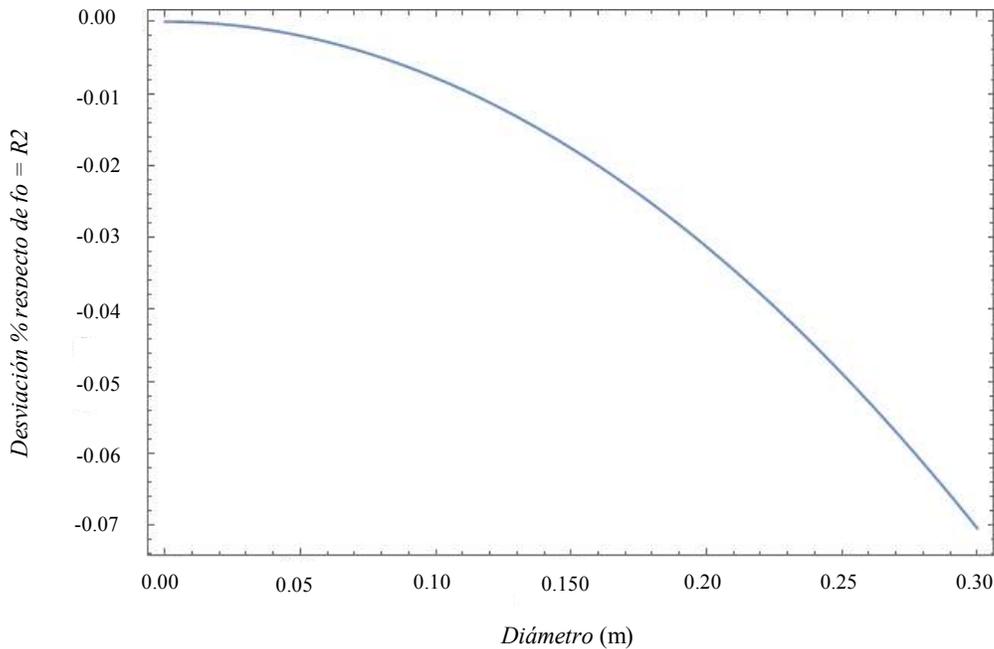


Figura 43. Desviación porcentual debida a la aberración esférica en un espejo con radio de curvatura de 4 metros

La homogeneización del flujo de irradiación en un receptor puede conseguirse mediante la realineación de los espejos en el sistema de concentración solar, por lo que es importante considerar un análisis geométrico que relacione el direccionamiento del haz de concentración solar en el receptor con el punto objetivo del espejo como se verá con mayor detalle en el siguiente capítulo.

Se consideran líneas finitas a los rayos proyectados, para así facilitar su análisis y poder mantener un control en el objetivo de concentración. El objetivo es colocado en dirección frontal a la parábola para captar la concentración, en este se formará un perfil de contorno con una determinada geometría que dependerá del direccionamiento de los rayos de cada espejo.

Considerando para esto el concepto teórico de punto objetivo que es la distancia sobre en el eje óptico que intersecta a la normal de una tangente en algún punto de la parábola. Este concepto considera hacia dónde está apuntando el espejo, que a su vez es la línea normal que tienen de referencia el rayo incidente y el proyectado para medir sus ángulos aplicando la ley de reflexión lo cual se muestra gráficamente en la figura 44.

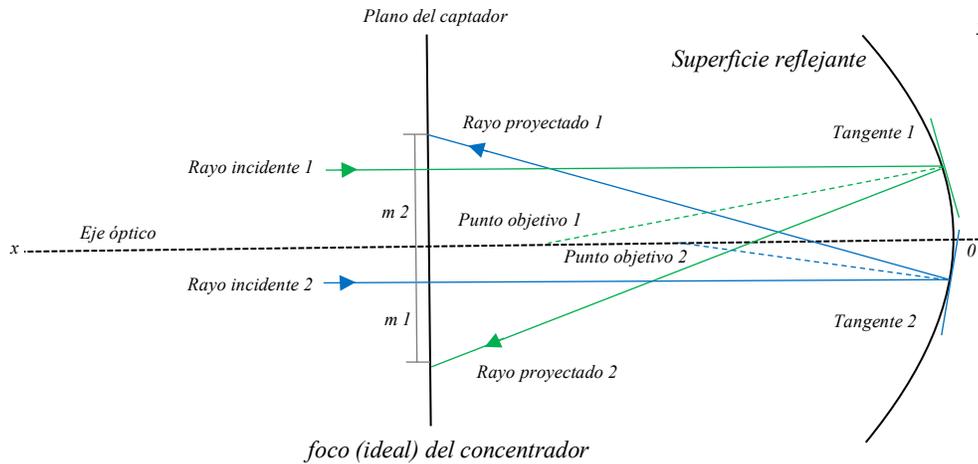


Figura 44. Representación gráfica del punto objetivo, donde se visualiza los diferentes ángulos de reflexión con respecto a su posicionamiento en el espejo concentrador.

En un análisis geométrico mostrado en la figura 45 se considera la distancia del espejo al eje óptico N , la distancia del captador al plano de espejos f y la distancia del captador al punto objetivo p . Posteriormente aplicando propiamente la ley de reflexión donde el rayo incidente se proyecta con un ángulo θ sobre la superficie parabólica, se procede mediante un análisis trigonométrico a determinar la distancia m , que es el valor de movimiento que puede tener el rayo reflejado sobre el captador.

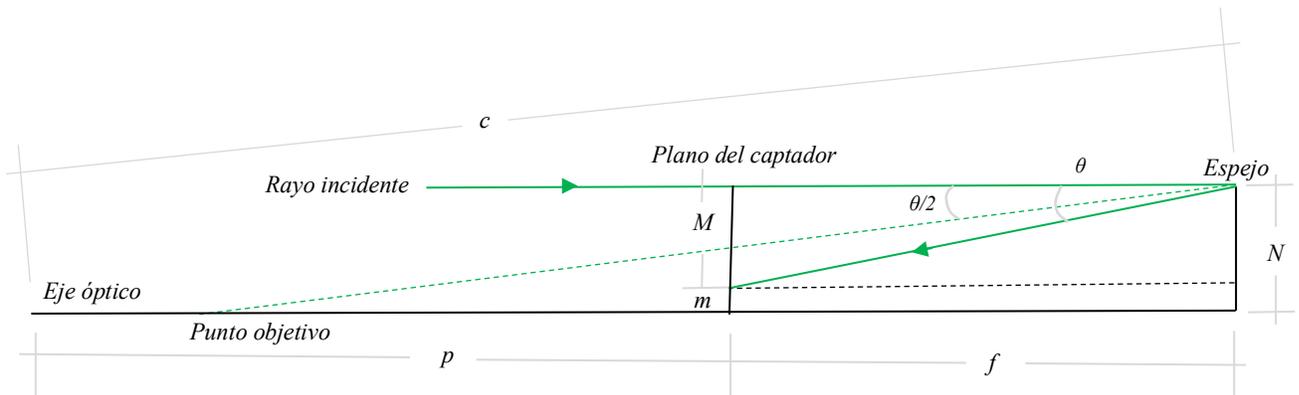


Figura 45. Esquema para el cálculo algebraico del punto objetivo realineado.

$$m = N - \left(\sqrt{\left(\frac{f}{\cos \operatorname{Sen}^{-1} \frac{2N}{\sqrt{(p+f)^2 + N^2}}} \right)^2 - f^2} \right) \quad (2.22)$$

De la ecuación 2.22 se obtiene mediante un modelo geométrico una relación entre el posicionamiento del espejo en una superficie y su punto objetivo para la obtención del geometría de reflexión de los rayos captados por objetivo el cual es colocado sobre el eje óptico.

La ecuación 2.23 se obtiene mediante un modelo geométrico, y proporciona una relación entre la variación de ángulo θ y los rayos reflejados representados por las líneas PQ' de color azul y PQ de color verde mostrados en la figura 46. Los cuales se proyectan en el plano receptor colocado sobre el eje óptico formando un ángulo $\theta/2$ entre el rayo y la normal al espejo (Apéndice A.4).

$$\overline{F_0Q} = \overline{FQ} \quad \operatorname{Sen} \theta = \operatorname{Tan} \theta \quad \overline{F_0F} = \operatorname{Tan} \theta \left(\frac{1}{\operatorname{Cos} \frac{\theta}{2}} - 1 \right) f_0 \quad (2.23)$$

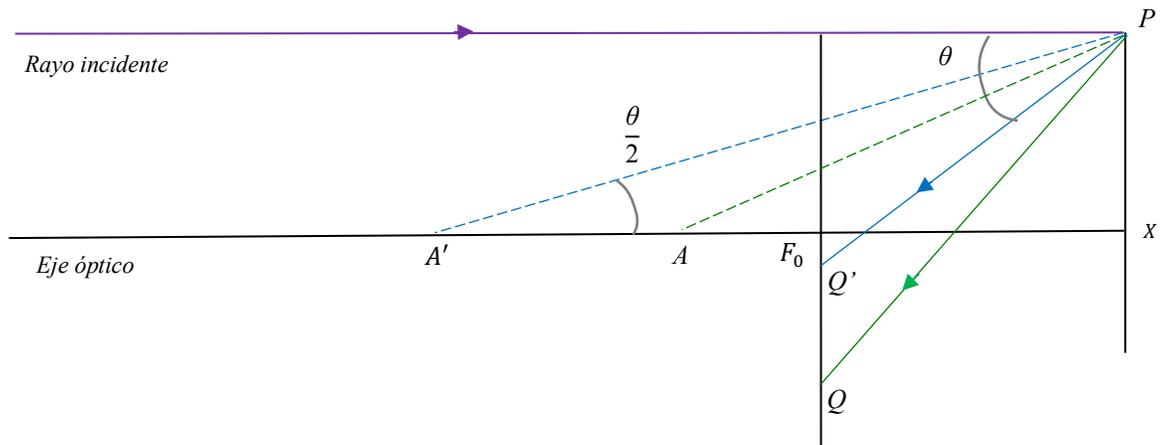


Figura 46. Esquema para el cálculo geométrico del punto objetivo realineado.

Capítulo 3

Simulación numérica del sistema de concentración para conseguir flujos radiativos homogéneos

El trabajo realizado por (Y. Meller, A. Kribus, 2013); analiza la homogeneidad de un flujo mediante la medición de la variación estadística del flujo captado en determinados puntos de la región de concentración, y que matemáticamente está descrita por el coeficiente de variación del flujo en esa región; es decir, como el cociente de la desviación estándar normalizada del flujo respecto de su promedio en el área de interés. Esta variación estadística es observada experimentalmente mediante equipos ópticos de respuesta electrónica a las variaciones del flujo de concentración, como las cámaras CCD (*Charged Coupled Devices*), o las cámaras infrarrojas. En la figura 47 (a) se observa un montaje típico para experimentación con celdas fotovoltaicas de concentración. En la figura 47 (b) se muestra una imagen obtenida a través de una cámara CCD donde no hay exposición a la radiación. En la figura 47 (c) se muestra una imagen obtenida a través de una cámara CCD de una celda de concentración solar irradiada con un perfil de intensidad no homogéneo.

Bajo esta definición, la homogeneidad de un flujo radiativo en una cierta región consiste en reducir al máximo su coeficiente de variación dentro de la misma. Esto es que, para flujos de magnitud considerablemente mayor al ruido electrónico propio de los instrumentos de medición, la homogeneidad ideal se alcanza cuando la desviación estándar, y por tanto el coeficiente de variación del flujo se anulan en esa región.

3.1 Perfiles de concentración de flujo homogéneo.

En las aplicaciones de la energía solar de concentración en sistemas térmicos de potencia o en sistemas fotovoltaicos, es deseable la obtención de perfiles de intensidad en los que la distribución del flujo radiativo es homogénea. Es más conveniente una concentración de energía distribuida en una mayor área con la misma potencia (y una temperatura más baja en el receptor), que una concentración no homogénea donde la densidad de potencia no es constante en la superficie de interés (H. Pfeiffer, M. Bihler, 1982).

Un problema característico de la energía solar concentrada aplicada a las celdas fotovoltaicas de alta concentración (*High concentration photovoltaics* HCPV por sus siglas en inglés), es la deficiencia técnica que existe al obtener perfiles de intensidad (observables experimentalmente mediante cámaras CCD por ejemplo) que no alcanzan a cubrir en su totalidad la superficie de la celda.

Debido a lo anterior es provocado un sombreado o iluminación no uniforme en la superficie que produce un decremento en la salida del voltaje (H. Pfeiffer, M. Bihler, 1982), como se puede apreciar en la figura 47. La falta de un perfil homogéneo en la distribución de la irradiancia causa puntos calientes que desajustan la corriente y reducen la eficiencia total del sistema fotovoltaico, al producir resistencias óhmicas más altas de lo esperado, principalmente porque la celda opera localmente con una mayor irradiancia (H. Baig, K.C. Heasman, T.K. Mallick, , 2012).

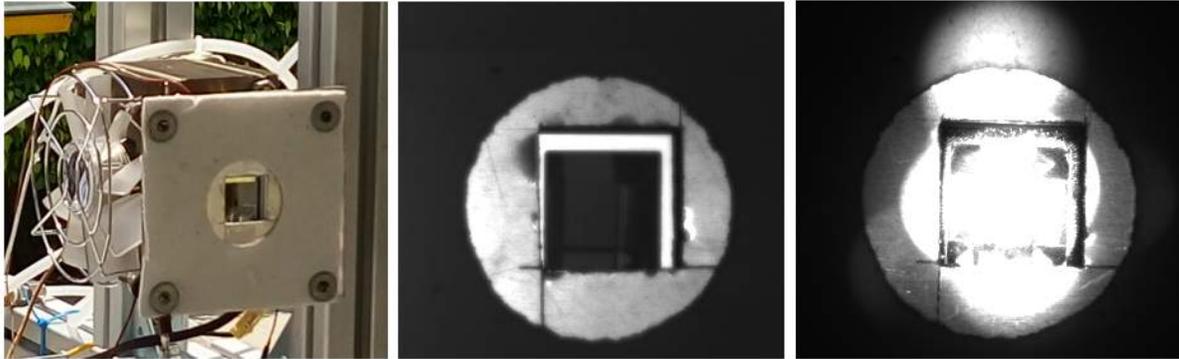
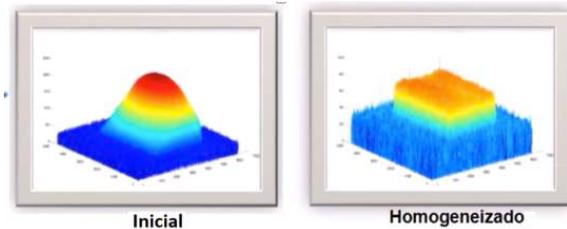
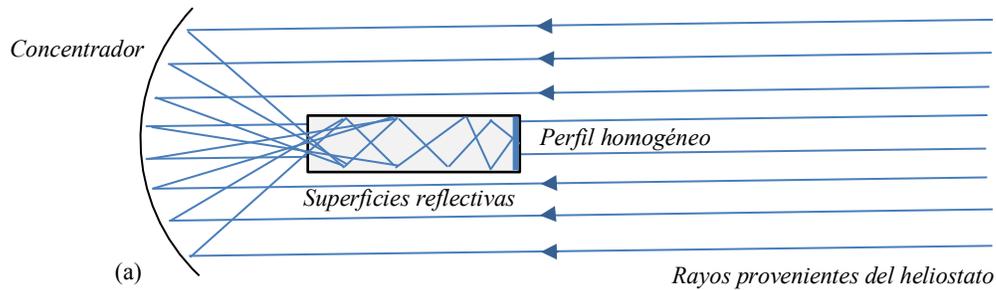


Figura 47. Experimento de concentración solar en una celda HCPV típica. (a) Montaje experimental. (b) Imagen en una cámara CCD sin exposición a la radiación. (c) Celda HCPV irradiada con un perfil de intensidad no homogéneo (LACYQS, 2018).

Conseguir una homogenización del flujo de radiación en sistemas de concentración solar de alta temperatura logra hacer más eficiente la producción de electricidad y permite tener un mejor uso de la potencia captada. Al tener altas concentraciones de energía en un perfil no homogéneo se presenta un aumento considerable en la disipación de calor debido a que el gradiente de temperatura entre el punto central y las fronteras del perfil de concentración presentan una reducción significativa, lo cual repercute en pérdidas de energía.

Tener un perfil homogéneo previene la aparición de problemas estructurales en las superficies de las celdas fotovoltaicas de concentración al alejarla del rango de temperaturas de fusión de sus materiales constitutivos (Luque A, Sala G, Arboiro JC., 1998). Es por ello por lo que, como se verá a continuación, en la actualidad se exploran distintas estrategias técnicas para alcanzar la homogeneidad en los flujos de radiación concentrada.

Una solución propuesta por (Y. Meller, A. Kribus, 2013) es la dispersión de la energía solar concentrada mediante la utilización de superficies reflejantes como se muestra en la figura 48 (a) que aportan, mediante reflexiones múltiples, perfiles de intensidad homogénea los cuales son graficados como se ve en la figura 48 (b). Dicha técnica ya ha sido usado con éxito en experimentos de homogeneización de altos flujos de radiación concentrada (E. Anguera, R. Pérez-Enciso, 2014). En este esquema es utilizado para dicho fin una superficie receptora de alúmina que se comporta como superficie lambertiana.



(c)

(b)

Figura 48. Experimento de homogeneización de flujo radiativo en el HOSIER-UNAM. (a) Esquematación del principio de funcionamiento del homogeneizador. (b): Perfiles de flujo obtenidos, inicialmente y aplicando el homogeneizador (c) dispositivo Homogeneizador de Flujos Radiativos Altamente Concentrados con Paredes Refrigeradas (HOFRAC-PR) que emplea la reflexión caleidoscópica. (LACYQS, 2018).

No obstante, esta técnica para conseguir flujos homogéneos tiene los inconvenientes de requerir un maquinado preciso en la elaboración del dispositivo caleidoscópico y de un sistema de refrigeración adicional mostrado en la figura 48 (c), lo que eleva el costo de construcción y operación del aparato que, junto con la disminución considerable de la potencia debido a las reflexiones múltiples en el interior del caleidoscopio (Y. Meller, A. Kribus, 2013), la vuelve inviable en aplicaciones industriales.

Como alternativa a estos obstáculos se ha propuesto un método de homogeneización (R. Pérez-Enciso, Alessandro Gallo., 2016) que consiste en partir de un sistema de concentración como se muestra en la figura 49 (a) para entonces desenfocar los conos de luz reflejados mediante el desplazamiento del objetivo de captación y la realineación de los espejos para hacer converger el los conos a un nuevo punto focal sobre el receptor como se aprecia en la figura 49 (b). Con esta técnica se genera un nuevo perfil de intensidades de menor potencia, pero con mayor uniformidad en una región más amplia pudiéndose considerar como homogéneo para los fines de interés industrial sin requerir de dispositivos adicionales.

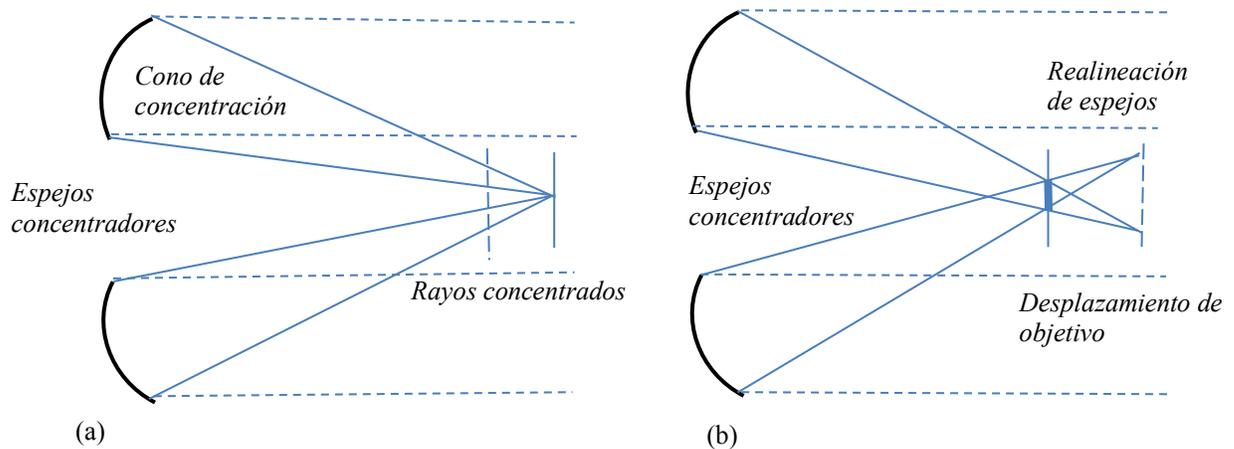


Figura 49. Diagrama de la metodología propuesta por [R. Pérez-Enciso y colaboradores](#).
 (a) espejos en concentración. (b) espejos realineados.

Desde este enfoque, el problema de la homogeneización del flujo radiativo, como tal, es un problema de carácter técnico en donde la alineación del sistema de espejos concentradores en una cierta configuración óptica juega un papel principal que requiere la utilización de mecanismos acoplados a las superficies reflectivas. Los espejos deben estar dotados de una alta precisión en su movimiento angular y de un sistema automatizado que se encargue de realizar mediante una programación característica alineamientos ópticos de manera remota en tiempo real. Sin embargo, ni el horno solar anidólico a escala (figura 25) ([D. Riveros-Rosas, 2010](#)) ni el Horno Solar del [IER-UNAM](#) y hasta donde se conoce dada la revisión del estado del arte sobre el tema, ninguno de los sistemas de concentración de los demás hornos solares en el mundo cuentan actualmente con los grados de libertad necesarios en los mecanismos de fijación de sus espejos de concentración para poder alinearlos con la resolución angular requerida para obtener perfiles de flujo homogéneos a voluntad y en tiempo real.

Debido a lo anterior, es sumamente importante el análisis, diseño e implementación de un sistema que pueda proporcionar una resolución de movimiento angular suficiente para satisfacer de manera experimental la obtención de perfiles de intensidad homogénea, que es el objetivo principal de esta tesis, y que se abordará a detalle en lo subsecuente.

3.1.4 Herramientas y metodologías para simulación numérica de flujos radiativos: SolTrace

Para poder efectuar un análisis del flujo radiativo es necesario obtener las matrices de datos experimentales de la intensidad luminosa en una cierta región observada, que generalmente están dadas por los valores en escala de grises (0 a 256) de cada uno de los píxeles de las cámaras CCD que registran el fenómeno de concentración.

Debido a que un experimento de medición de flujos de concentración solar requiere de una inversión considerable tanto en recursos técnicos como en tiempo de implementación, es común realizar previamente un experimento de simulación numérica mediante trazado de rayos que anticipe de manera cualitativa y cuantitativa los resultados esperados antes de llevar a cabo la confirmación experimental de los mismos. Una de las herramientas de simulación numérica de experimentos de concentración solar más empleadas en la actualidad, y de la que se hace uso en esta tesis, es el paquete de distribución libre SolTrace, implementado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos en programación de código abierto ([National Renewable Energy Laboratory, 2018](#)).

La metodología utilizada para realizar el trazado de rayos numérico, el cual requiere de un diseño óptico característico, es desarrollada mediante un análisis gráfico en el cual se representan las superficies de reflexión a las cuales se aplica la ley de reflexión para realizar su diseño óptico. En la figura 50 se muestra un diseño geométrico de la composición técnica del concentrador para obtener de manera gráfica y precisa los ángulos y características ópticas que serán implementadas en el trazado de rayos.

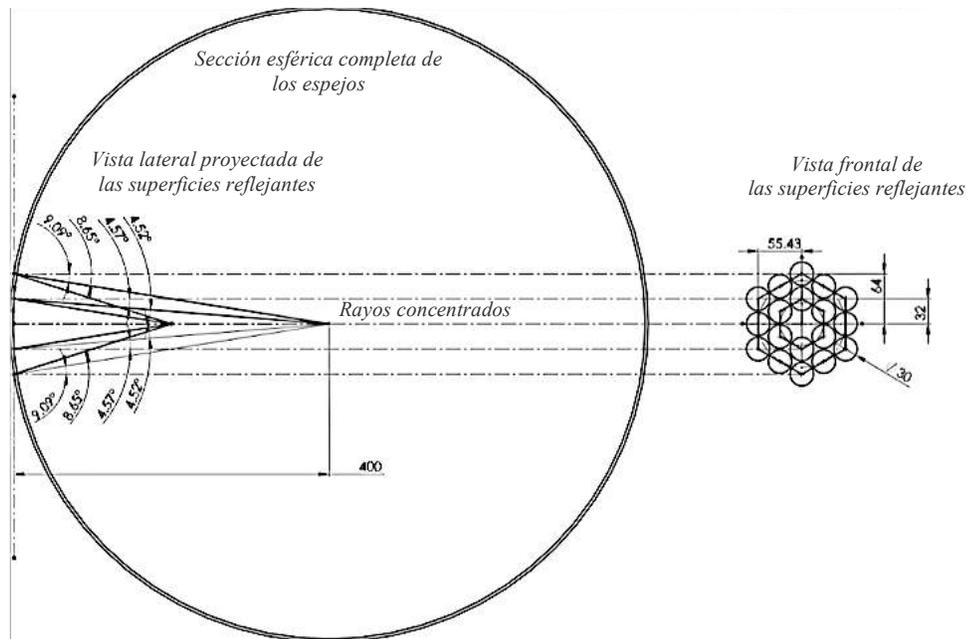


Figura 50. Trazado geométrico del concentrador.

3.2 Homogeneización de flujo por realineación de espejos

El análisis numérico de los flujos de concentración solar requiere del conocimiento de la distribución de intensidad respecto de la posición angular con la que los rayos solares llegan a la superficie terrestre. Considerando que la energía solar que incide sobre la superficie de la tierra se proyecta geoméricamente como un cono de luz. En la figura 51 se muestra el esquema para determinar geoméricamente el ángulo de incidencia del cono solar a la superficie terrestre. (Duffie, J. A. and Beckman, W., 2013). Utilizando como variables: r como la distancia del centro del Sol a la superficie de la Tierra; R que es la distancia de la superficie superior del Sol a la superficie central de la Tierra; r_s como el radio del Sol y r_t que es el radio de la Tierra.

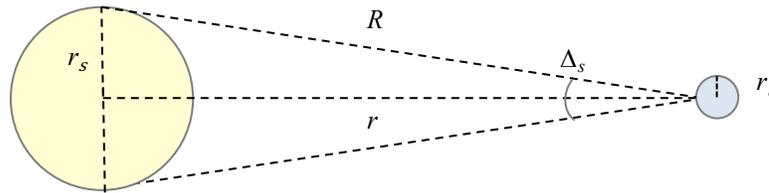


Figura 51. Cono solar.

El valor determinado para el ángulo solar es (Apéndice A.5).

$$\Delta_s = 4.65 \text{ mrad}$$

Este resultado es válido para cualquier posición en la superficie terrestre, ya que el error de esta aproximación no es perjudicial para el análisis de las aplicaciones técnicas, pues la variación máxima en este ángulo es de 1.01 %. El conocimiento del ángulo solar, de las leyes de la reflexión y de la óptica geométrica de los espejos cóncavos consideradas en el capítulo anterior nos permite predecir analíticamente la disposición angular de los rayos solares en el cono de luz reflejado. Sin embargo, la determinación de la distribución real de las intensidades $B(\theta)$ en relación con el ángulo de los rayos respecto al eje del cono solar requiere de mediciones experimentales adicionales, ya que ésta no es constante en el tiempo ni independiente de la localización geográfica, además de verse también afectada por las condiciones climáticas. Empleando entonces para fines prácticos distintas distribuciones aproximadas para representar este perfil solar de intensidades.

Determinando como θ al ángulo de barrido del eje central del cono solar hasta completar el ángulo Δ_s (figura 52 (a)), se puede relacionar gráficamente con $B(\theta)$ en la figura 52 (b) donde se muestra el perfil de Sol Uniforme, o *pillbox* (por la expresión en inglés para su forma de ‘caja de píldoras’). Un perfil solar tipo *pillbox* sería obtenido en un caso ideal y teórico si todo el disco solar irradiara a la misma intensidad en cualquier ángulo solar, es por eso que en la figura 52 (b) los valores de $B(\theta)$ son iguales para cada valor de θ , y cero en el caso de tener valores nulos de ángulo. En la figura 52 (c) se muestra el perfil de Sol estándar, que es una mejor aproximación a los perfiles hallados en las mediciones experimentales. (C.A. Arancibia-Bulnes y D. Riveros-Rosas, 2013). Siendo el área de los perfiles la variable de interés, por eso su variación en $B(\theta)$.

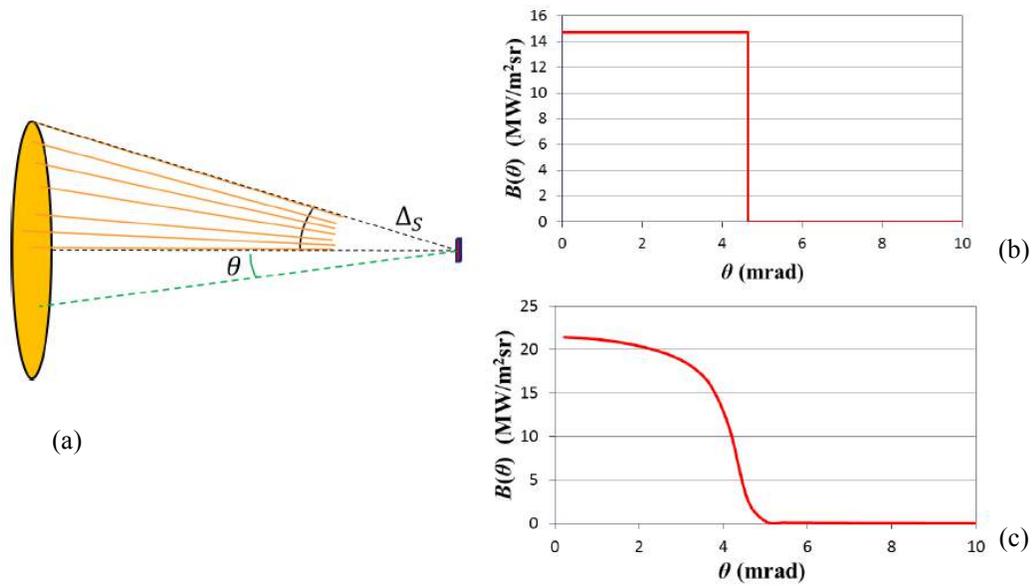


Figura 52. (a) El disco solar (b) Distribución $B(\theta)$ para perfil solar uniforme. (c) Distribución $B(\theta)$ para perfil solar estándar (C.A. Arancibia-Bulnes y D. Riveros-Rosas, 2013).

En un espejo ideal, sin ninguna imperfección superficial, la distribución de intensidades observada en el reflejo (figura 53 (a)) deberá tener una forma (normalizada) similar a la del Sol estándar de la figura 52 (c). Sin embargo, los espejos reales tienen imperfecciones que harán que la conducta de los rayos reflejados se aleje de la esperada por las leyes de la reflexión (figura 53 (b)), por lo que se denominan fuentes de error óptico, o simplemente, errores ópticos del espejo.

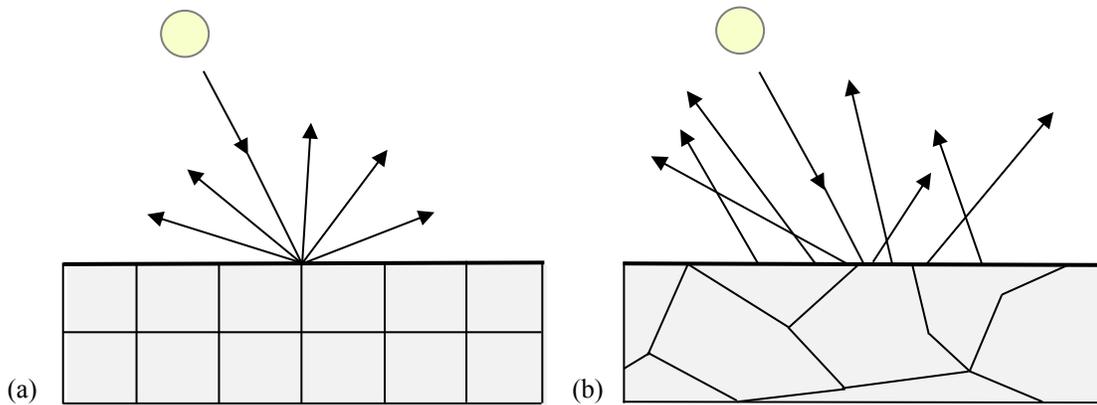


Figura 53. (a) Distribución molecular de un espejo teórico que no presenta error de especularidad. (b) Distribución molecular de un espejo que presenta error de especularidad.

El error de especularidad es una propiedad de las superficies reflectivas que consiste en la forma en que la reflexión se lleva a cabo en comparación a una propagación uniforme de los rayos en un espejo ideal donde teóricamente no existe error alguno, a una distribución no uniforme en los espejos reales donde se presenta dicho error (figura 53). El error de especularidad está en función de la distribución molecular de los espejos, donde la influencia de dicho error en la distribución $B(\theta)$, medida en mrad, es la diferencia de apertura que existe entre el ángulo solar Δ_s de 4.65 mrad y el cono proyectado, el cual presenta una ampliación debido a dicho error óptico (figura 54) (Henrik Wann Jensen, Stephen R. Marschner, Marc Levoy, Pat Hanrahan.).

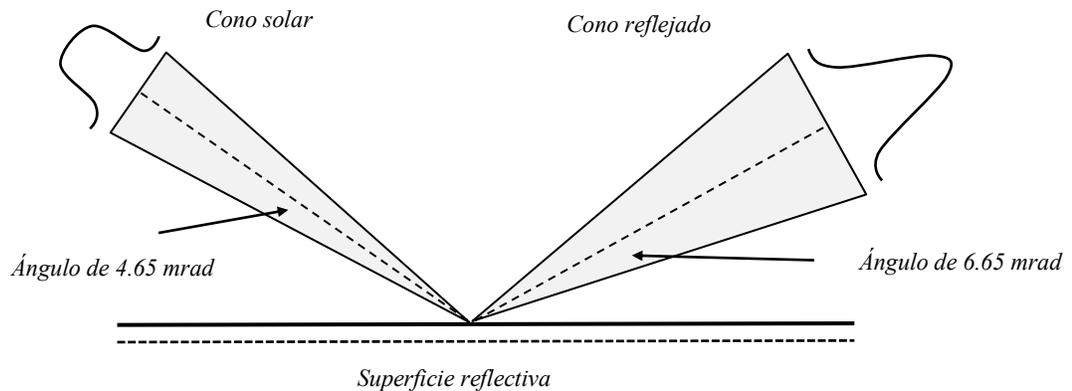


Figura 54. Representación geométrica del cono de luz reflejado en un espejo con 2 m rad de error de especularidad.

La distribución $B(\theta)$ que resulta de incluir el efecto estadístico de los errores ópticos es llamada el Sol Gaussiano (figura 55), debido a que su distribución sigue la ecuación matemática de la función de Gauss, con media 0 y desviación estándar igual al error óptico total del espejo (Ari Rabl, 1985).

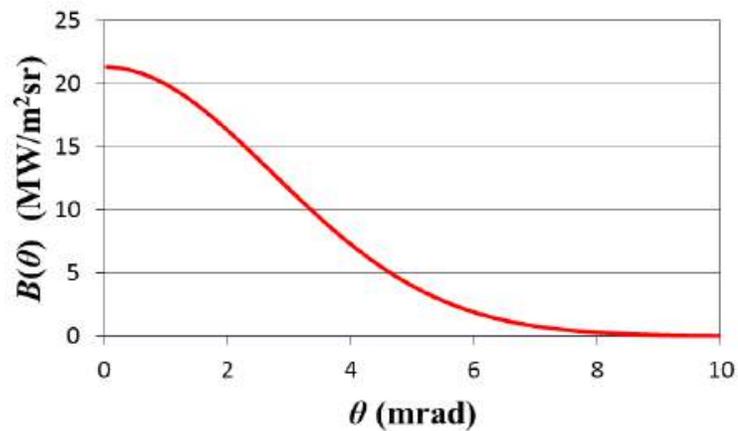


Figura 55. Distribución del Sol Gaussiano (C.A. Arancibia-Bulnes y D. Riveros-Rosas, 2013).

3.1.2 Región efectiva de homogeneización

Como ya se mencionó anteriormente, el objetivo de esta tesis es el diseño de un sistema concentrador que permita obtener perfiles de concentración homogéneos siguiendo la estrategia de realineación de los espejos concentradores propuesta anteriormente propuesta (R. Pérez-Enciso, Alessandro Gallo., 2016). Aunque los autores de la técnica de realineación implícitamente asumen que ésta se cumple para todas las distancias de desplazamiento, y explícitamente afirman que la homogeneización se mejora mediante el uso de espejos de error óptico cercano a 0. Los estudios numéricos realizados indican que no es así, ya que no existe diferencia considerable en la región de homogeneización para los resultados con variación en los errores ópticos como se verá posteriormente en la figura 58.

La figura 56 muestra los resultados de las simulaciones en SolTrace para la homogeneización del flujo de 3 espejos esféricos concentradores idénticos de 30 cm de diámetro y radio de curvatura de 4 m, siguiendo la técnica propuesta en (R. Pérez-Enciso, Alessandro Gallo., 2016), presentando los perfiles de intensidad separados entre sí como se muestra en la figura 49 (a), representando los conos de luz captados por el objetivo en líneas punteadas, desplazándolo a 2 m, 1.7 m y 1.4 m de concentrador.

En la figura 57, se muestran los resultados de los perfiles obtenidos en la simulación numérica ya homogeneizados, donde se realinearon los espejos para juntar los perfiles de concentración de cada uno como se muestra en la figura 49 (b). La homogeneización se puede dar por válida cualitativamente observando los perfiles de la figura 57 donde se aprecia que la región de concentración se vuelve totalmente horizontal, sin embargo, entre más se incrementa la superficie de concentración, más se reduce la cantidad de flujo radiativo obtenido por la concentración como se observa en la figura 58. Esto da pie a considerar que la superficie homogénea debe estar relacionada a su aplicación técnica, por ejemplo, en el caso de las celdas fotovoltaicas de concentración únicamente homogeneizar la superficie de la celda solar. Dicho esto, la propuesta en esta tesis para homogeneizar flujos propone que el objetivo no se moverá en el proceso de concentración y únicamente se realinearán los espejos obteniendo así una única configuración de homogeneización que asegura se mantendrá el flujo radiativo como se muestra más adelante en las simulaciones numéricas, obteniendo con esto un flujo invariable en la técnica de homogeneización.

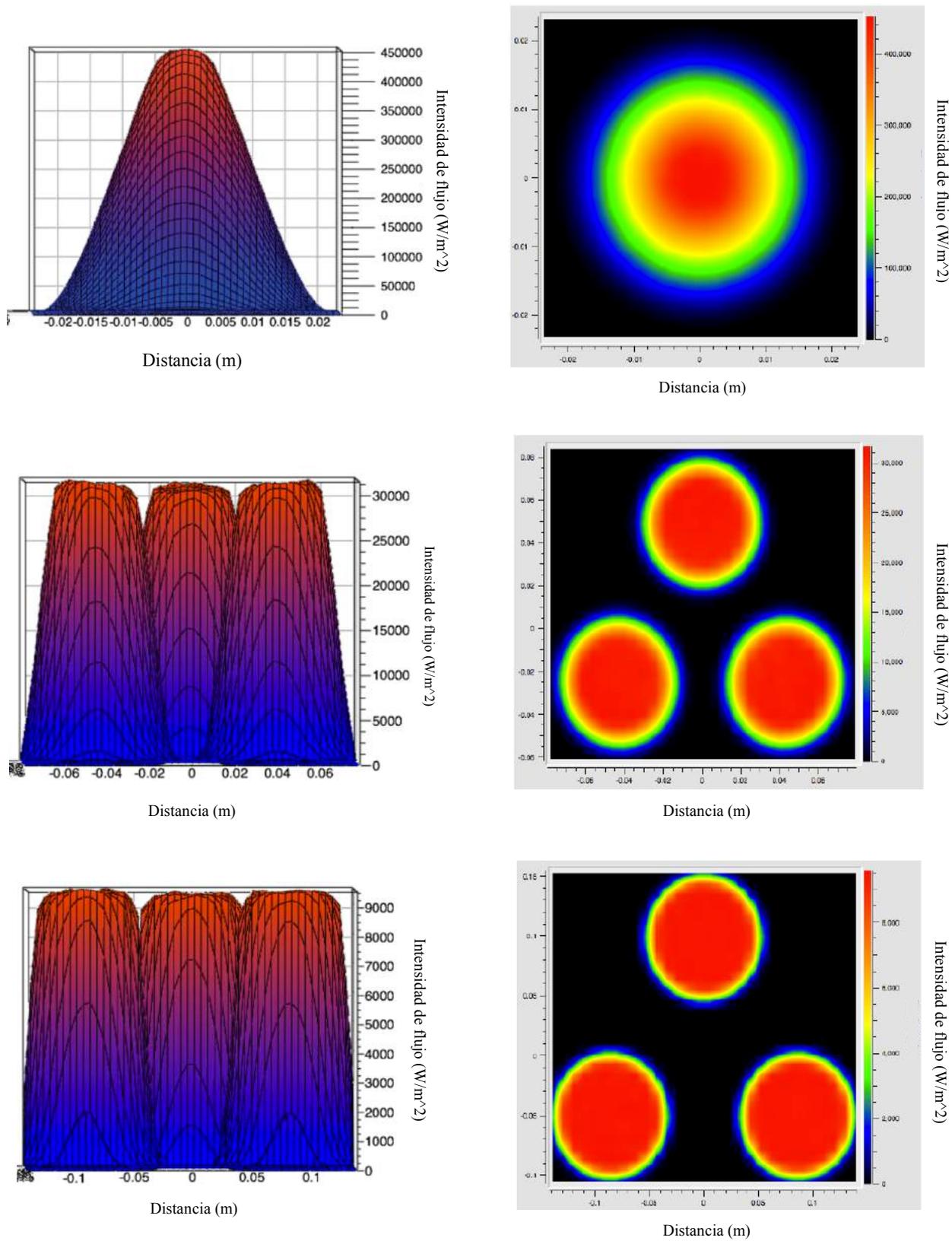


Figura 56. Resultados de la simulación de trazado de rayos para tres espejos esféricos de $R = 4$ m, alineación de enfoque original y punto objetivo a 2 m, 1.7 m y 1.4 m. Con error de especularidad de 2 mrad

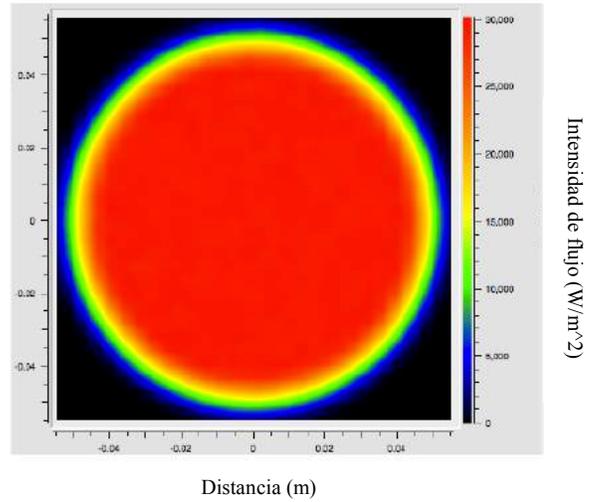
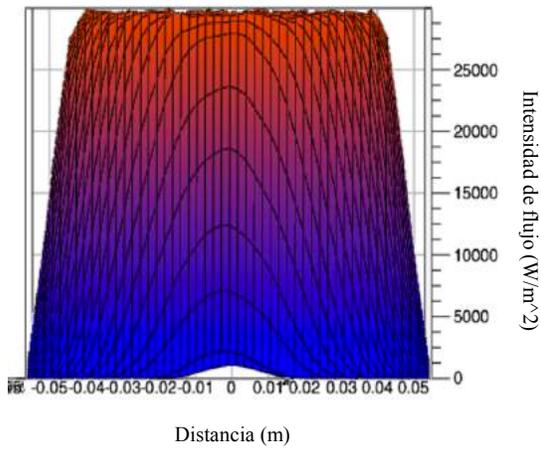
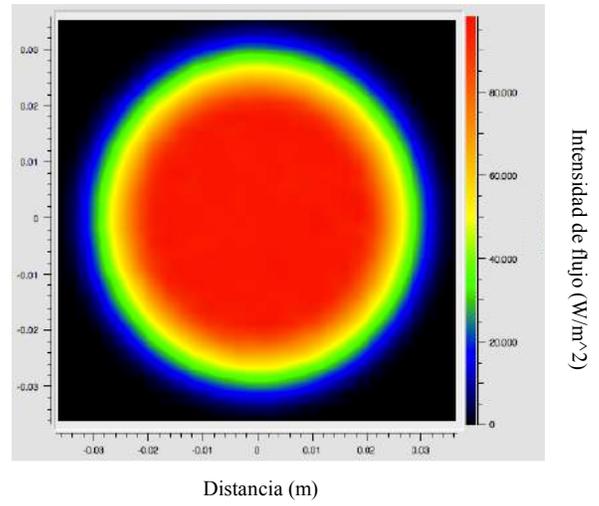
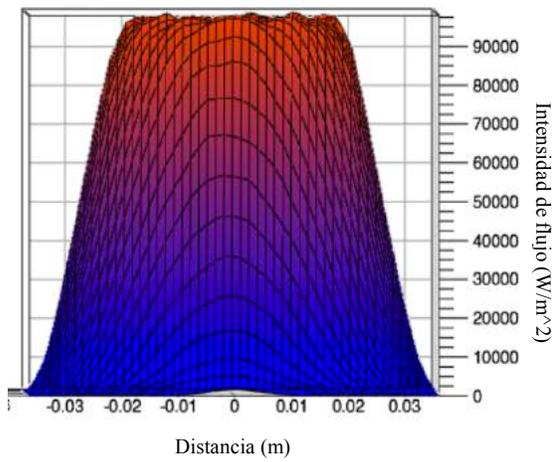
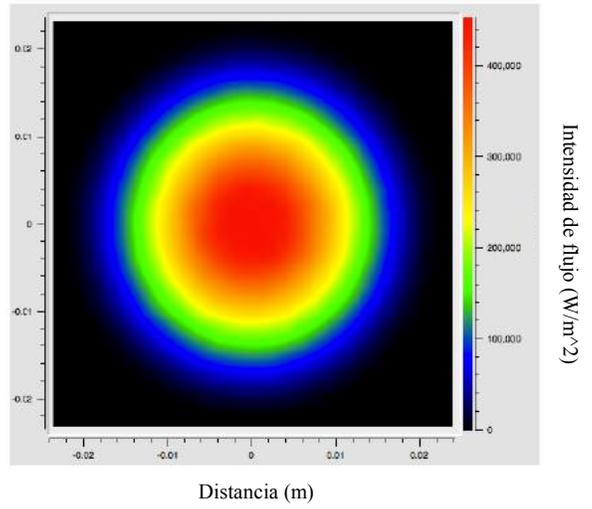
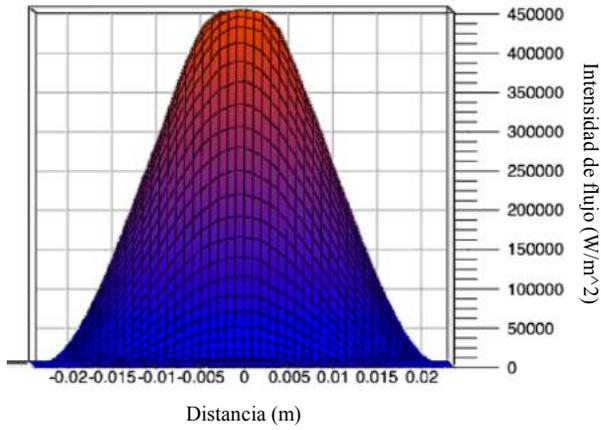


Figura 57. Resultados de la simulación de trazado de rayos para tres espejos esféricos de $R = 4$ m, alineación de enfoque realineada y punto objetivo a 2 m, 1.7 m y 1.4 m. Con espejos de error de especularidad de 2 mrad.

La figura 58 muestra el valor de los picos de intensidad (valores máximos) de la distribución de intensidades del spot de concentración del sistema de tres espejos descrito, pero variando el error óptico de 0 a 2 mrad, y comparando también los resultados para espejos con un radio de curvatura ligeramente distinto ($R = 4.196$ m), señalando la región de desplazamientos en la que se presenta el área de homogeneización máxima, de acuerdo con su definición formal.

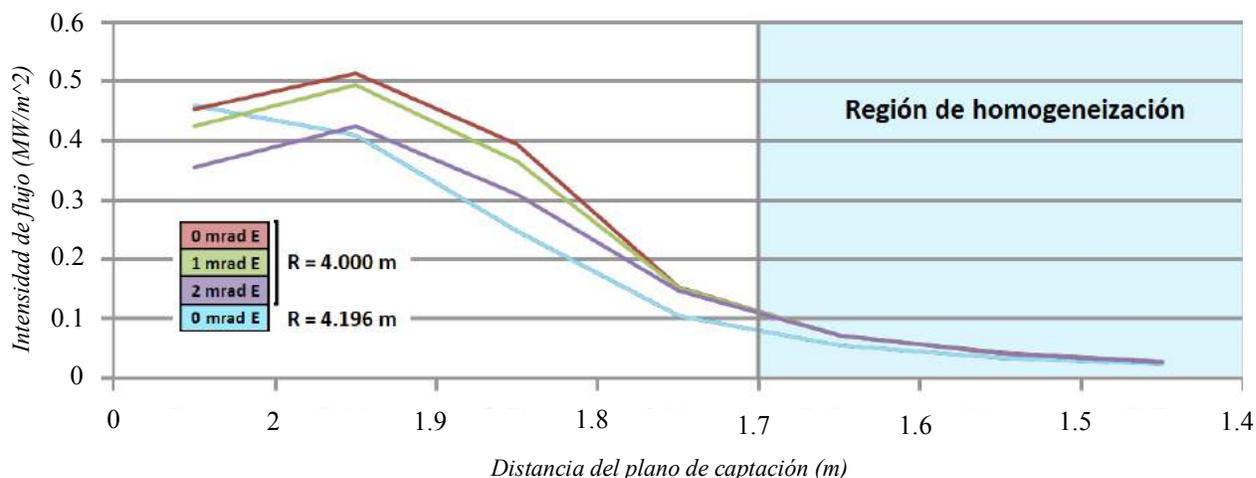


Figura 58. Región de homogeneización efectiva para distintos errores ópticos y radios de curvatura.

Los resultados de esta técnica (R. Pérez-Enciso, Alessandro Gallo., 2016), muestran que el empleo de espejos de mayor o menor error óptico es indiferente entre mas se aleja el receptor para obtener una superficie homogénea mayor. La teoría de homogeneización propuesta más adelante en esta misma tesis puede servir como complemento para obtener homogeneización de flujos por realineación de espejos concentradores.

3.3 Teoría de homogeneización de flujos por mezclado estadístico gaussiano

El perfil de intensidad gaussiano que aparece por efecto de los errores ópticos de los espejos concentradores proporciona una interpretación física de la conducta de los fotones en la región de concentración solar sobre un blanco lambertiano, que es realmente el efecto que detectan las cámaras CCD al registrar la intensidad del spot solar de concentración. En dicha referencia se explica que la forma solar efectiva puede interpretarse estadísticamente como un conteo de fotones (de una intensidad promedio dada) en una cuadrícula de cierta área (pixeles de la cámara CCD), que es en esencia el procedimiento estadístico para el cálculo de intensidades que efectúa un software de simulación, como SolTrace. El flujo y la potencia en el área del spot de un espejo concentrador se puede obtener fácilmente de forma experimental mediante un sensor de irradiación y un análisis de la imagen en escala de grises del CCD. En el caso más simple, cuando la distribución gaussiana es simétrica, puede estudiarse mediante su(s) distribución(es) límite en los planos XZ o YZ , siendo Z la dirección del eje óptico de concentración.

Aunado al punto anterior, también se menciona que la combinación de las intensidades fotónicas con las que contribuye cada uno de los distintos espejos concentradores debe ser tratada como una mezcla estadística, y no como una convolución ya que se obtendrían resultados diferentes a los fenómenos físicos que suceden al mezclar dos perfiles de concentración solar. Si se aplica la teoría de las mezclas estadísticas al perfil conjunto de dos espejos concentradores idealmente idénticos con una firma de intensidad gaussiana, es posible encontrar que si el cociente entre el módulo de la diferencia en la posición (lineal) de los picos de intensidad de cada una de sus respectivas distribuciones límite y la suma de sus desviaciones estándar asociadas es menor a un cierto factor de separación, que a su vez depende del cociente de dichas desviaciones, la imagen mezclada resultante es siempre unimodal, y, para ciertos casos, virtualmente constante en la región de mezclado estadístico para la escala de detección.

En términos matemáticos $f_1(x)$ en la ecuación 3.1 siendo una función gaussiana, es el perfil de intensidad del espejo 1.

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (3.1)$$

$f_2(x)$ es el perfil análogo para el espejo 2, y p_1 es la fracción de la intensidad total del spot combinado con la que contribuye el espejo 1, de manera que $(1-p_1)$ es la fracción con la que contribuye el espejo 2, entonces el perfil f de intensidad del haz combinado está dado por la ecuación 3.2.

$$f = p_1 f(x)_1 + (1-p_1) f(x)_2 \quad (3.2)$$

El perfil gaussiano será unimodal para todo p , si (Schilling M.F., Watkins A.E., Watkins W. , 2002).

$$\frac{|\mu_2 - \mu_1|}{\sigma_2 + \sigma_1} \leq S(r) = \frac{\sqrt{2(1-r+r^2)^{\frac{3}{2}} - 2r^3 + 3r^2 + 3r - 2}}{\sqrt{r}(1+\sqrt{r})} \quad (3.3)$$

Donde μ_2 y μ_1 son las coordenadas de los máximos de intensidad, σ_2 y σ_1 las desviaciones estándar de f_1 y f_2 respectivamente (figura 59) y r está dado por el resultado de σ_1^2/σ_2^2 . Así, la distancia neta entre los máximos de los perfiles de intensidad de cada espejo se define en la ecuación 3.4.

$$d = |\mu_2 - \mu_1| = S(r)(1+\sqrt{r})\sigma_2 \quad (3.4)$$

La ecuación 3.4 define la frontera entre la unimodalidad y la bimodalidad, que empíricamente es el valor que se debe conseguir mediante el realineamiento de los espejos concentradores para obtener un perfil combinado homogéneo como se muestra en la figura 59 (b) y la figura 60.

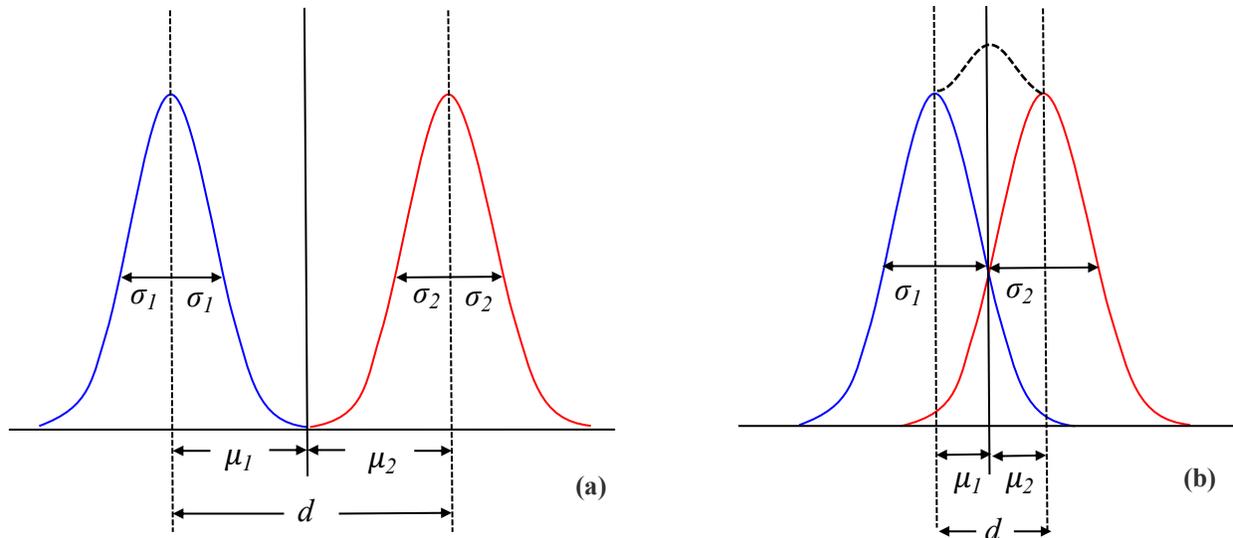


Figura 59. Mezcla de dos funciones gaussianas. (a) Bimodal. (b) Unimodal.

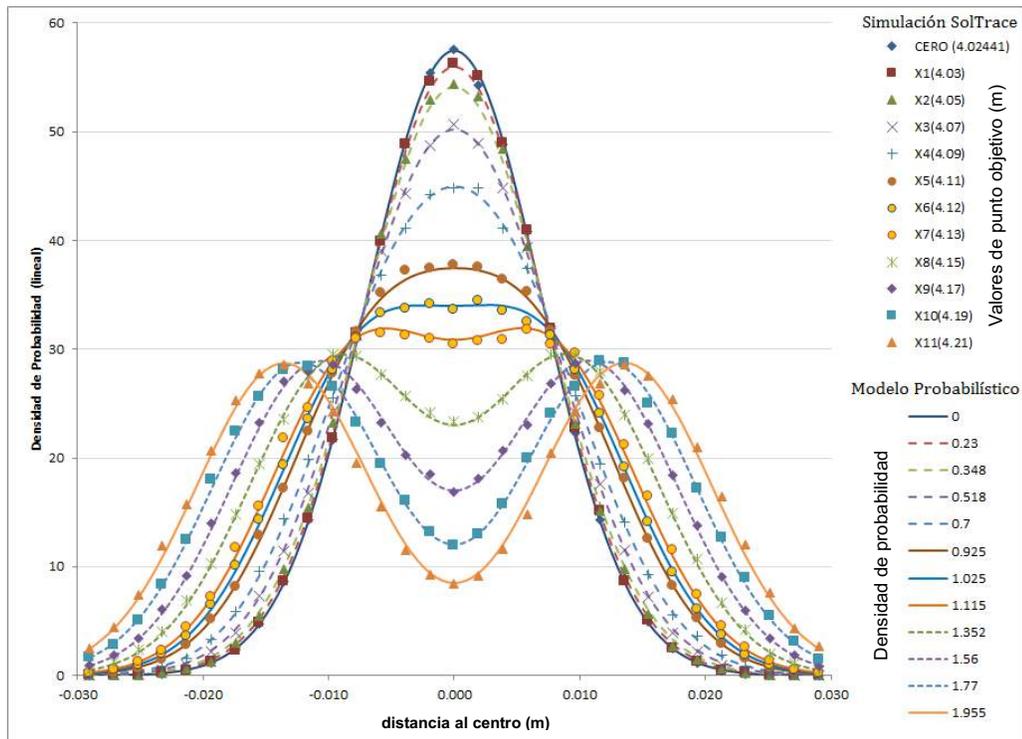


Figura 60. Comparación del modelo probabilístico y la simulación numérica de la mezcla estadística de dos perfiles de intensidad gaussianos (L., 2016).

De acuerdo con la definición formal de homogeneidad del flujo, el coeficiente de variación del flujo en la región de interés debe anularse como se muestra en la figura 60, lo que en términos de la matemática previa implica que la derivada de la ecuación 3.2 debe anularse también en dicha región. Aunque analíticamente esto no ocurre más que en μ_1 y μ_2 , en la escala de las variaciones numéricas se obtiene una conducta muy cercana a la ideal en una cierta región espacial (figura 61) que se corresponde con el caso cuando la distancia de separación entre los máximos de intensidad del perfil de cada espejo individual es precisamente la dada por la ecuación 3.2 (Apéndice A.6).

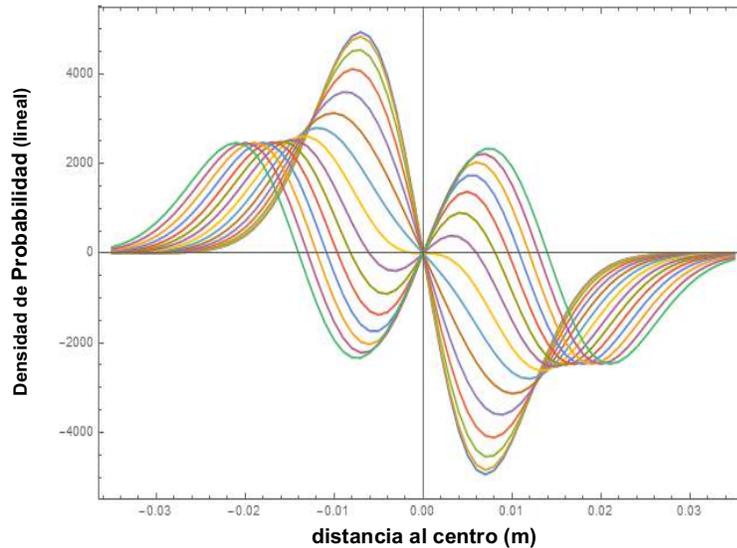


Figura 61. Derivada de la mezcla de funciones gaussianas para distintos valores de separación d (L., 2016).

3.4 Simulación de flujo de dos espejos

Para mejorar el entendimiento de la homogeneización de flujo mediante la teoría previa con datos propios, se simuló en SolTrace el trazado de rayos de dos espejos con superficies esféricas de 4 m de radio de curvatura y diámetro de apertura de 30 cm, separados 32 cm de sus centros obteniendo en Soltrace la configuración plasmada en la figura 62 (a), utilizando un error óptico no nulo para generar un perfil de intensidad gaussiano en dos dimensiones. El perfil circumsolar utilizado es una de las opciones predeterminadas por el mismo programa computacional SolTrace para el perfil del sol estándar como se ve en la figura 62 (b).

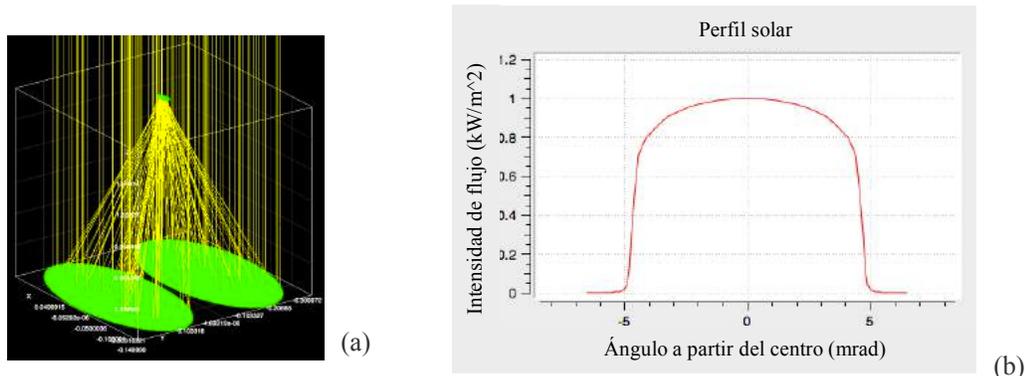


Figura 62. (a) Esquema mostrando el trazado de rayos en los dos espejos. (b) Perfil solar utilizado en la simulación (Soltrace).

En el caso hipotético en que los espejos reflectores no contaran con ningún tipo de error, se obtendría en receptor la reproducción del perfil circunsolar reflejado sobre la superficie de proyección como se aprecia en la figura 63. Mientras que con un error óptico global de 4 mrad asignado a los espejos, el perfil en el receptor tendrá una estadística propia de un perfil gaussiano mostrado en la figura 64. Obteniendo con esto un menor volumen a la del perfil con error nulo, es decir menor potencia. El decremento del volumen del perfil depende del aumento en el error óptico, siendo un error de 4 mrad un error de superficies reflectivas de baja calidad.

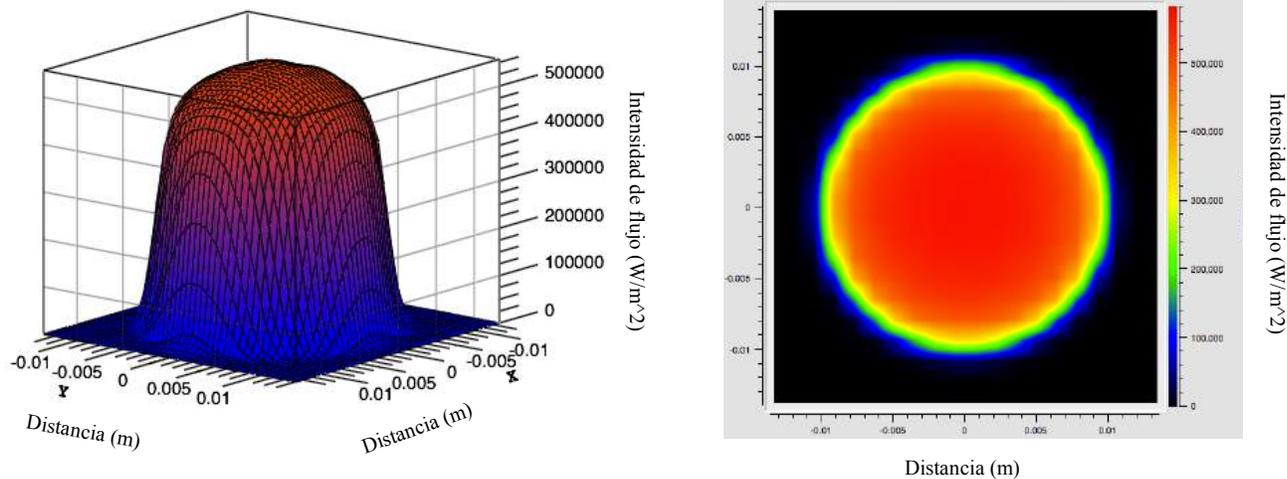


Figura 63. Simulación sin error óptico.

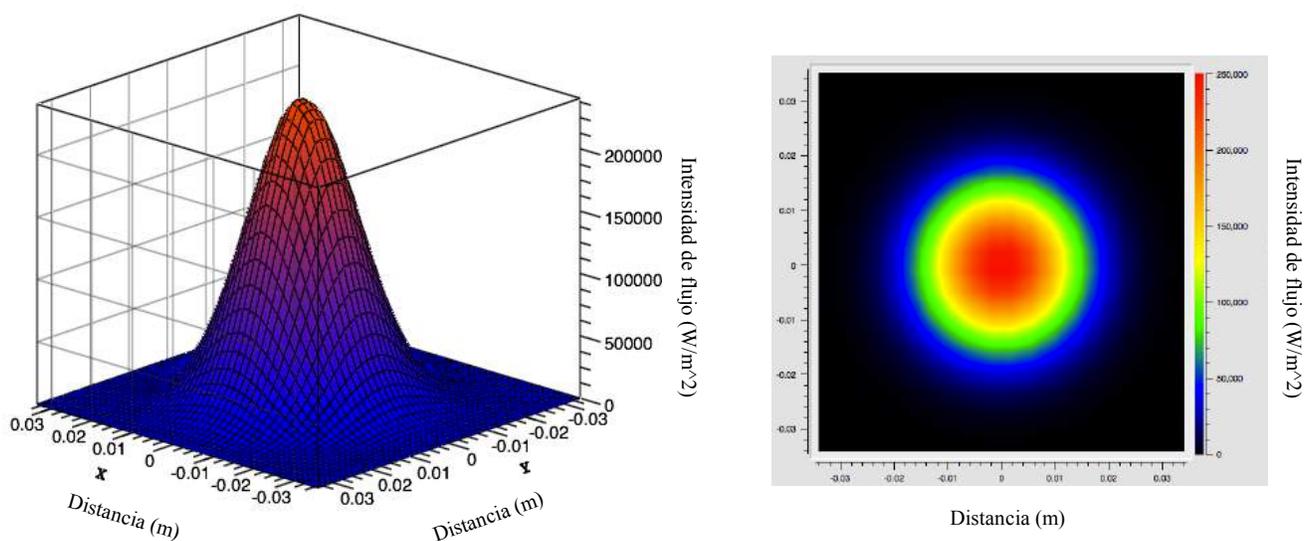


Figura 64. Simulación con error óptico de espectralidad de 4 mrad

Utilizando la teoría de homogeneización de mezclado estadístico gaussiano y métrica propuesta analizada en la sección 3.3, y manipulando el punto objetivo de los espejos, es decir presnetando una variación en sus ángulos de reflexión 1.5 grados, se observa que la ampliación del perfil se efectúa solamente en un eje, en este caso, el eje vertical ya que no se logra obtener un perfil circular con un diametro constante, formando una superficie mayor pero no geométricamente uniforme como se puede apreciar en la figura 65(b).

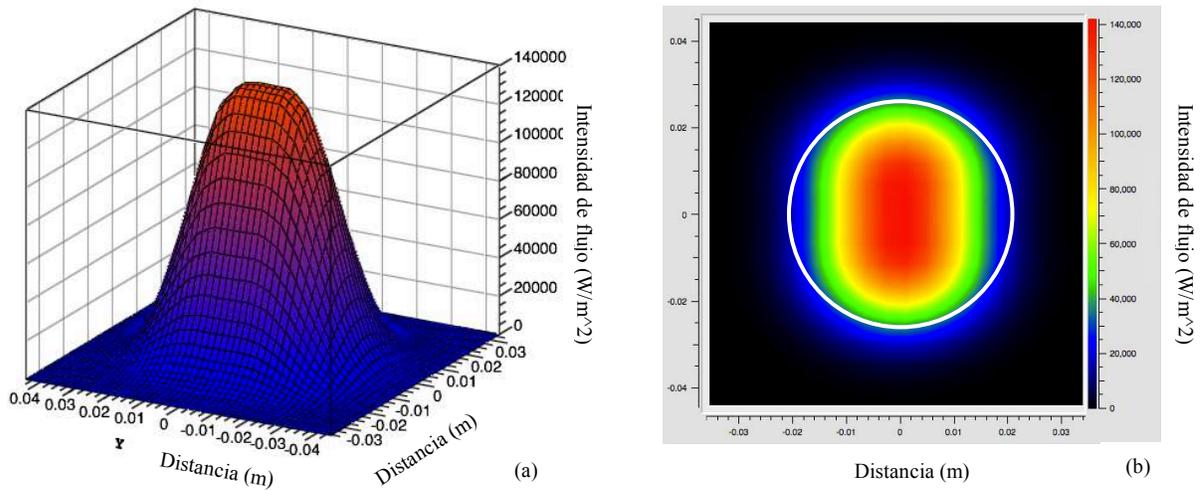


Figura 65. Simulación de distribución de flujo en un solo eje, con error óptico de especularidad de 4 mrad.

En la figura 66, se observa el perfil de contorno obtenido en la simulación sobre un eje coordenado de abscisas y ordenadas, se observa que hay un incremento de la superficie de concentración sobre el eje y , el cual es trazado por líneas de color rojo obteniendo una distancia de 4 cm aproximadamente, mientras que en el eje x , la distribución permanece con la misma distancia siendo de 2 cm aproximadamente.

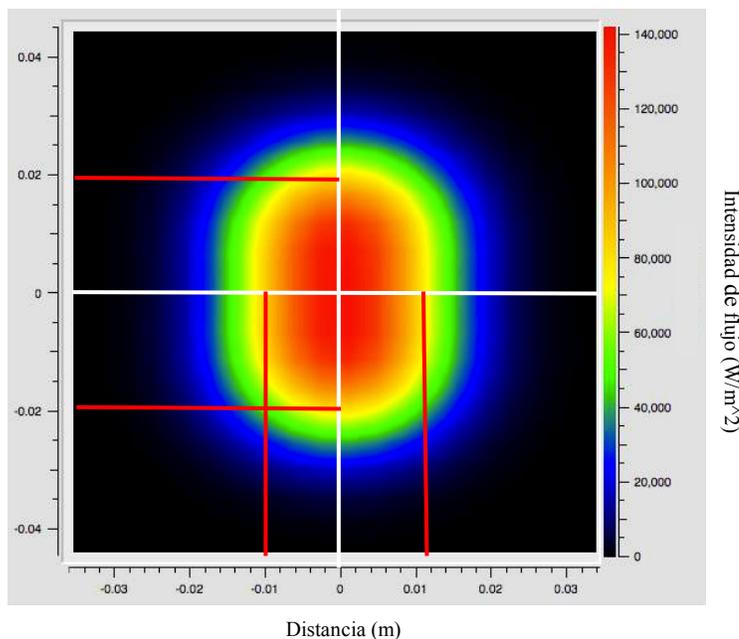


Figura 66. Perfil de contorno en con eje coordenado.

Las gráficas del perfil contorno de la figura 67 muestran los resultados de las simulaciones empleando 5,000,000 de rayos aleatorios, manipulando el punto objetivo de cada espejo incrementandolo en intervalos de 3 cm en una distancia de 30 cm los cuales se aprecian en la figura 67 a un lado de cada perfil de contorno correspondiente. Se puede observar que el desplazamiento del punto objetivo produce la separación paulatina de los dos perfiles de contorno.

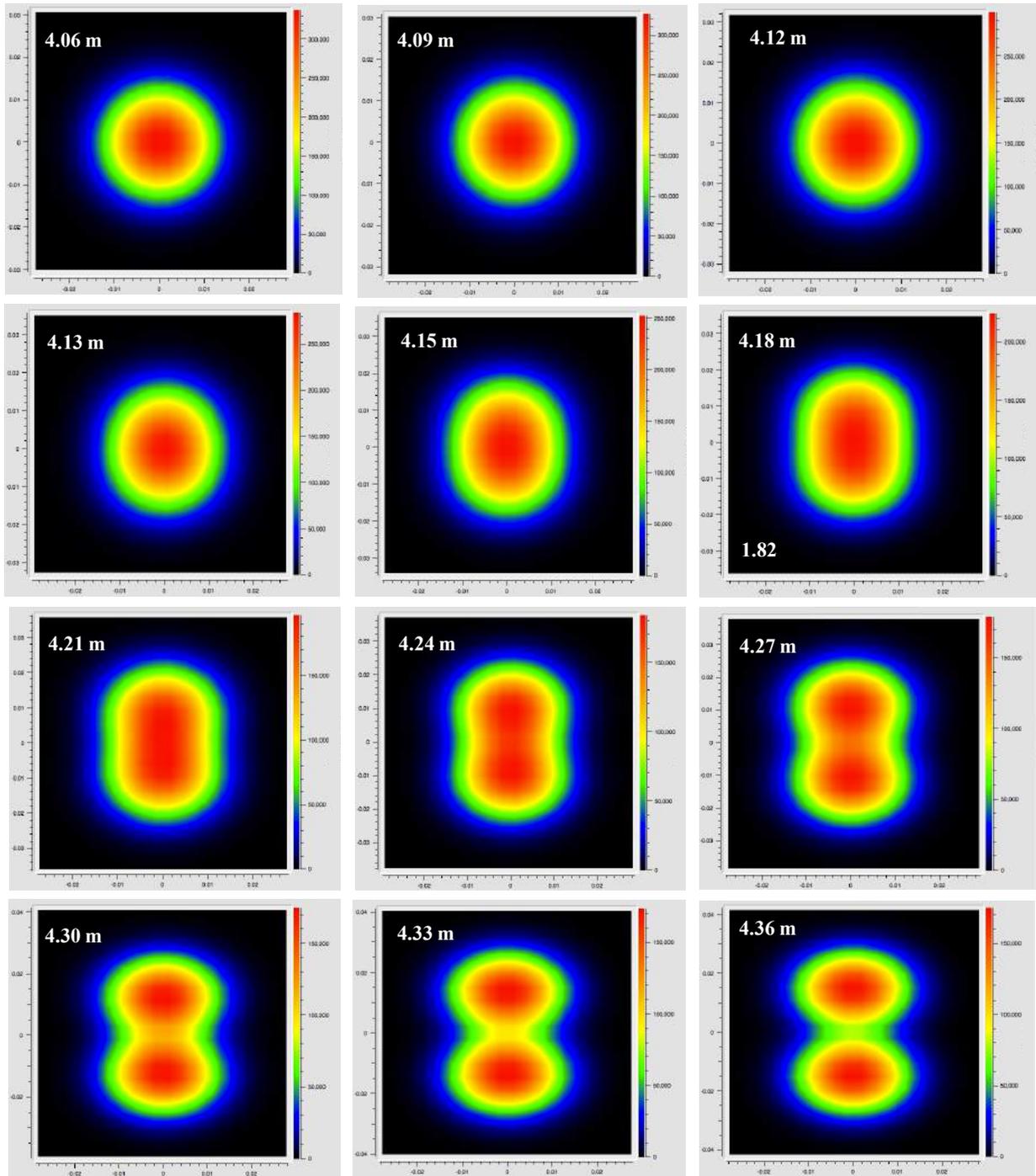


Figura 67. Gráficos de perfil de contorno de la simulación de dos espejos variando el punto objetivo.

La figura 68 muestra las gráficas de los perfiles de intensidad de flujo correspondientes a las simulaciones de la figura 67, destacando una formación bimodal de los perfiles conforme se incrementa el valor del punto objetivo.

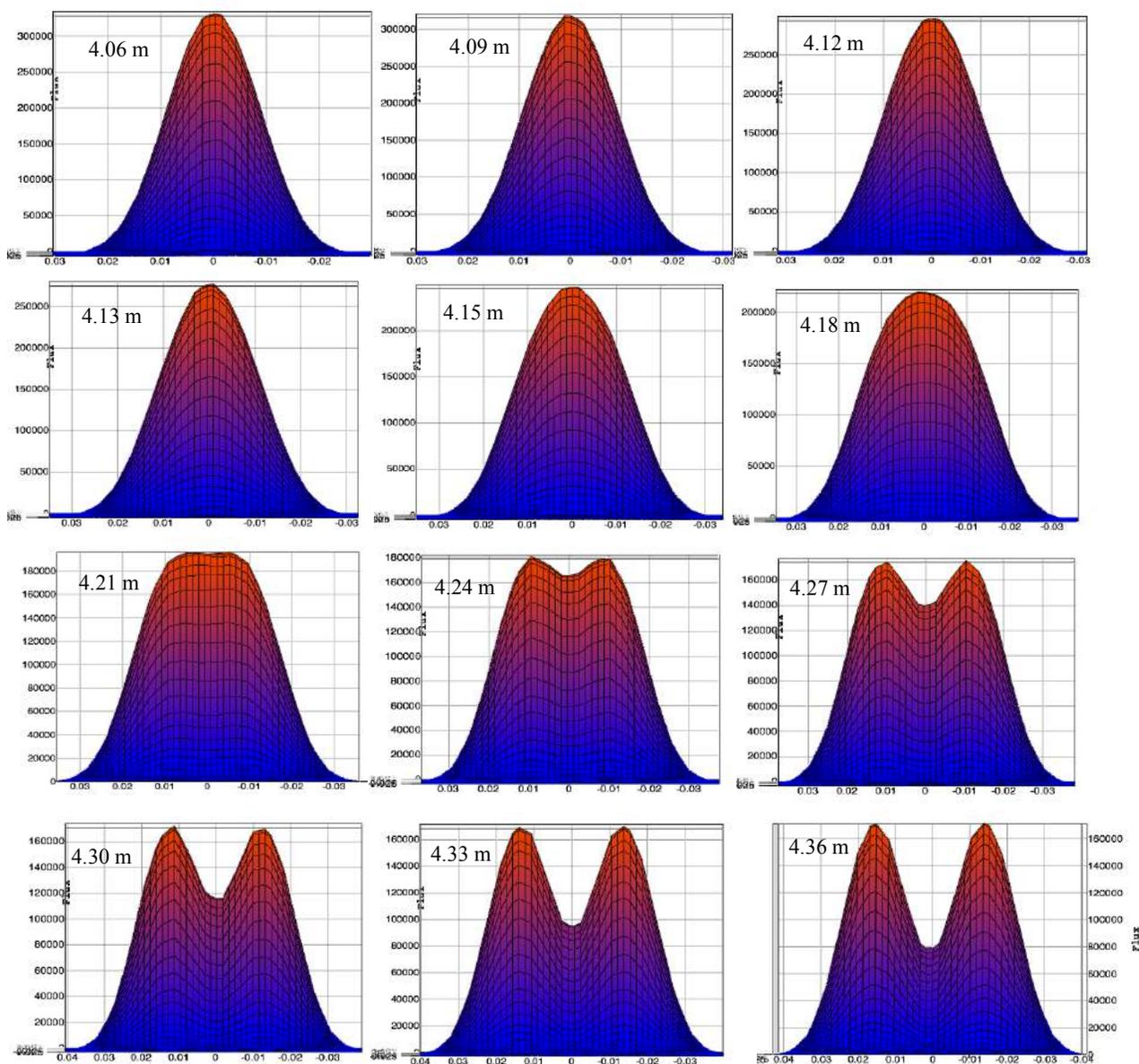


Figura 68. Perfiles de intensidad de las simulaciones en la figura 63.

Los resultados obtenidos en esta simulación son cualitativos, ya que el paquete de trazado de rayos no arroja algún valor numérico para el caso de la homogeneización ni una función matemática de los perfiles. Para que dicho estudio se volviera cuantificable, se tendría que obtener un archivo de datos CSV proporcionado por el paquete computacional, el cual contiene información sobre los perfiles de concentración formados por una determinada reflexión, después dichos datos deberían ser procesados mediante un algoritmo computacional que pudiera obtener una función matemática dada por la ecuación 3.2.

3.5 Simulación de distribución de flujo con 24 espejos

La comprobación de la homogeneización por mezcla gaussiana para el caso de dos espejos esféricos nos proporciona una evidencia numérica para suponer que el mezclado estadístico de perfiles de intensidad gaussianos puede extenderse a un número mayor de espejos para conseguir la homogeneidad del flujo combinado resultante. Aunque la matemática aplicada para hacer las predicciones analíticas de la distancia de homogeneización está fuera del alcance de esta tesis, ya que actualmente no existe disponible una metodología analítica para el estudio de la mezcla estadística de n perfiles gaussianos. La herramienta de simulación numérica nos permitió considerar un sistema concentrador de m espejos individuales con una configuración óptica que provee una homogeneización adecuada (figura 69, superior). Las diferentes configuraciones están determinadas por geometrías de polígonos, los cuales a su vez se posicionan en circunferencias, pudiéndose implementar n circunferencias, o coronas, con n_m espejos en cada una. Se observa que entre más lados contenga el polígono de configuración óptica, la configuración conjunta de las coronas se va aproximando al modelo matemático de Fibonacci (Irene Ferrando, Carlos Segura, 2010), el cual se encuentra presente en diseños de la naturaleza como en el centro de un girasol, donde los filamentos se colocan de tal manera que puedan reducir el máximo espacio posible entre sí (figura 69, inferior). Optimizando así el área de captación para su concentración al contrario que utilizando sesiones hexagonales como el concentrador prototipo del IER-UNAM DEFRAC (figura 24) el cual cuenta con 18 espejos de 30 cm de diámetro de apertura en la misma área donde esta configuración propuesta contiene 24 del mismo diámetro. Se decide utilizar únicamente 3 coronas de 8 espejos, ($8 * 3 = 24$) por el costo elevado que representan cada uno de los espejos, sin embargo, es posible incrementar los espejos con una corona más o sea $8 * 4 = 40$. Dicha configuración fue realizada además con la intención de construirla físicamente.

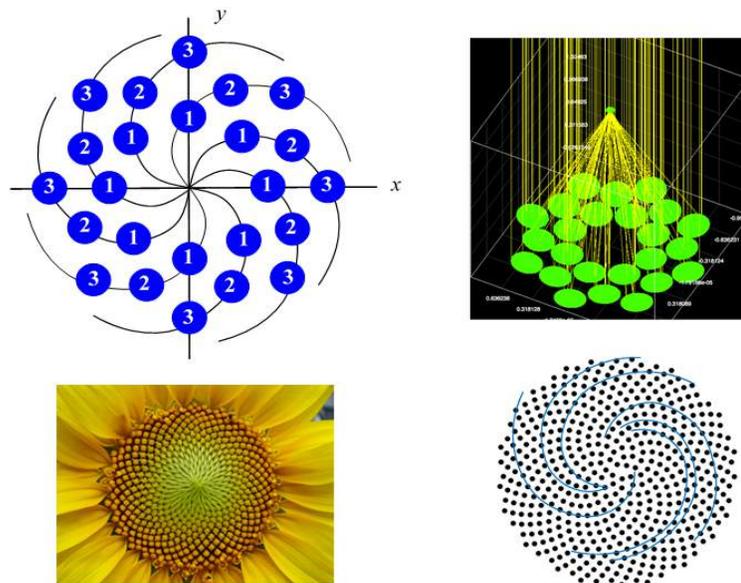


Figura 69. Distribución de 24 espejos en tres coronas octagonales siguiendo el esquema de Fibonacci (arriba). Distribución de Fibonacci de los filamentos en un girasol (abajo).

Las gráficas de contorno de la figura 70 muestran los resultados de las simulaciones (4,000,000 de rayos) para el concentrador propuesto, el cual consta de 24 espejos de apertura circular de 30 cm y radio de curvatur de 4 m. Esta compuesto de 3 coronas con 8 espejos cada una (figura 69 superior) de las cuales la primera tiene un diametro de 1.2 m, la segunda de 1.35 m y la tercera de 1.55 m. En la simulación mostrada en la figura 70 el punto objetivo de cada espejo se varía en intervalos de 2 cm en una longitud de 16 cm, mostrando su valor en cada uno de los perfiles de concentración, de manera análoga al procedimiento aplicado en el caso de dos espejos.

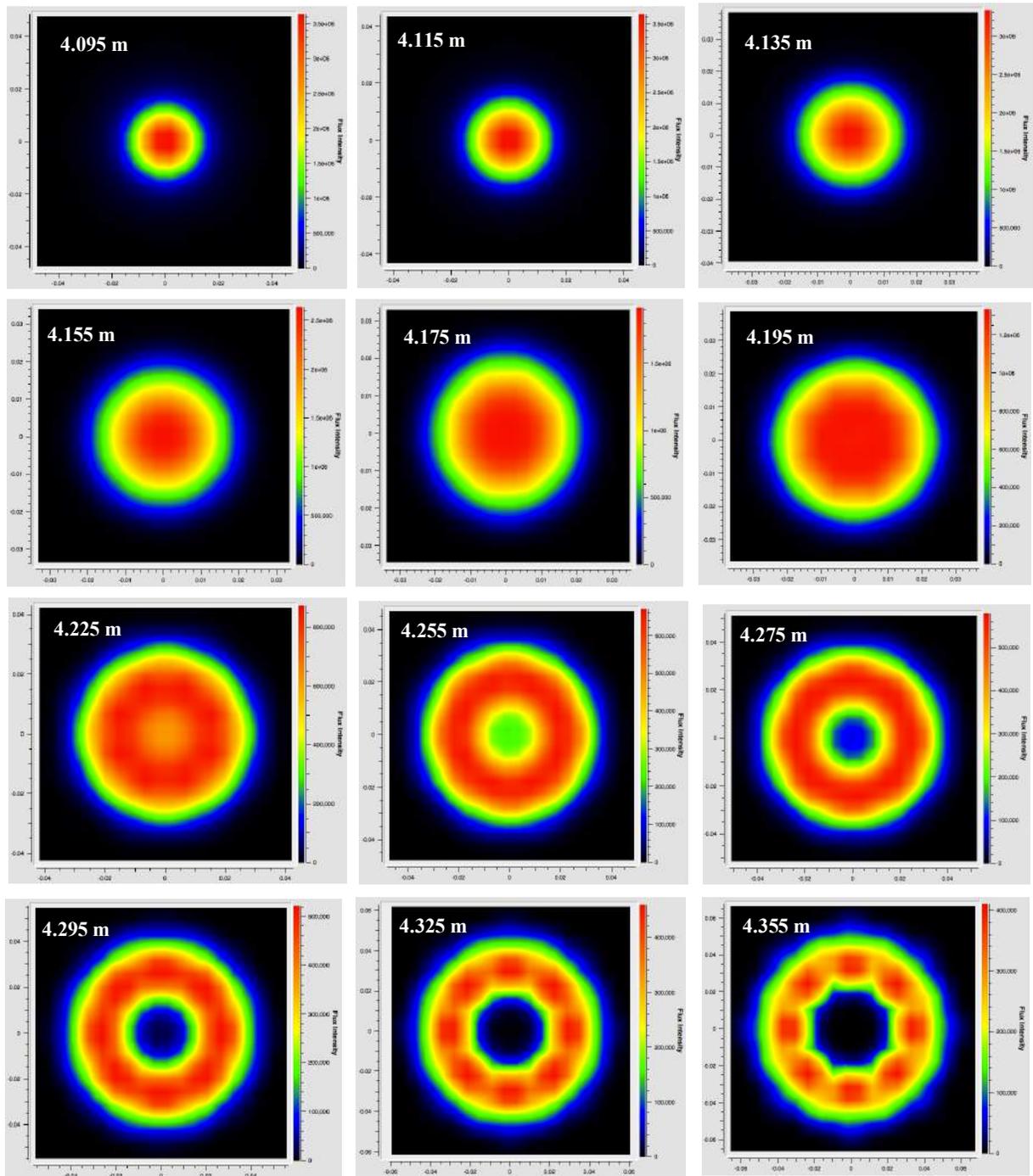


Figura 70. Gráficos de perfil contorno de las simulaciones para veinticuatro espejos.

Como resultados cualitativos de estas simulaciones se obtuvo que el punto objetivo requerido para obtener un perfil de contorno homogéneo es de 4.195 m para cada espejo, los cuales forman 24 gaussianas, 1 por cada 24 espejos. Conforme el punto objetivo se va incrementando, el grupo de 24 gaussianas se va alejando simétricamente del eje óptico. Si por el contrario, el punto objetivo se va reduciendo, las gaussianas se concentran en un punto común. Entre estos dos sucesos, se halla la región de homogeneización, en la que se obtiene un alto flujo homogéneo constante en una superficie determinada. La figura 71 muestra los perfiles de intensidad correspondientes a cada uno de los casos de la figura 70, correspondiendo el caso homogéneo al aim point de 4.195 m.

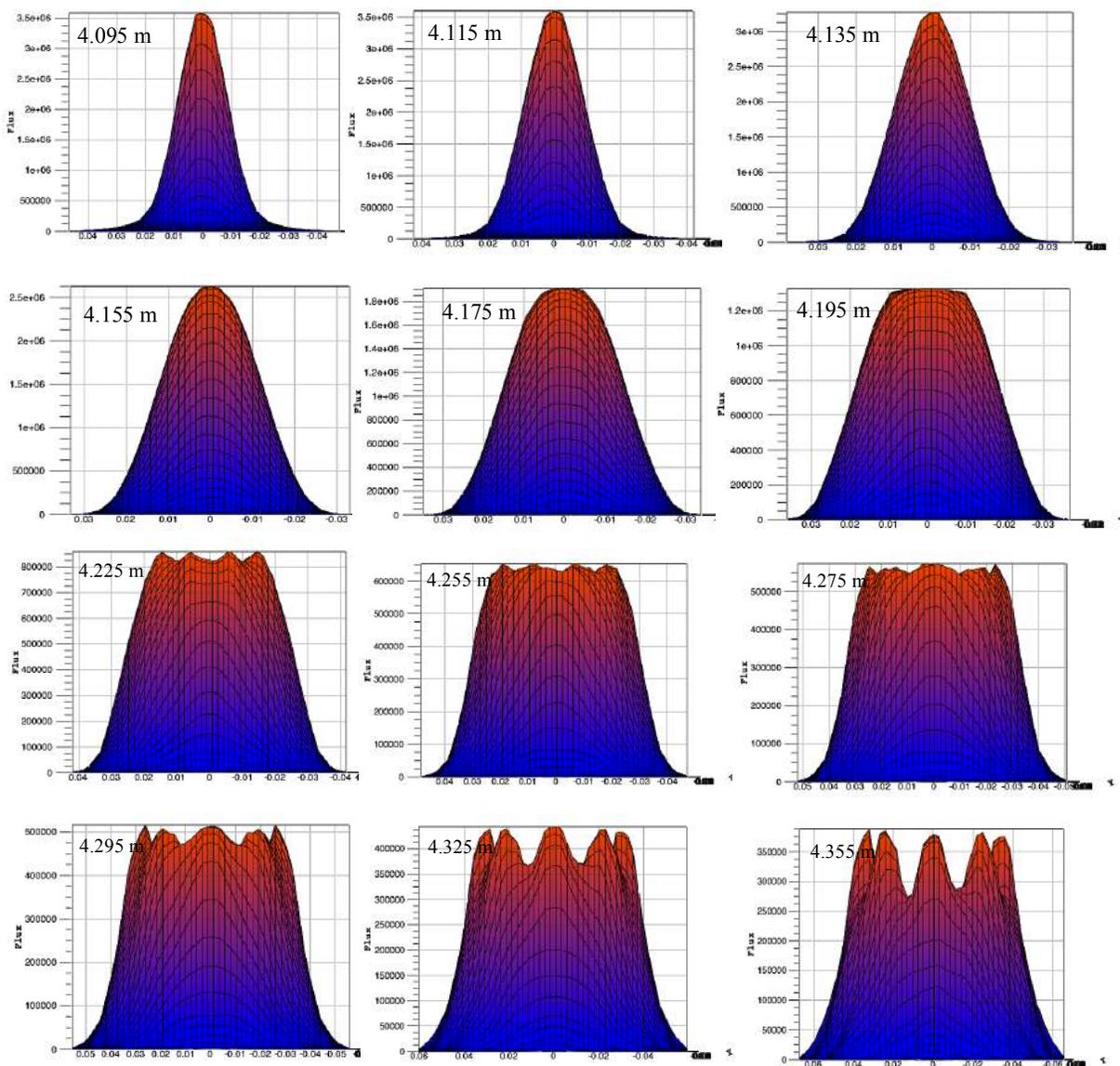


Figura 71. Perfiles de intensidad para las simulaciones con veinticuatro espejos.

De igual manera que en el caso de la simulación de dos espejos, para obtener resultados cuantitativos de la simulación, sería requerida una mayor capacidad de procesamiento ya que la simulación constituye ahora la iteración de 4,000,000 de rayos con 24 espejos. Para lo cual debería diseñarse primeramente el programa de procesamiento de datos del archivo SCV lo cual conlleva la generación de un paquete computacional.

La homogeneización propiamente dicha es conseguida cualitativamente por la disposición de los espejos del concentrador en la conformación de 24 espejos de 3 coronas de sección octagonal ya descrita, de manera que cada corona presenta por separado los perfiles de flujo que se muestran en las figuras 72 a 75. Se puede observar que en la combinación de los perfiles de concentración se puede obtener un perfil de apariencia homogénea, es decir con su parte superior horizontal, como se muestra en el caso de punto objetivo de 4.195 m de la figura 71.

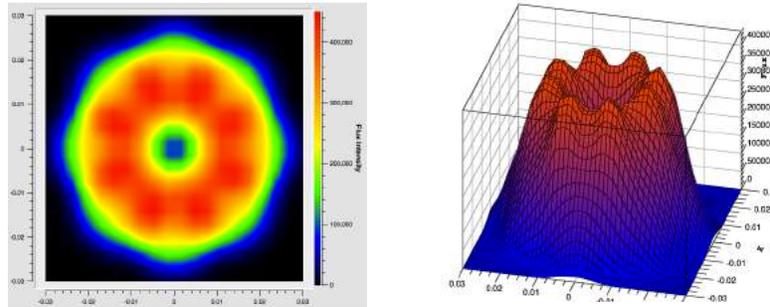


Figura 72. Perfiles de concentración de los espejos de la primera corona, para el caso de punto objetivo de 4.195 m.

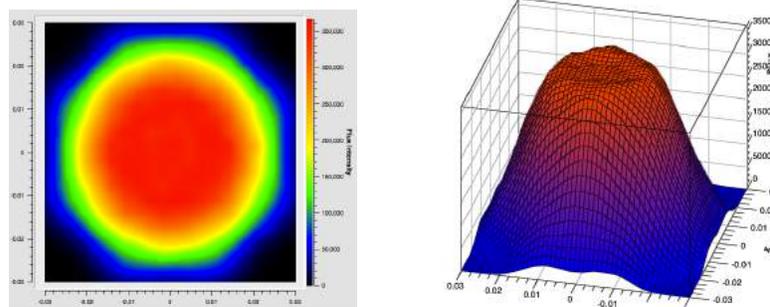


Figura 73. Perfiles de concentración de los espejos de la segunda corona, para el caso de punto objetivo de 4.195 m.

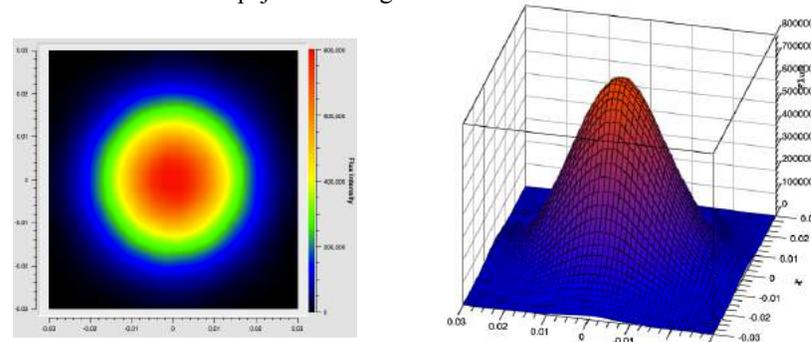


Figura 74. Perfiles de concentración de los espejos de la tercera corona, para el caso de punto objetivo de 4.195 m.

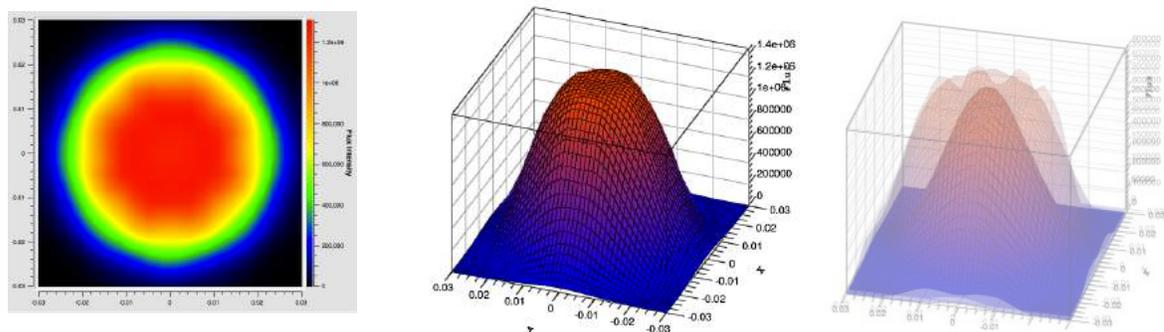


Figura 75. Perfiles de concentración homogéneo de los espejos de las tres coronas, para el caso de punto objetivo de 4.195 m.

Capítulo 4

Diseño de sistemas de alineación de espejos concentradores y horno solar de alto flujo radiativo.

En el transcurso de realización de esta tesis se llevó a cabo una estancia de investigación en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Donde se trabajó de manera cercana con el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo HOSIER principalmente en la estructura del concentrador mostrada desde su parte posterior en la figura 76 (a). Se llevó a cabo un reconocimiento general de la óptica de concentración y un análisis geométrico del sistema mecánico de posicionamiento y alineación de sus facetas especulares. Esto para profundizar en la comprensión de su funcionamiento y detectar oportunidades de optimización y mejora. Los resultados de ese trabajo, que constituyen parte del cuerpo de este capítulo, fueron presentados en el Congreso Nacional de Estudiantes de Energías Renovables (CNEER 2016), obteniendo el primer lugar en el nivel de maestría (Anexos). Este concentrador fue planeado con cinco secciones ópticas distintas, donde cada una de ellas contiene un grupo de facetas con un radio de curvatura diferente, con una variación de 50 cm entre sí, para compensar la desviación focal entre la óptica propia de cada espejo y la geometría de la estructura del concentrador, y así posicionar el flujo radiativo concentrado del conjunto en una misma área receptora (D. Riveros-Rosas. , 2010). Cada espejo se encuentra montado sobre una rótula de alineación, y a su vez esta rótula se encuentra anclada a la estructura del concentrador de la forma mostrada en la figura 76 (b). La rótula mecánica proporciona la movilidad necesaria para el ajuste final de alineación que debe tener el espejo una vez montado, ya que el montaje directo de los espejos a la estructura no proporciona la alineación precisa que asegure que perfil reflejado de cada espejo se posicione en el mismo punto receptor.

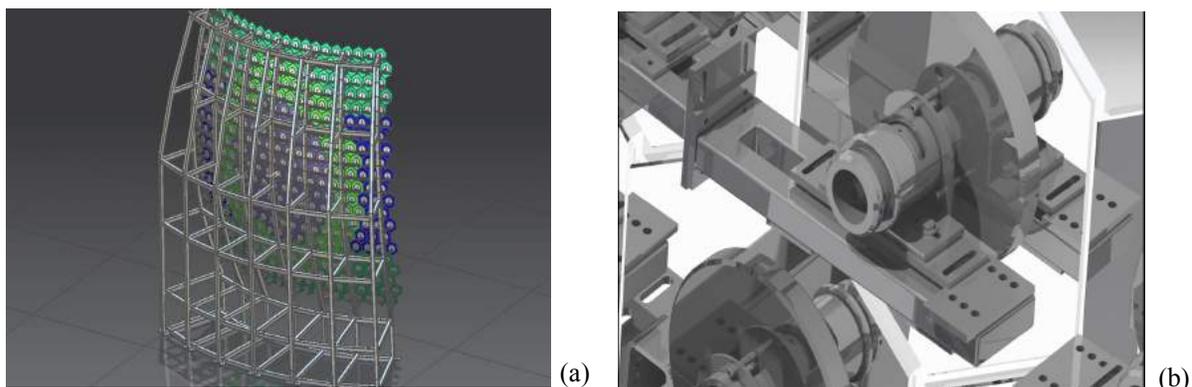


Figura 76. (a) Parte posterior del Concentrador del horno solar de alto flujo radiativo del IER-UNAM. (figura 11). (b) Mecanismos de alineación de espejos (Instituto de Energías Renovables , 2014).

Los mecanismos en cuestión se sometieron a un análisis aplicando teorías de geometría y de mecanismos para poder determinar si su funcionamiento mecánico es el adecuado. Esto es, que contara con los grados de libertad necesarios para poder realizar alineaciones de cada uno de los espejos a voluntad, para poder obtener perfiles de flujo homogéneo de acuerdo con la teoría y la evidencia numérica abordadas en el capítulo previo.

En la figura 77 (a) y 77 (b) se muestra una vista isométrica posterior izquierda y derecha respectivamente del mecanismo y del espejo concentrador destacando con una línea roja los principales puntos de interés del mismo. La figura 77 (c) muestra una vista lateral del mismo destacando sus principales elementos, el tornillo actuador, la base y la faceta, del mecanismo de alineación de espejos del concentrador del horno solar de alto flujo radiativo del [Instituto de Energías Renovables de la UNAM](#). Cada imagen especifica la ubicación de cada punto de interés mediante una línea roja y una línea azul. Estos puntos de interés han sido definidos en la nomenclatura de la tabla 2.

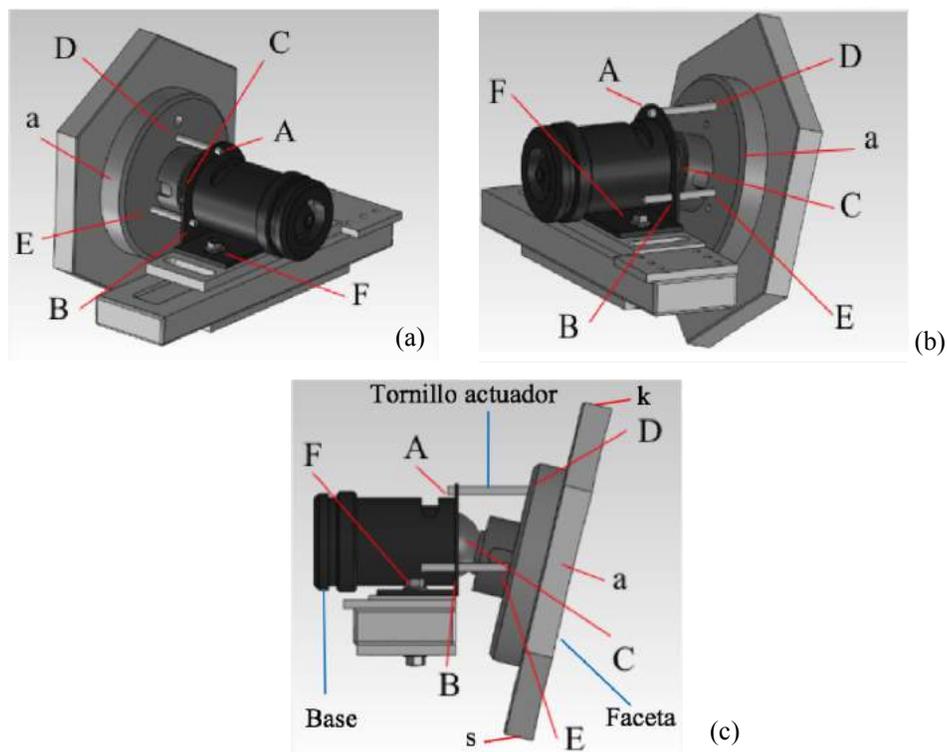


Figura 77. Diseño en SolidWorks del mecanismo de alineación de espejos del concentrador del horno solar de alto flujo radiativo del [IER – UNAM](#). (a) Vista isométrica posterior izquierda. (b) Vista isométrica posterior derecha. (c) Vista lateral

4.1 Análisis geométrico del mecanismo

Cada punto de interés del mecanismo de alineación de espejos a sido especificado gráficamente en la figura 77 y en la tabla 2, cada uno de ellos es identificado mediante un nombre técnico característico, para posteriormente ser utilizados como variables de cálculo en esta sección.

Tabla 2. Nomenclatura de análisis geométrico

$A - A' - B - B'$	Puntos de operación de los tornillos actuadores.
$a - a'$	Punto central en la faceta.
F	Punto de fijación.
C	Rótula mecánica.
$D - D' - E - E'$	Puntos de fijación entre el tornillo actuador y la faceta del espejo.
$d - d' - e - e'$	Puntos de torsión del mecanismo actuador.
$k - s$	Vértices del espejo.
\emptyset	Angulo de inclinación del espejo con respecto a su normal.
$\Delta\omega$	Distancia entre el punto A' y el punto F .
$\Delta\varphi$	Distancia entre el punto B' y el punto F .
r	Distancia del punto a , el centro del espejo, al punto D y D' .
n	Distancia del punto d al punto D o del punto d' a D' .
m	Distancia vertical del punto d' a la horizontal del vector AD .
μ	Grados de libertad del mecanismo.
η	Número de elementos del mecanismo.
j_1	Elementos con un grado de libertad del mecanismo.
j_2	Elementos con dos grados de libertad del mecanismo.

Aplicando la teoría geométrica (Joseph E. Shigley, John J. Uicker, 2001) al mecanismo de movilidad para posicionar los espejos, los elementos mecánicos fueron considerados como vectores y puntos fijos o móviles según su caso, dibujando vectores de color negro para representar el mecanismo en la posición inicial y vectores de color azul para representar la geometría del mecanismo accionado. Considerando el tornillo actuador $\overline{Ad'}$ y $\overline{Be'}$ como columna con carga centrada, se puede observar en la figura 78 (a) que la movilidad actual presentada por el sistema opera bajo una deformación causada por las cargas de accionamiento aplicadas y la falta de grados de libertad en los tornillos accionados (Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett Shigley's, 2008).

La figura 78 (b) representa el movimiento correcto que deberían tener los elementos del mecanismo, siendo necesario dos grados de libertad adicional para cada uno de los tornillos accionados, presentando como diferenciales de distancia las variables $\Delta\omega \equiv \Delta\varphi$, que corresponden a la variación entre el vector \overline{AF} y el vector \overline{BF} .

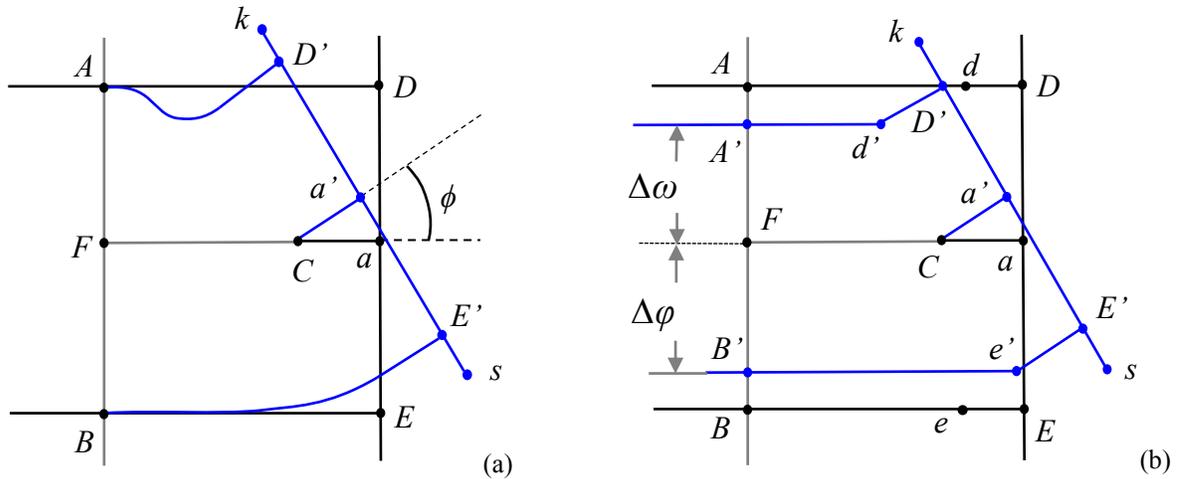


Figura 78. Diagramas geométricos de la movilidad de los mecanismos de alineación del Horno solar de IER-UNAM. (a) Mecanismo con deformación en los actuadores. (b) Mecanismo sin deformación en los actuadores.

Basado en la figura 78, se propone un modelo con una geometría específica que representa los grados de libertad requeridos, utilizando las siguientes consideraciones:

1) Las respectivas distancias $\Delta\omega$ y $\Delta\phi$ entre el vector $A'F$ y $B'F$ se mantienen iguales en todo momento durante la variación del ángulo ϕ .

$$\Delta\omega \equiv \Delta\phi \quad (4.1)$$

2) Los vectores AD , $A'd'$, BE , $B'e'$, son paralelos en todo momento durante la variación del ángulo ϕ .

$$\overline{AD} \parallel \overline{A'd'} \parallel \overline{BE} \parallel \overline{B'e'} \quad (4.2)$$

3) Los vectores, $D'd'$, Ca' , $E'e'$, son paralelos en todo momento durante la variación del ángulo ϕ .

$$\overline{D'd'} \parallel \overline{Ca'} \parallel \overline{E'e'} \quad (4.3)$$

4) Los vectores Dd' , Ca' , Ee' , son perpendiculares al vector ks en todo momento durante la variación del ángulo ϕ .

$$\overline{Dd'}, \overline{Ca'}, \overline{Ee'} \perp \overline{ks} \quad (4.4)$$

5) La distancia de los vectores, Da , Ea , $D'a'$, $E'a'$ y r presentan igualdades en todo momento durante la variación del ángulo ϕ .

$$\overline{Da} = \overline{Ea} = \overline{D'a'} = \overline{E'a'} = r \quad (4.5)$$

6) La distancia de los vectores, Dd , Ca , Ee , $D'd'$, Ca' , $E'e'$ y n presentan igualdades en todo momento durante la variación del ángulo ϕ .

$$\overline{Dd} = \overline{Ca} = \overline{Ee} = \overline{D'd'} = \overline{Ca'} = \overline{E'e'} = n \quad (4.6)$$

Siguiendo estas consideraciones geométricas, se verifica matemáticamente que la distancia $\Delta\omega$, no permitida por el mecanismo original, varía en función de los distintos valores de ϕ , lo cual es necesario para obtener una angulación del espejo a conveniencia, y cuya expresión matemática es la mostrada en la ecuación 4.7.

$$\Delta\omega = r - n \sin \phi \quad (4.7)$$

4.2 Análisis de los grados de libertad del mecanismo

La teoría de mecanismos sobre la movilidad de elementos entendida por el criterio de Kutzbach, que está enunciado por la ecuación 4.8 (Joseph E. Shigley, John J. Uicker, 2001), es un modelo matemático empírico que describe los diferentes grados de libertad en un mecanismo con respecto a sus elementos, de acuerdo con la nomenclatura descrita en la tabla 2.

$$\mu = 3(\eta - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (4.8)$$

Aplicando este criterio a los mecanismos de alineación de interés, se puede comprobar si su configuración tiene o no una movilidad cinemática que satisfaga las necesidades de alineación requeridas. Por ejemplo, si con esta ecuación se analiza la funcionalidad de un mecanismo básico de 4 elementos ($\eta = 4$), cada uno con un grado de libertad ($j_1 = 4, j_2 = 0$), se obtiene como resultado un valor unitario para μ ; esto es, un grado de libertad del mecanismo. En el caso de un mecanismo con 3 elementos ($\eta = 3$) cada uno con un grado de libertad ($j_1 = 3, j_2 = 0$), se obtiene 0; es decir, que dicho mecanismo no posee movilidad. Estos ejemplos nos indican que a partir de 4 elementos se requiere de al menos un grado de libertad en cada elemento para tener movilidad ($j_1 = 4, j_2 = 0$), o 2 grados de libertad en 2 elementos del mecanismo ($j_1 = 3, j_2 = 2$) para seguir teniendo la misma propiedad (Grigore Gou, 2005).

La figura 79 (a) nos muestra tres elementos presentes en los sistemas mecánicos de posicionamiento analizados en dos dimensiones: La faceta en color morado, que cuenta un grado de libertad dado por una articulación mecánica; un tornillo de accionamiento en color rojo, que tienen un grado de libertad en uno de sus extremos; y la base en color azul que cuenta con un grado de libertad dado por una articulación mecánica. Al mecanismo presentado, además, se le agregó otro grado de libertad mediante una articulación mecánica como se aprecia en la figura 79 (b), el cual fue probado en el prototipo a escala de horno solar del IER-UNAM (ver figura 25), esto debido a las complicaciones de alineación en los mecanismos del horno solar de alfo flujo radiativo (figura 77) de modo que considerando este nuevo grado de libertad (figura 80) se tiene lo mostrado en la ecuación 4.9.

$$\eta = 3, \quad j_1 = 3, \quad j_2 = 0; \quad (4.9)$$

Por lo que el valor de grados de libertad μ del mecanismo predichos por la ecuación 4.9 es igual a 0, lo que confirma que este mecanismo carece de grados de libertad, de modo que se requiere de un nuevo diseño que permita alcanzar la movilidad necesaria para obtener la realineación requerida para conseguir una concentración solar con flujo homogéneo.

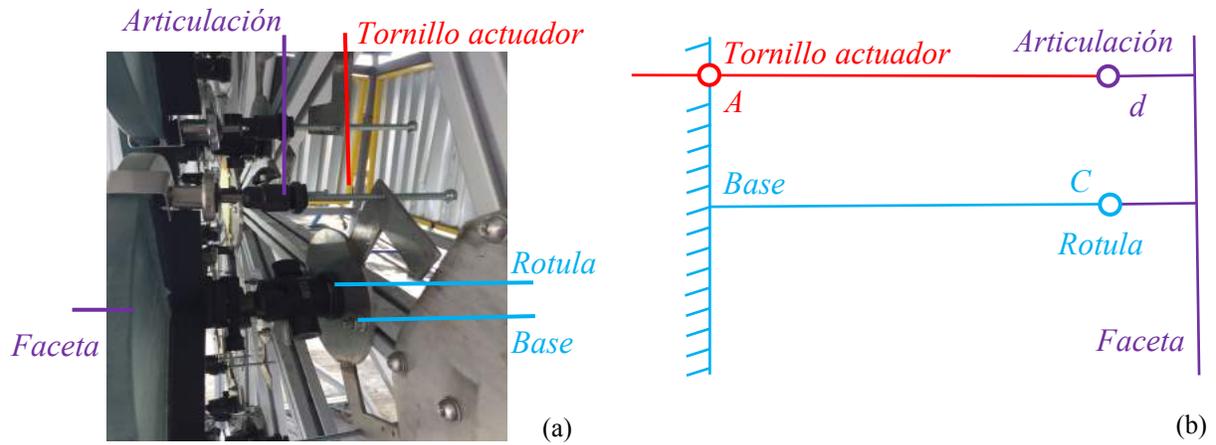


Figura 79. Esquema del mecanismo de alineación en dos dimensiones. (a) Mecanismos de accionamiento de espejos. (b) Esquema de los mecanismos de accionamiento en dos dimensiones.

En la figura 80 se muestra la deformación física de los tornillos actuadores al ser accionados para posicionar el espejo concentrador del horno de alto flujo radiativos del IER-UNAM.

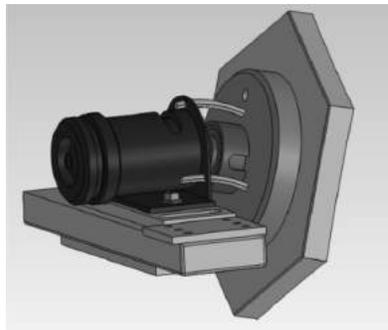


Figura 80. Representación de la deformación física de los tornillos actuadores de los mecanismos de los espejos concentradores el IER-UNAM.

4.3 Análisis y propuesta del mecanismo de alineación óptimo.

Obteniendo matemáticamente un valor que corrobora que el mecanismo en cuestión (figura 79) no tiene movilidad, se propone añadir un grado de libertad a la faceta mediante un ensamble de platos orbitales, que es una sección circular dentro de una cámara la cual proporciona una movilidad libre en su superficie, dichos elementos son observados en el diseño de SolidWorks de la figura 81 (a) y esquemáticamente con la adición del *punto D* en la figura 81 (b). Los valores para el cálculo de la movilidad del mecanismo se modifican a los mostrados en la ecuación 4.10.

$$\eta = 3, \quad j_1 = 2, \quad j_2 = 1; \quad (4.10)$$

Lo que arroja un valor de μ igual a uno, lo que asegura la movilidad cinemática requerida por el mecanismo en cuestión para realizar la alineación de los espejos.

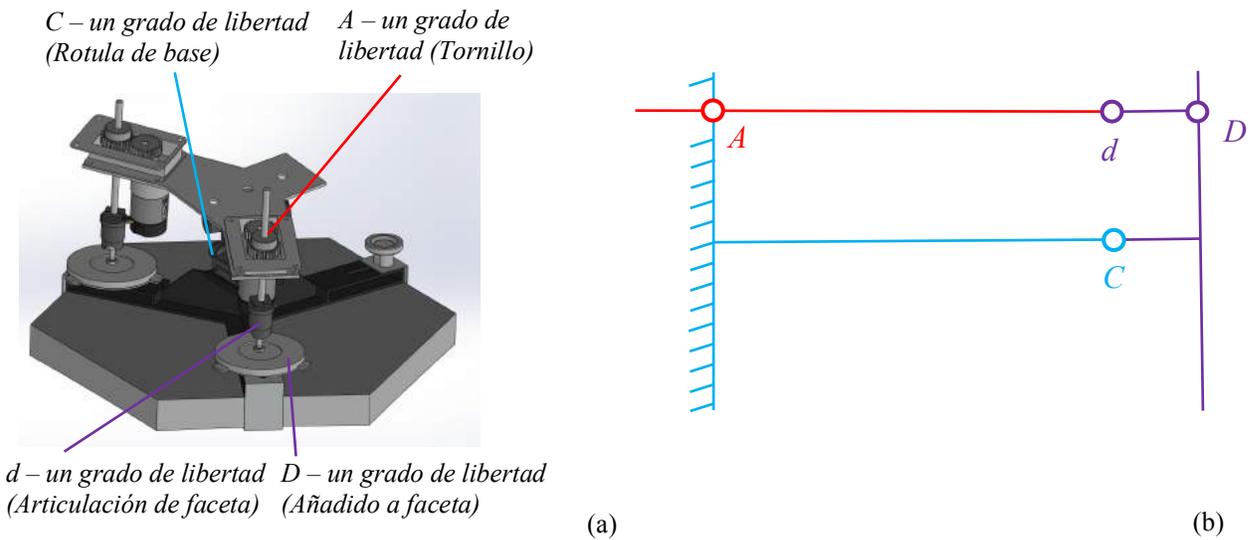


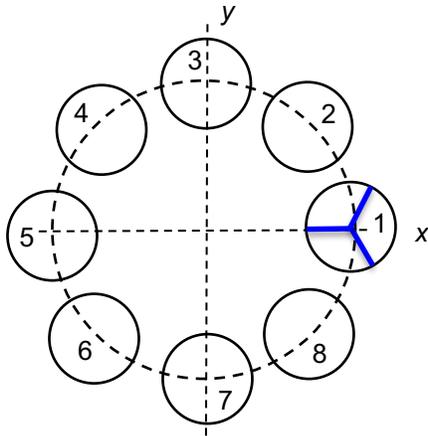
Figura 81. Mecanismo de prueba propuesto con grado de libertad adicional.
(a) Mecanismo digitalizado en 3D. (b) Esquema del mecanismo.

El mecanismo propuesto mostrado en la figura 81 consta de dos mecanismos cada uno en un plano distinto, respetando a su vez las cuestiones predichas en los cálculos anteriores. Al mezclar los dos mecanismos en planos distintos estos podrán movilizar el espejo en tres dimensiones, utilizando entonces el *puno C* como una rótula tridimensional, y los *puntos d* como articulaciones cada una trabajando en su plano de accionamiento. A los mecanismos hay acoplados dos motores a pasos automatizados con resolución de 1.8 grados lo cual proporciona una variación de ángulo del mecanismo adecuado para su movimiento. Cada motor está ensamblado a una transmisión de engranes 1:1 los cuales están montados por su parte interna a un tornillo sin fin, dicho tornillo cuenta en su parte inferior con un plato orbital de contacto superficial con movilidad libre, acoplados a su vez a la faceta, la cual cuenta con un movimiento tridimensional gracias a la rótula central. Seleccionando un tornillo sin fin con relación de avance de 2 cm por vuelta, se tiene que cada 1.8 grados (paso del motor) el tornillo avanza o retrocede $av = 0.01$ cm lo cual, traducido a ángulo de movimiento de la faceta, siendo el radio de esta $rf = 15$ cm mediante la ley de senos se obtiene lo que se describe a continuación.

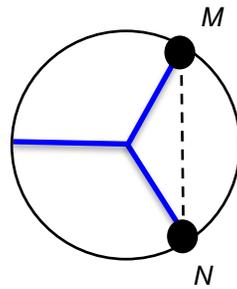
$$\frac{av}{\text{Sen } \theta} = \frac{rf}{\text{Sen } 90^\circ} \quad \theta = \text{ArcSen } \frac{0.01}{15} = 0.04^\circ = 0.7 \text{ mrad}$$

El análisis anterior describe que por cada paso realizado por el motor el espejo tendrá un movimiento angular sobre su centro de 0.7 mrad lo cual es más que suficiente para obtener resultados favorables que puedan ser análogos a las simulaciones numéricas obtenidas en el capítulo 3.

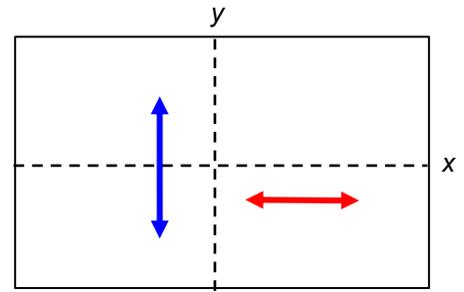
Para explicar el funcionamiento de los mecanismos se considera la operación del espejo 1 de la figura 82 (a). Colocando dos motores a pasos M y N cada uno con un sistema de mecanismo previamente analizado, como se muestra en el diagrama de la figura 82 (b). Es decir, seccionando el espejo en tres partes cada una con ángulo de 120° y posicionándolos en el vértice de la faceta. Se procede a la activación de los motores, siendo un movimiento de los motores en sentido a las manecillas del reloj como “1” y en contra “0”, y considerando acoplamiento de los mecanismos de tornillo sin fin y engranes con rosca estándar. Se consideran los movimientos mostrados en las consideraciones 4.10 a 4.13, los cuales se describen a continuación: accionando los motores M y N en un mismo sentido el perfil de concentración se desplazará sobre el eje “ x ” como se muestra en el vector unidireccional de color rojo en la figura 82 (c). Accionando el motor M en sentido opuesto a N , el perfil se desplazará sobre el eje “ y ” como se muestra en el vector unidireccional azul en la figura 82 (c). Así pues, se tiene una determinada configuración de automatización para cada uno de los espejos 1 a 8 de la figura 82 (a). Los sistemas de posicionamiento cuentan con rangos de movimiento en el plano mayores a los 20 cm, los cuales son suficientes para obtener una concentración por arriba de los 100 soles.



Configuración de 8 espejos (a)



Motores M y N en espejo (b)



Movimiento del perfil de concentración en el receptor. (c)

Figura 82. Movilidad del mecanismo.

$$M = 1 \quad N = 1 \quad -x \quad (4.10)$$

$$M = 0 \quad N = 0 \quad +x \quad (4.11)$$

$$M = 1 \quad N = 0 \quad -y \quad (4.12)$$

$$M = 0 \quad N = 1 \quad +y \quad (4.13)$$

4.4 Cálculos del concentrador solar propuesto

A continuación, se muestra una visualización digital en la figura 84 del prototipo de diseño del sistema de concentración solar propuesto para satisfacer la implementación del diseño detallado anteriormente.

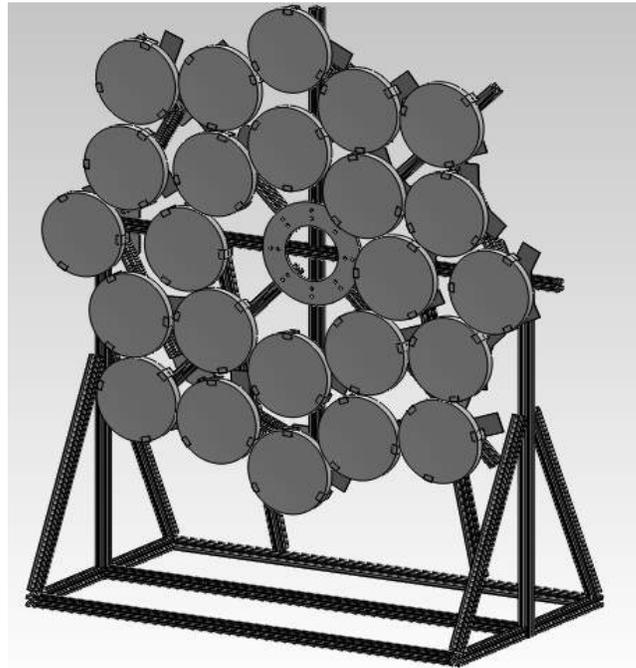


Figura 83. Visualización digital del concentrador solar propuesto.

El concentrador mostrado en la figura 83 cuenta con dimensiones de 2 m de altura, 1.6 m de largo y 1 m de fondo, teniendo un peso neto de 120 kg. Cuenta también con una estructura de perfil de aluminio, la cual soporta un total de 24 espejos concentradores de apertura circular de 30 cm de diámetro y radio de curvatura de 4m. Los cuales en la parte posterior contienen los mecanismos de alineación previamente estudiados.

El calculo de la potencia del concentrador está dado por la irradiación solar multiplicada por el área total de las superficies reflectivas del concentrador por un factor de eficiencia térmica que depende del porcentaje reflectivo de las superficies esta dada por la ecuación 4.14.

$$Q_c = I A_a e \quad (4.14)$$

Considerando Irradiación solar directa de $1,000 \text{ W/m}^2$ y un área dada por 24 espejos circulares con diámetro de 30 cm obtenemos que $A_a = 1.70 \text{ m}^2$ y una eficiencia térmica del 90 % se obtiene que $Q_c = 1.5 \text{ kW}$.

Para el cálculo de la razón de concentración, se utilizará la ecuación 2.17 obteniendo el valor del área A_r mediante la distancia de concentración obtenida en las simulaciones de 24 espejos el cual representa un radio de 3 cm, obteniendo entonces $A_r = 0.00283 \text{ m}^2$, con lo cual se obtiene una razón de concentración $C = 600$ soles.

La temperatura máxima alcanzada por el concentrador esta dada por la ecuación 2.19 considerando los valores anteriormente descritos en la subsección 2.3.3 y una razón de concentración de 600 soles se obtiene una temperatura máxima de $925 \text{ }^\circ\text{C}$ como se calculó en la página 37.

Capítulo 5

Discusión, conclusiones y trabajo a futuro

5.1 Discusión de resultados

El trabajo realizado sobre la homogeneización de flujos radiativos de concentración confirma que, usando modelos probabilísticos, es posible describir matemáticamente el perfil de concentración de dos espejos mediante la mezcla estadística de dos funciones gaussianas. No obstante, aunque la mezcla estadística de la radiación luminosa de dos espejos puede generar un perfil de flujo homogéneo, este perfil no es simétrico en los dos ejes bidimensionales, únicamente se obtiene un perfil simétrico al concentrar en 3 ejes. Para conseguir predecir la posición de alineación de los espejos para obtener un flujo homogéneo y simétrico en el plano de recepción, es necesario encontrar las condiciones de frontera entre la unimodalidad y la multimodalidad en una mezcla estadística de n funciones gaussianas. Debido a que estos resultados matemáticos aún no han sido obtenidos para el contexto de la ingeniería solar en particular ya que no existe teoría que respalde dicho análisis, se optó por realizar simulaciones numéricas variando los parámetros de entrada hasta obtener los resultados de homogeneización satisfactorios mostrados al final del capítulo 3.

Se calculó el diseño de un concentrador solar de 24 espejos esféricos, que en teoría proveerá una potencia efectiva de 1.5 kW, con un factor de concentración que permitirá conseguir flujos homogéneos máximos de 600 soles (es decir, 600 veces el valor del flujo medido de la DNI del Sol), y una temperatura de 925 °C con en el receptor adecuado, de acuerdo con los cálculos realizados. Por otra parte, el análisis efectuado en esta tesis demostró que los equipos de posicionamiento mecánico de los sistemas de concentración solar que se utilizan en México hoy en día carecen de la movilidad necesaria para pasar de una configuración de foco puntual con un perfil de flujo de concentración gaussiano, a una configuración de flujo homogéneo mediante la realineación de los espejos concentradores. Esta característica es requerida para obtener homogeneización de flujos incluso en regiones cercanas a la de la zona focal de los sistemas concentradores, que es imposible de conseguir con las metodologías de realineación actuales. Nuestro diseño actual consigue dicha precisión de acuerdo con la evidencia de la simulación numérica, de manera que el mecanismo de alineación propuesto para superar estas carencias constituye una innovación de gran utilidad para la investigación de las aplicaciones de la concentración solar nacionales e incluso internacionales.

5.2 Conclusiones y trabajo posterior

La discusión previa de los resultados obtenidos nos permite concluir que, con la implementación de un sistema de alineación adecuado, es posible construir un prototipo de concentrador solar que genere flujos radiativos con perfiles homogéneos, con factores de concentración adecuados para alcanzar las temperaturas de operación de la mayoría de las aplicaciones a alta temperatura y alto flujo, por lo que podemos considerar alcanzados los objetivos principales de esta tesis.

El trabajo por finalizar como consecuencia de este trabajo de investigación es la obvia construcción física y caracterización óptica, mecánica y térmica del prototipo diseñado, una vez que esté disponible el material solicitado para su construcción, así como la evaluación de su desempeño en distintas aplicaciones, como pueden ser las pruebas de fundición de materiales o la producción de energía eléctrica mediante materiales termoeléctricos, celdas solares de concentración y motores Stirling.

Así mismo, es necesaria la protección intelectual del mecanismo de alineación propuesto mediante el registro de un diseño industrial ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual. La redacción del documento pertinente está en curso en este momento. Dentro de los trabajos teóricos complementarios a esta tesis puede mencionarse, además del reporte en una revista arbitrada de las inconsistencias a la metodología de homogeneización por realineación de facetas que fue mencionada en el capítulo 3. La elaboración del código de un programa de cómputo basado en un modelo matemático analítico, que permita realizar de una manera computacionalmente más eficaz el cálculo numérico del contorno y de las dimensiones de los perfiles de flujo en el plano de la superficie de absorción. Junto con un trazado de rayos analítico simplificado al limitarse a los puntos más representativos de la geometría de los espejos concentradores, del cual se tienen ya resultados previos los cuales están graficados en la figura 84, y que una vez concluido permitirá generalizar los hallazgos de esta tesis a cualquier geometría clásica de la estructura del sistema de concentración, así como de las facetas especulares empleadas típicamente en los hornos solares de la actualidad.

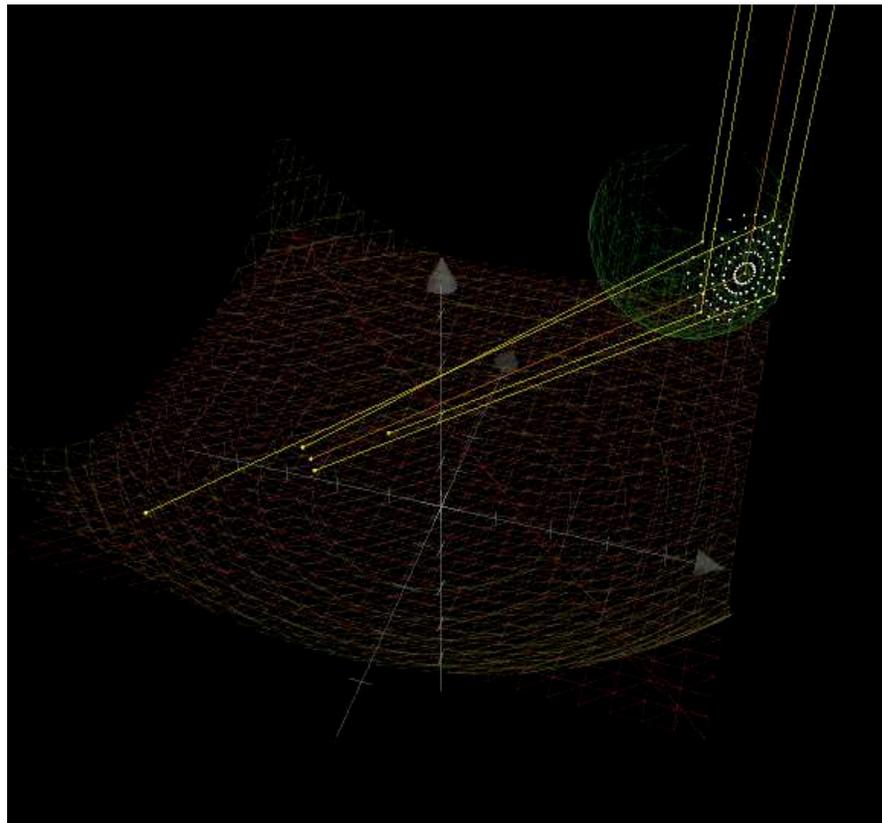


Figura 84. Trazado de rayos analítico para medición de perfiles.

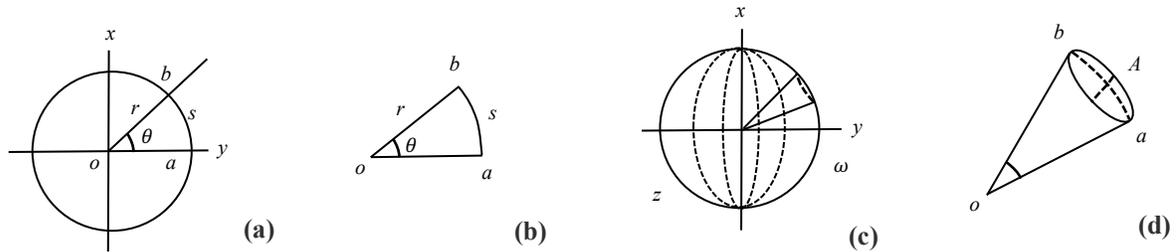
Apéndices

A1 El Arco y el Ángulo Sólido

El arco geométrico es cualquier curva continua que une dos puntos de una circunferencia, y se define por tres puntos o dos puntos extremos y el radio. (Frank P. Incropera, David P. De Witt)

Definición de la ecuación de la circunferencia

$$C = 2 r \pi \quad (A1.1)$$



Arco geométrico y ángulo sólido. a) Trazo circular para ubicación de arco. b) Sección de arco c) Esfera para ubicación de á a) Trazo circular para ubicación de arco. b) sección de arco ángulo sólido. b) Sección de ángulo sólido.

Para un problema bidimensional el ángulo de una cuerda con respecto al eje de las abscisas esta definido por el producto del arco dividido por el radio de la circunferencia , obteniendo las siguientes ecuaciones.

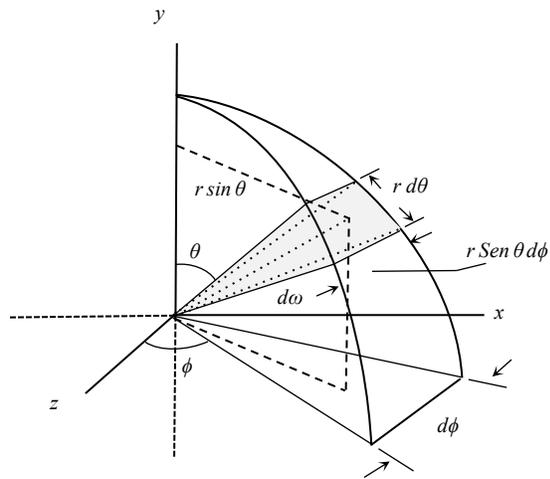
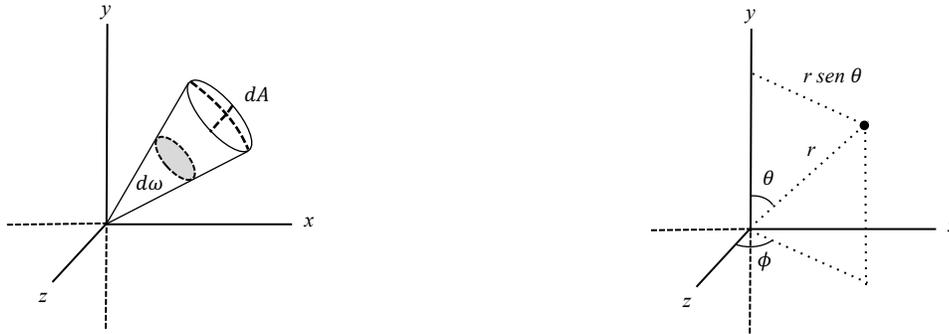
$$\theta = \frac{s}{r} \quad s = \theta r \quad (A1.2)$$

Analógicamente puede definirse el ángulo solido en un problema tridimensional como el producto del área del casquete esférico formado en una sección de la esfera entre su radio elevado al cuadrado.

$$\omega = \frac{A}{r^2} \quad A = \omega r^2 \quad (A1.3)$$

Desplazamientos diferenciales

Para obtener un ángulo sólido diferencial es necesario plantear un área diferenciable variando los parámetros de apertura azimutal y cenital (θ, ϕ) (Frank P. Incropera, David P. De Witt).

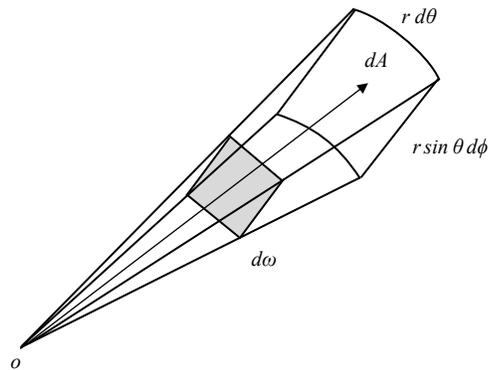


Ángulo sólido en el espacio.

Diferenciando la ecuación donde varía el área y el ángulo sólido

$$d\omega = \frac{A}{r^2} \quad dA = d\omega r^2 \quad (\text{A1.4})$$

Determinando el área variable del cono y sustituyendo en la definición de ángulo sólido



Diferencial del ángulo sólido.

$$dA = r^2 \text{ Sen } \theta \, d\theta \, d\phi \quad (\text{A1.5})$$

$$d\omega = \text{Sen } \theta \, d\theta \, d\phi \quad (\text{A1.6})$$

Integrando la ecuación variable del ángulo sólido se puede obtener la radiación que emite un cuerpo en el hemisferio de una semiesfera.

$$d\omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \text{Sen } \theta \, d\phi \, d\theta = 2\pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} \text{Sen } \theta \, d\theta = 2\pi sr$$

A2 Cálculo de los flujos lambertianos hemisféricos totales

Emisión hemisférica total

$$I_{\lambda, e}(\lambda, e, \theta) = I_{\lambda, e}(\lambda)$$

$$E_{\lambda, e}(\lambda) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e}(\lambda) \cos \theta \operatorname{Sen} \theta \, d\phi \, d\theta = 2\pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e}(\lambda) \cos \theta \operatorname{Sen} \theta \, d\theta$$

$$= \pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e}(\lambda) 2 \cos \theta \operatorname{Sen} \theta \, d\theta = \pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e}(\lambda) \operatorname{Sen} 2\theta \, du, \quad du = 2d\theta$$

$$E_{\lambda, e}(\lambda) = \pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e}(\lambda) \operatorname{Sen} \theta \frac{du}{2} = I_{\lambda, e}(\lambda) \frac{\pi}{2} [-\cos u]_0^{\pi}$$

$$E_{\lambda, e}(\lambda) = I_{\lambda, e}(\lambda) \frac{\pi}{2} [-(-1-1)] = I_{\lambda, e}(\lambda) \frac{\pi}{2} (2)$$

$$E_{\lambda, e}(\lambda) = I_{\lambda, e}(\lambda) \pi$$

$$E = \pi \int_{\lambda=0}^{\infty} I_{\lambda, e}(\lambda) \, d\lambda$$

$$E = \pi I_e$$

(A2.1)

Irradiación hemisférica total

$$I_{\lambda, i}(\lambda, i, \theta) = I_{\lambda, i}(\lambda)$$

$$G_{\lambda, i}(\lambda) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, i}(\lambda) \cos \theta \operatorname{Sen} \theta \, d\phi \, d\theta = 2\pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, i}(\lambda) \cos \theta \operatorname{Sen} \theta \, d\theta G_{\lambda, i}(\lambda)$$

$$= \pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, i}(\lambda) 2 \cos \theta \operatorname{Sen} \theta \, d\theta = \pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, i}(\lambda) \operatorname{Sen} 2\theta \, d\theta$$

$$u = 2\theta \quad du = 2d\theta$$

$$G_{\lambda, i}(\lambda) = \pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, i}(\lambda) \operatorname{Sen} \theta \frac{du}{2} = I_{\lambda, i}(\lambda) \frac{\pi}{2} [-\cos u]_0^{\pi}$$

$$G_{\lambda, i}(\lambda) = I_{\lambda, i}(\lambda) \frac{\pi}{2} [-(-1-1)] = I_{\lambda, i}(\lambda) \frac{\pi}{2} (2)$$

$$G_{\lambda, i}(\lambda) = I_{\lambda, i}(\lambda) \pi$$

$$G = \pi \int_{\lambda=0}^{\infty} I_i \, d\lambda$$

$$G = \pi I_i$$

(A2.2)

Radiosidad en un medio opaco

$$I_{\lambda, e+r}(\lambda, e+r, \theta) = I_{\lambda, e+r}(\lambda)$$

$$J_{\lambda}(\lambda) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e+r}(\lambda) \cos \theta \sin \theta \, d\phi \, d\theta = 2\pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e+r}(\lambda) \cos \theta \sin \theta \, d\theta$$

$$J_{\lambda}(\lambda) = \pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e+r}(\lambda) 2 \cos \theta \sin \theta \, d\theta = \pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e+r}(\lambda) \sin 2\theta \, d\theta$$

$$u = 2\theta \quad du = 2d\theta$$

$$J_{\lambda}(\lambda) = \pi \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e+r}(\lambda) \sin \theta \frac{du}{2} = I_{\lambda, e+r}(\lambda) \frac{\pi}{2} [-\cos u]_0^{\pi}$$

$$J_{\lambda}(\lambda) = I_{\lambda, e+r}(\lambda) \frac{\pi}{2} [-(-1-1)] = I_{\lambda, e+r}(\lambda) \frac{\pi}{2} (2)$$

$$J_{\lambda}(\lambda) = I_{\lambda, e+r}(\lambda) \pi$$

$$J = \pi \int_{\lambda=0}^{\infty} I_{e+r} \, d\lambda$$

$$J = \pi I_{e+r}$$

(A2.3)

Flujo de radiación neto

El flujo neto de radiación en una superficie opaca está dado por.

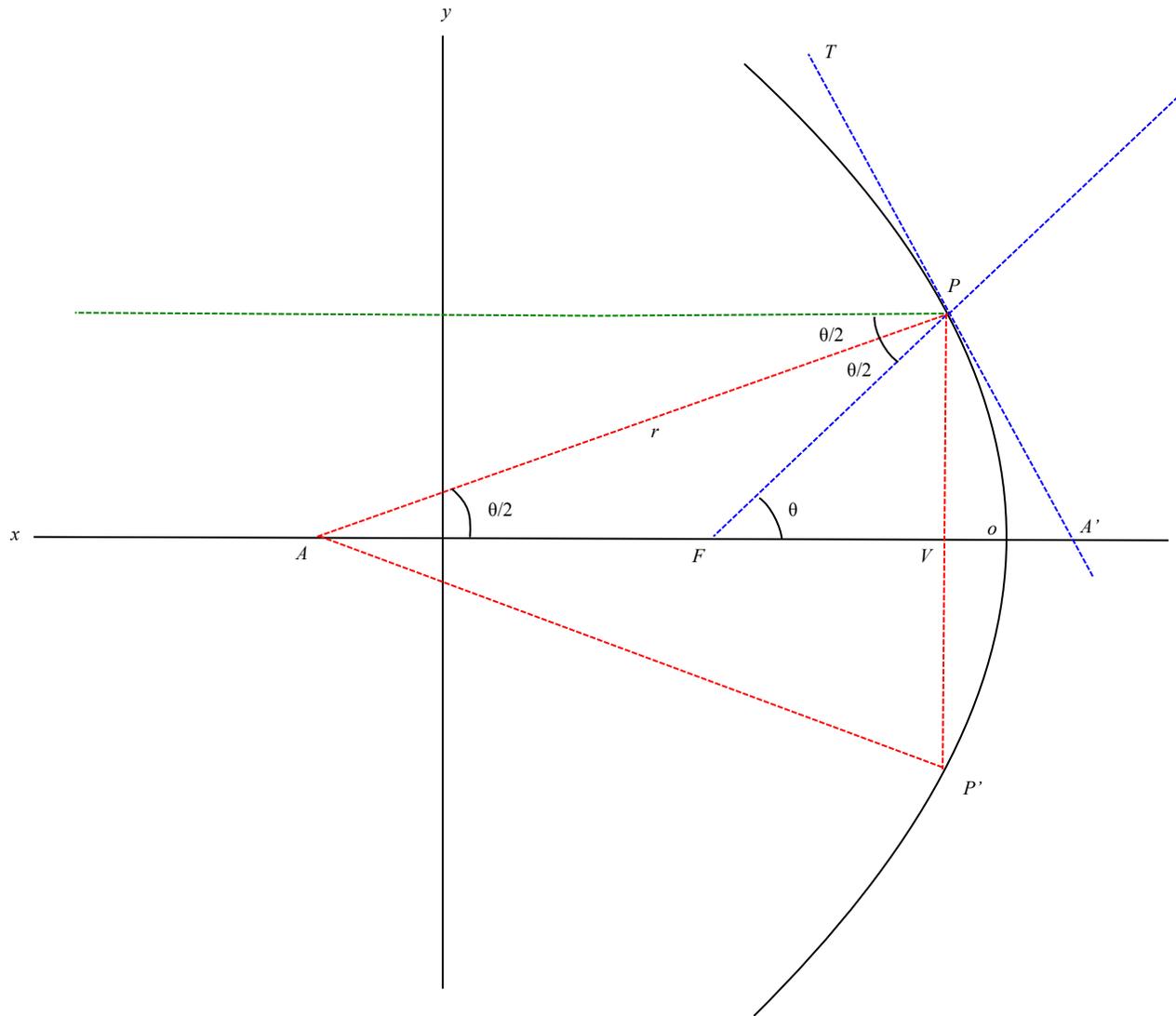
$$q''_{rad} = E = J - G$$

$$q''_{rad} = \int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e+r}(\lambda, \phi, \theta) \cos \theta \sin \theta \, d\lambda \, d\phi \, d\theta -$$

$$\int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda, e+r}(\lambda, \phi, \theta) \cos \theta \sin \theta \, d\lambda \, d\phi \, d\theta$$

A3 Deducción de las relaciones geométricas en la parábola y la esfera

Parábola



$$\overline{PD} = \overline{PD'} = \overline{FP} = r \rightarrow \Delta FDD' \text{ rectángulo}$$

$$\overline{AF} = \overline{FP} = \overline{FP} \rightarrow \Delta AFP \text{ Isósceles}$$

$$\overline{FP} = \overline{PD} \rightarrow \Delta FPD \text{ Isósceles}$$

$$\square APA' = \square DFD' \rightarrow \pi/2$$

$$\overline{AP} \parallel \overline{FD} \text{ y } \overline{FD}' \parallel \overline{PA}'$$

$$\square PFA' = \alpha = \theta/2$$

$$\overline{PQ}' = \overline{FQ} = \overline{FP} \text{ Cos } \theta/2$$

$$\overline{PQ}' = \overline{QA}' \rightarrow \Delta AFQ' = \Delta PFQ'$$

$$\overline{FQ}' = \overline{PQ} = \overline{FP} \text{ Sen } \theta/2$$

$$\overline{PQ} = \overline{QA}' \text{ y } \overline{FP} = \overline{FA}' \rightarrow \Delta FQA = \Delta FQP$$

$$\overline{FQ} = \overline{QD} \rightarrow \Delta FQA' = \Delta DQP$$

Ecuación polar: $2f = r(1 + \text{Cos } \theta) \rightarrow f = r \text{Cos}^2 \frac{\theta}{2}$

$$\overline{AF} = \overline{FP} = \frac{f}{\text{Cos}^2 \frac{\theta}{2}} = \frac{f}{\left(\frac{1 + \text{Cos } \theta}{2}\right)} = r$$

$$\overline{FV} = \frac{r(1 + \text{Cos } \theta)}{2} = r \text{Cos}^2 \frac{\theta}{2} = f$$

$$\overline{AP} = 2r \text{Cos } \frac{\theta}{2} = \frac{2f}{\text{Cos } \frac{\theta}{2}}$$

$$\overline{PX} = r \text{Sen } \theta = \overline{AP} \text{ Sen } \frac{\theta}{2} = 2f \text{Tan } \frac{\theta}{2}$$

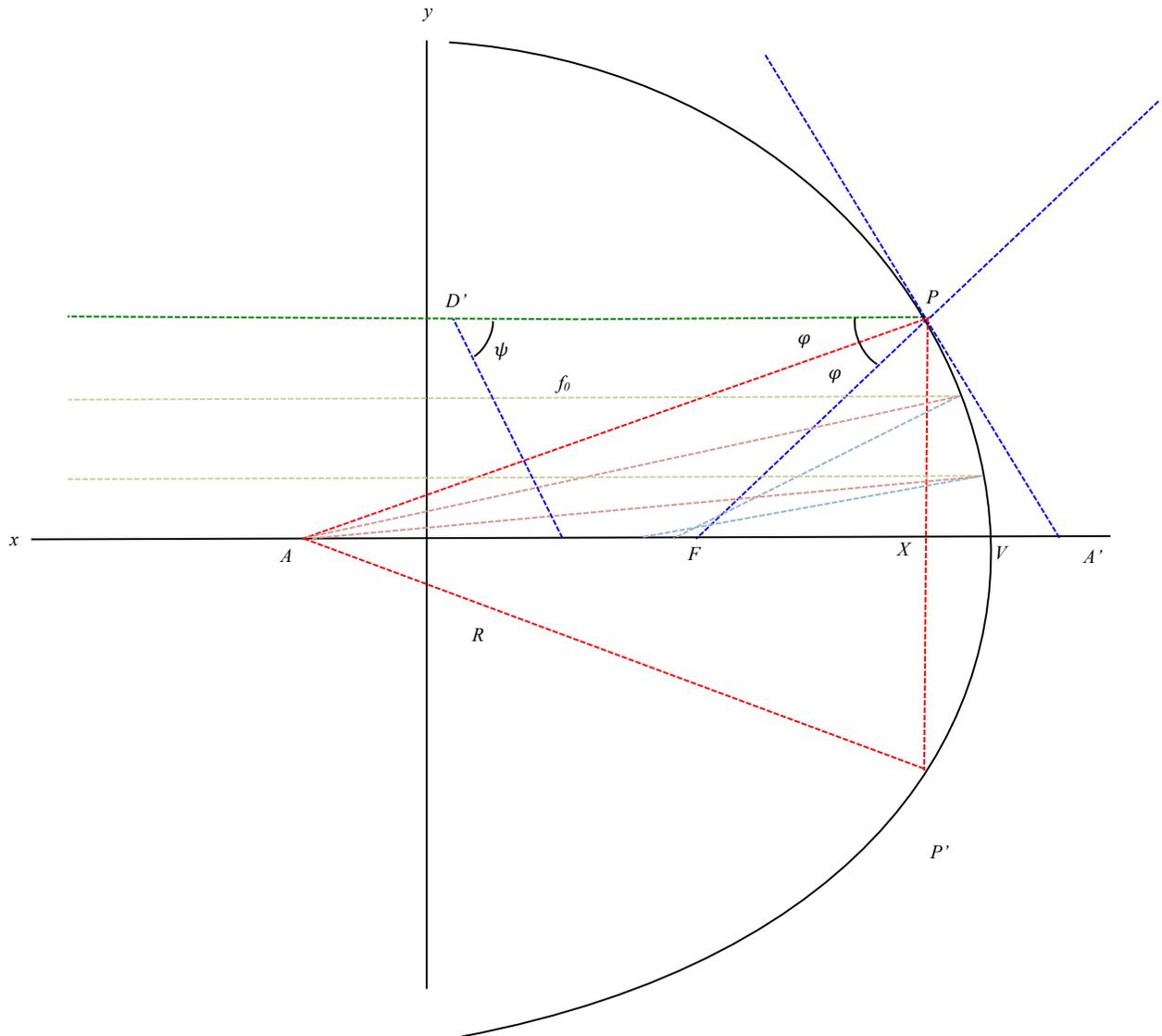
$$\overline{AX} = \overline{AP} \text{Cos } \frac{\theta}{2} = 2f$$

$$\overline{FX} = r \text{Cos } \theta = \overline{AX} - r = \frac{\text{Cos } \theta}{\text{Cos}^2 \frac{\theta}{2}} f = \left(2 - \frac{1}{\text{Cos}^2 \frac{\theta}{2}}\right) f$$

$$\overline{XV} = r - \overline{VO} = r - f = \left(\frac{1}{\text{Cos}^2 \frac{\theta}{2}} - 1\right) f = \text{Tan}^2 \frac{\theta}{2} f$$

$$\overline{AV} = f + r = \left(1 + \frac{1}{\text{Cos}^2 \frac{\theta}{2}}\right) f \tag{A2.4}$$

Esfera



$\overline{AP} \perp \overline{PA'}; \overline{AF} = \overline{FP} = \overline{FA'} \rightarrow \Delta APA'$ rectángulo

$\overline{AA'} = \overline{AF} + \overline{FA'} = 2 \overline{AF}$

$\overline{D'P} = \overline{PD} = \overline{FP} = \overline{AF}$ por construcción

$\sphericalangle DFA' = \sphericalangle PDF = \varphi$ pues $\overline{PD} \parallel \overline{FA'}$ y son alternos internos en \overline{FD}

$\sphericalangle PFD = \sphericalangle PDF = \varphi$ pues ΔPFD es isósceles

$\sphericalangle PAF = \sphericalangle FPA = \varphi$ pues ΔAPF también es isósceles; en particular

$$\sphericalangle PFA' = 2\varphi = 2 \sphericalangle PAF \quad \rightarrow \quad \sphericalangle PAF = \varphi = \sphericalangle FPA$$

$$\sphericalangle D'PA = \sphericalangle PAF = \varphi \quad \text{pues} \quad \overline{D'P} \sphericalangle \overline{AF} \text{ y son alternos internos en } \overline{AP}$$

$$\sphericalangle PFA' = 2\varphi = 2 \sphericalangle PAF \quad \rightarrow \quad \sphericalangle PAF = \varphi = \sphericalangle FPA$$

$$\sphericalangle PFA' = \sphericalangle FA'P = \varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad \text{pues} \quad \Delta FPA' \text{ es isósceles}$$

$$\Delta D'PF \sphericalangle \Delta PFA' \text{ por criterio LAL, en particular } \sphericalangle PD'F = \sphericalangle PFD' = \varphi \text{ y } \overline{D'F} = \overline{PA'}$$

$$\overline{AF} = R = 2f_0 \rightarrow \overline{AF_0} = \overline{F_0V} = f_0 = \frac{R}{2}$$

$$\overline{AF} = \overline{FP} = \frac{f_0}{\cos \frac{\varphi}{2}}$$

$$\overline{FV} = R - \overline{AF} = \left(2 - \frac{1}{\cos \frac{\varphi}{2}}\right) f_0 = \left[1 - \left(\frac{1}{\cos \frac{\varphi}{2}} - 1\right)\right] f_0$$

$$\overline{AP} = 2f_0$$

$$\overline{PX} = R \operatorname{Sen} \frac{\varphi}{2} = \overline{FP} \operatorname{Sen} \varphi = 2f_0 \operatorname{Sen} \frac{\varphi}{2}$$

$$\overline{AX} = R \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2} = 2f_0 \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}$$

$$\overline{FX} = \overline{FP} \operatorname{Cos} \varphi = \frac{\operatorname{Cos} \varphi}{\operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}} f_0 = \left(2 - \frac{1}{\operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}}\right) \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2} f_0$$

$$\overline{XV} = R - \overline{AX} = \left(1 - \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}\right) 2f_0 = 2 \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}} - 1\right) f_0$$

$$\overline{AV} = R = 2f_0$$

$$\overline{F_0F} = \delta f_0 = f_0 - \overline{FV} = \left(\frac{1}{\operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}} - 1\right) f_0 = \frac{1 - \operatorname{Cos} \varphi}{\operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}} f_0$$

En términos parabólicos

$$\overline{AF} = \overline{AF}_{par} \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2} \quad \overline{FV} = \left[1 - \left(\frac{1 - \operatorname{Cos} \varphi}{\operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}}\right)\right] \overline{FV}_{par} \quad \overline{AP} = \overline{AP}_{par} \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}$$

$$\overline{PX} = \overline{PX}_{par} \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2} \quad \overline{AX} = \overline{AX}_{par} \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2} \quad \overline{FX} = \overline{FX}_{par} \operatorname{Cos} \frac{\varphi}{2}$$

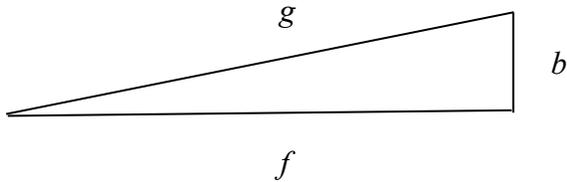
A4 Cálculos para la realineación del punto objetivo

Método algebraico

N : posicionamiento del espejo sobre el eje óptico.

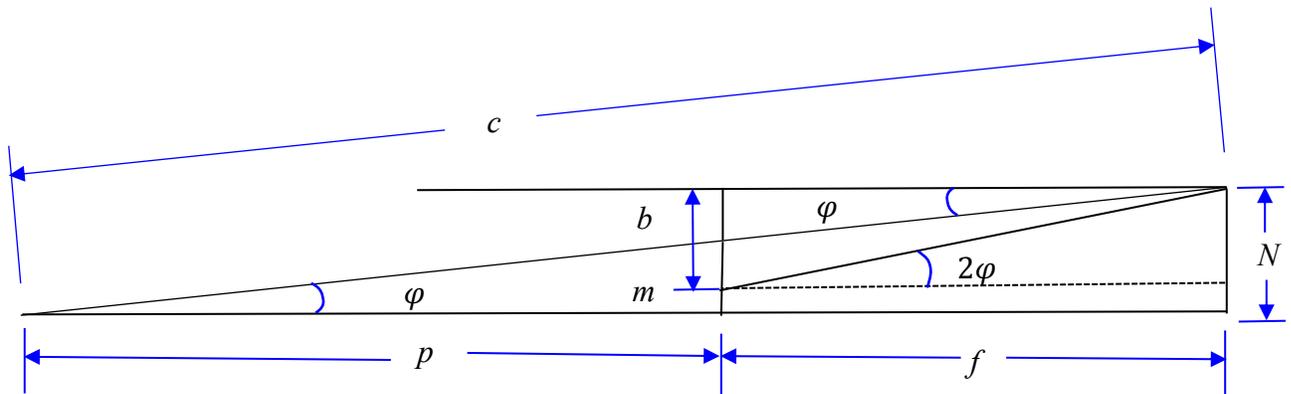
p : distancia lineal del espejo hacia el punto objetivo.

f : distancia lineal del espejo hacia el punto de captación.



$$g^2 = f^2 + b^2$$

$$g = \frac{f}{\cos 2\varphi}$$



$$\left(\frac{b}{\text{Sen } \theta}\right)^2 = f^2 + c^2$$

$$b = \sqrt{\left(\frac{b}{\text{Sen } \theta}\right)^2 - f^2}$$

$$m = N - b$$

$$g = \sqrt{pa^2 + N^2}$$

$$\frac{N}{\text{Sen } \varphi} = \frac{g}{\text{Sen } 90}$$

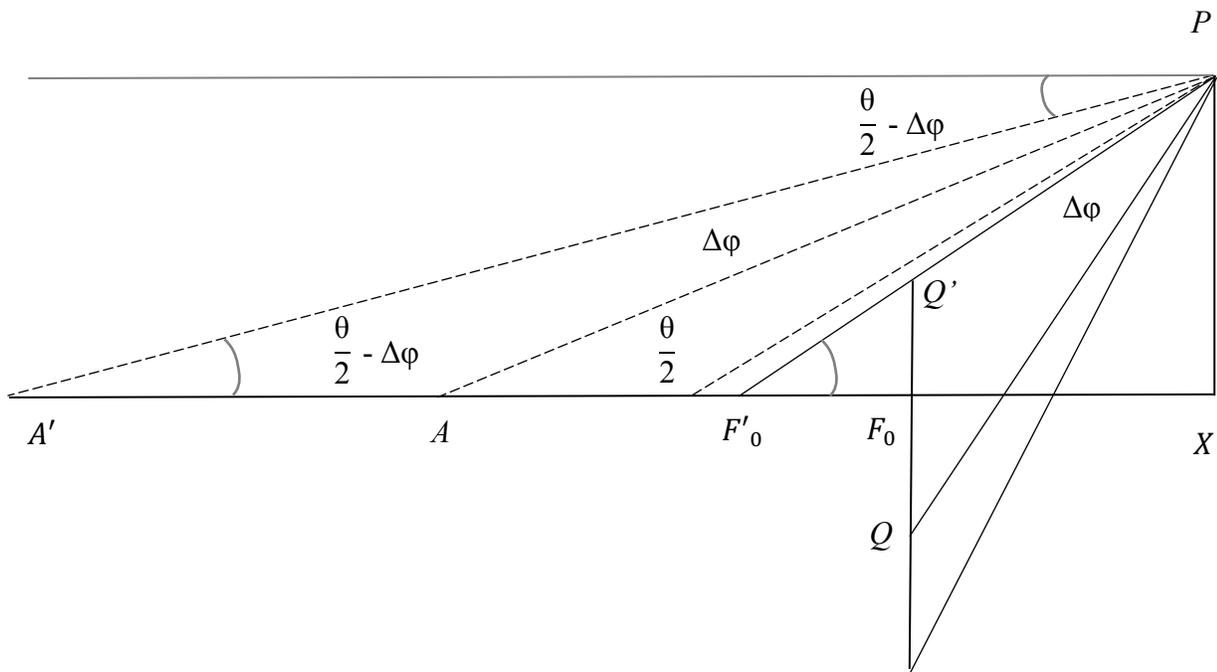
$$\frac{N}{\text{Sen } \varphi} = \sqrt{pa^2 + N^2}$$

$$\varphi = \text{Sen}^{-1} \frac{N}{\sqrt{po^2 + N^2}}$$

$$b = \sqrt{\left(\frac{f}{\text{Cos } 2\varphi}\right)^2 - f^2}$$

$$m = N - \left(\sqrt{\left(\frac{f}{\text{Cos } 2\varphi}\right)^2 - f^2}\right)$$

Método geométrico



$$\overline{QQ'} = \frac{\text{Sen } 2 \Delta \varphi}{\text{Cos } (\theta - 2 \Delta \varphi)} \overline{PQ}$$

$$\overline{QQ'} = \frac{\text{Sen } 2 \Delta \varphi}{\text{Cos } (\theta - 2 \Delta \varphi)} \frac{(2 \text{Cos } \frac{\theta}{2} - 1)}{\text{Cos } \theta} f_0 = \frac{2 \text{Sen } \Delta \varphi \text{Cos } \Delta \varphi}{\text{Cos } (\theta - 2 \Delta \varphi)} \frac{(2 \text{Cos } \frac{\theta}{2} - 1)}{\text{Cos } \theta}$$

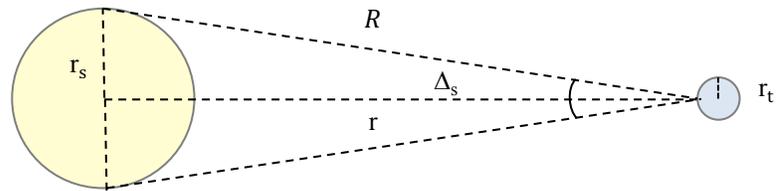
$$\overline{AA'} = \frac{2 \text{Sen } \Delta \varphi}{\text{Sen } \left(\frac{\theta - 2 \Delta \varphi}{2} \right)} f_0$$

$$\overline{QQ'} = \left[\frac{\text{Sen } \left(\frac{\theta \pm 2 \Delta \varphi}{2} \right) \text{Cos } \Delta \varphi}{\text{Cos } (\theta \pm 2 \Delta \varphi)} \right] \frac{(2 \text{Cos } \frac{\theta}{2} - 1)}{\text{Cos } \theta} \overline{AA'}$$

$$\overline{F_0Q} = \overline{FQ} \text{ Sen } \theta = \text{Tan } \theta \overline{F_0F} = \text{Tan } \theta \left(\frac{1}{\text{Cos } \frac{\theta}{2}} - 1 \right) f_0$$

A5 Cálculo de Δ_s para el cono solar

Calculo de Δ_s



Cono solar uniforme.

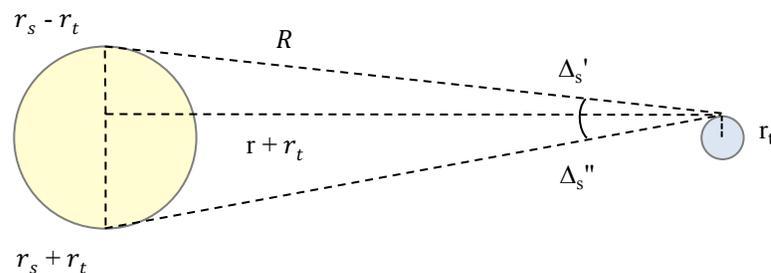
$$r = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$r_s = 6.95 \times 10^8 \text{ m}$$

$$r_t = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$$

$$\tan \Delta_s = \frac{r_s}{r}; \quad \Delta_s = \tan^{-1} \frac{r_s}{r}; \quad \Delta_s = \tan^{-1} \frac{6.95 \times 10^8}{1.496 \times 10^8} = 0.266^\circ = \frac{0.266 \pi}{180} = 4.65 \text{ m rad}$$

Calculo de la magnitud de las desviaciones a Δ_s



Cono solar en el polo terrestre.

$$\tan \Delta_s' = \frac{r_s - r_t}{r + r_t}; \quad \Delta_s' = \tan^{-1} \frac{r_s - r_t}{r + r_t}; \quad \Delta_s' = \tan^{-1} \frac{6.95 \times 10^8 - 6.371 \times 10^6}{1.496 \times 10^8 + 6.371 \times 10^6} \text{ m}$$

$$\Delta_s' = \tan^{-1} \frac{(6.95 \times 10^2 - 6.371) \times 10^6}{(1.496 \times 10^5 + 6.371) \times 10^6} = \tan^{-1} \frac{695 - 6.371}{149600 + 6.371} = \tan^{-1} \frac{688.629}{149606.371}$$

$$\Delta_s' = \text{Tan}^{-1} 0.0046029 = 0.263^\circ = \frac{0.263 \pi}{180} = 4.603 \text{ mrad}$$

$$\varepsilon' = \frac{\Delta_s - \Delta_s'}{\Delta_s} = \frac{4.65 - 4.603}{4.65} = 0.0101 = 1.01 \%$$

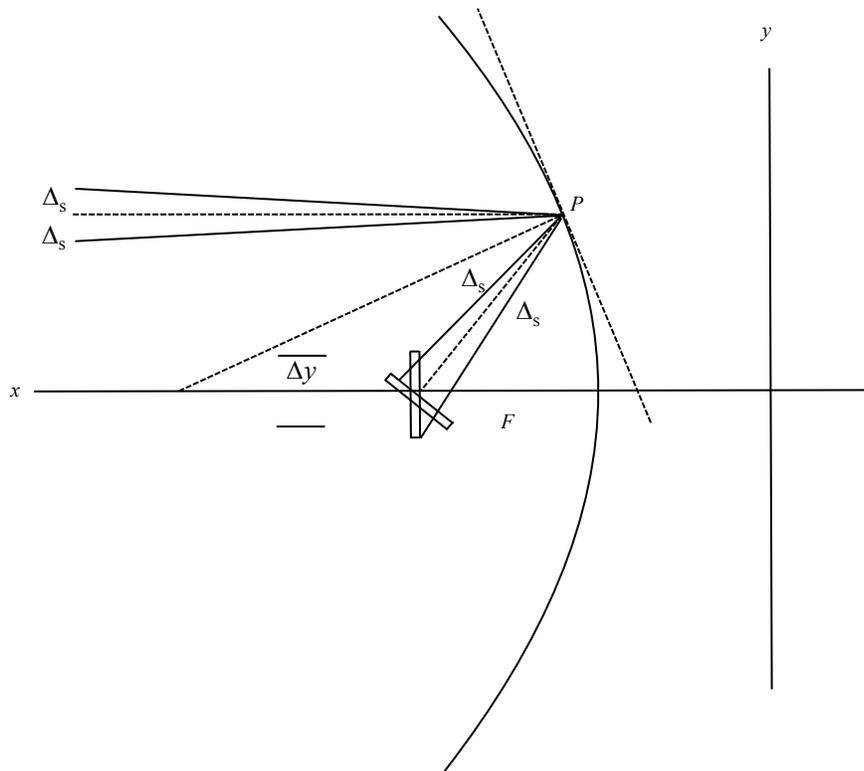
$$\tan \Delta_s'' = \frac{r_s + r_t}{r + r_t}; \quad \Delta_s'' = \text{Tan}^{-1} \frac{r_s + r_t}{r + r_t}; \quad \Delta_s'' = \text{Tan}^{-1} \frac{6.95 \times 10^8 + 6.371 \times 10^6 \text{ m}}{1.496 \times 10^8 + 6.371 \times 10^6 \text{ m}}$$

$$\Delta_s'' = \text{Tan}^{-1} \frac{(6.95 \times 10^2 + 6.371) \times 10^6}{(1.496 \times 10^5 + 6.371) \times 10^6} = \text{Tan}^{-1} \frac{695 + 6.371}{149600 + 6.371} = \text{Tan}^{-1} \frac{701.371}{149606.371}$$

$$\Delta_s'' = \text{Tan}^{-1} 0.004688 = 0.269^\circ = \frac{0.269 \pi}{180} = 4.688 \text{ mrad}$$

$$\varepsilon' = \frac{\Delta_s - \Delta_s''}{\Delta_s''} = \frac{4.65 - 4.688}{4.688} = 0.00811 = 0.81 \%$$

Corolario: proyección de Δ_s en un receptor oblicuo al cono solar reflejado



$$\frac{\Delta y}{\overline{PF}} = \tan \Delta_s; \quad \Delta y = \tan \Delta_s \overline{PF}; \quad \Delta x = 2 \Delta y$$

$$\Delta y = \tan \Delta_s \overline{PF} \otimes \Delta_s \overline{PF}; \quad \Delta x = 2 \overline{PF} \Delta_s$$

Referencias

- ABC Gema Solar. (2011). *http://www.abc.es/20111006/natural-energiasrenovables/abci-gemasolar-planta-solar-andalucia-201110061346.html*. Obtenido de Energías renovables GEMASOLAR.
- Abengoa. (2018). *Central Termosolar Agua Prieta*. Obtenido de <http://www.abengoa.com.mx/web/es/areas-de-actividad/ingenieria-y-construccion-industrial/energia-renovable/obra/Central-termosolar-Agua-Prieta-II-14-MW/>
- Ari Rabl. (1985). *Active solar collectors and their applications*.
- Banco Mundial. (2014). *Reporte mundial de emisiones de CO2*. Obtenido de <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?locations=MX>
- C.A. Arancibia-Bulnes y D. Riveros-Rosas. (2013). *Notas del Curso de Óptica de Sistemas de Concentración Solar*. Temixco: IER-UNAM.
- Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero. (2013). *Perfil de la industria siderúrgica en México*. México: CANACERO.
- Canedo, F. P. (23 de Enero de 2017). *Empeora calidad del aire en Torreón*. (Siglo de Torreón) Obtenido de <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1305126.empeora-calidad-del-aire-en-torreon.html>
- Ciemat. (2012). *Plataforma solar de Almeria*. Obtenido de https://www.psa.es/es/techrep/2012/ANNUAL_REPORT_2012.pdf
- Comisión Nacional del Agua, Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS). (2018). Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/es/emas>.
- D. Riveros-Rosas. (2010). *Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico*. *Solar Energy*, 84, 795.
- DLR Institute of Solar Research. (2018). *DLR*. Obtenido de http://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-10953/19318_read-44871
- Duffie, J. A. and Beckman, W. (2013). *Solar Engineering and Thermal Processes*. Wiley, USA: 4th Edition.
- E. Anguera, R. Pérez-Enciso. (2014). *Diseño y caracterización de prototipos de homogeneizadores de alto flujo radiativo para el HOSIER*. *ANES*.
- Energy Alternative. (2018). *Alternative Energy*. (Alternative Energy) Obtenido de <http://www.alternative-energy-news.info/spherical-sun-power-generator/>

- Forbes. (2014). *IBM Teams With Swiss Startup For Solar 'Sunflower'*. Obtenido de <https://www.forbes.com/sites/heatherclancy/2014/09/29/ibm-teams-with-swiss-startup-for-solar-sunflower/#5d4743105558>
- Frank P. Incropera, David P. De Witt. (s.f.). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall.
- Gemasolar. (2018). *Torre Solar Energy*. Obtenido de <http://torresolenergy.com/gemasolar/>
- German Aerospace Center . (2018). *DLR Solar Furnace Info Brochure*. Obtenido de http://www.dlr.de/sf/en/Portaldata/73/Resources/dokumente/grossanlagen/DLR_Solar_Furnace_Info_Brochure.pdf
- Gobierno de España. (2018). *SOLAR FURNACES*. Obtenido de <http://www.psa.es/en/instalaciones/horno.php>
- Gobierno de la CDMX. (s.f.). *Dirección de monitoreo atmosférico*. Obtenido de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/ultima-hora-reporte.php>
- Gobierno de la CDMX. (s.f.). *Programa de verificación vehicular y hoy no circula de la CDMX*. Obtenido de <http://www.hoy-no-circula.com.mx>
- Grigore Gou. (2005). Chebychev-Grübler-Kutzbach's criterion for mobility calculation of multi-loop mechanisms revisited via theory of linear transformations. *European Journal of Mechanics A/Solid*.
- Group Volumatrix. (2018). *Fresnel Areva Solar*. Obtenido de <http://volumatrixgroup.com/?s=renewable+energy&x=0&y=0&paged=43>
- H. Baig, K.C. Heasman, T.K. Mallick, . (2012). Non-uniform illumination in concentrating solar cells. *Energy Rev.*, 5890-5990.
- H. Pfeiffer, M. Bihler. (1982). The effects of non-uniform illumination of solar cells with concentrated light. *Sol. Cells*(5), 293-299.
- Henrik Wann Jensen. Stephen R. Marschner, Marc Levoy, Pat Hanrahan. . (s.f.). *A Practical Model for Subsurface Light Transport*. Stanford University.
- IER-UNAM. (2005). *Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados. DEFRAC*. Obtenido de <http://xml.cie.unam.mx/xml/se/cs/defrac.xml>.
- Instituto de Energías Renovables . (Abril de 2014). *UNAM-IER. Horno Solar de Alto Flujo Radiactivo. Instituto de Energías Renovables*. (Universidad Autónoma de México) Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=J0Gx3dvujfs>
- International Energy Agency. (2017). *Energy Perspectives (https://www.iea.org/etp2017/)*. OECD.
- Irene Ferrando, Carlos Segura. (2010). La sucesión de Fibonacci como herramienta para modelizar la naturaleza. *Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada de Valencia*, 3(5).

- James L. Outman, Elisabeth M. Outman. (2003). *Industrial Revolution*. U.X.L.
- Joseph E. Shigley, John J. Uicker. (2001). *Theory of Machines and Mechanism*. Michigan: McGraw-Hill.
- L., M.-Á. (2016). *Estudios calorimétricos para la medición de propiedades optométricas en sólidos sujetos a altas temperaturas y altos flujos radiativos*. Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar P32.33.34.
- LACYQS. (2018). *Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar*. Obtenido de <http://www.concentracion solar.org.mx>
- Luque A, Sala G, Arboiro JC. (1998). Electric and thermal model for non-uniformly illuminated concentration cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 51:269-90.
- Marta C. Cervantes R., Angélica M. Franco G. (2015). *Diagnostico Ambiental de la Comarca Lagunera*. UNAM.
- Materiales Hissuma. (2018). *Hissuma Materiales*. Obtenido de <https://www.hissuma-materiales.com.ar>
- Mundial Banco. (2015). *Reporte mundial de consumo de energía procedente de combustibles fósiles*. Obtenido de <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS>
- National Renewable Energy Laboratory. (2018). *Soltrace*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/csp/soltrace.htm>
- 1
- NREL. (2018). *Concentrating Solar Power*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/csp/facility-hfsf.html>
- Paul Scherrer Institute. (2013). *Solar Technology Laboratory*. Obtenido de http://stage-ste.eu/presentations/STAGE_STE_presentationPSI.pdf
- PennState Collage of Earth and Minerals Sciences. (2018). *Concentration Ratio*. Obtenido de <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/8>
- R. Pérez-Enciso Tesis Doctoral. (2015). *CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y TÉRMICA DEL HORNO SOLAR DEL IER*. UNAM. Obtenido de Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER).
- R. Pérez-Enciso, Alessandro Gallo. (2016). A simple method to achieve a uniform flux distribution in a multi faceted point focus concentrator. *Renew. Eng.*, 93, 115-299.
- R. Pérez-Enciso, E. Brito-Bazan, C.A. Pérez-Rábago, C. a Arancibia-Bulnes, D. Riveros-Rosas, C. a Estrada,. (2014). Correction of the concentrated sunlight spot's drift of the IER-UNAM's solar furnace. *Solar Energy*.
- Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett Shigley's. (2008). *Mechanical Engineering Design* 8th ed. McGraw-Hill.
- Rosas, D. R. (2010). Optical design of a high radiative flux solar furnace for México. *Solar Energy*.

- Schilling M.F., Watkins A.E., Watkins W. . (2002). Is Human Height Bimodal? *The American Statistician*, 56(3), 223-229.
- Semarnat. (s.f.). *Campo solar Agua Prieta II CC 171*. Comisión Federal de Electricidad.
- Solargis Solar Resource. (2018). *Solar Resource*. Obtenido de Solargis: <http://solargis.com>
- Sollab. (2018). *Solar Technology Laboratory, Paul Scherrer Institute PSI and Professorship in Renewable Energy Carriers - ETH Zurich*. Obtenido de <https://www.sollab.eu/psi.html>
- Soteris A. Kalogirou. (s.f.). *Processes and Systems*. Solar Energy Engineering.
- Spetsotoplenie. (2018). *Как сделать коллектор отопления своими руками*. (spetsotoplenie) Obtenido de <http://spetsotoplenie.ru/sistemy-otopleniya/elementy-sistem-otopleniya/kak-sdelat-kollektor-otopleniya-svoimi-rukami.html>
- Technology Power. (2018). *Maricopa solar*. Obtenido de <https://www.power-technology.com/projects/maricopasolarplantar/>
- Trombe, F. (1957). Furnace for the treatment of substances by means of the energy supplied by a concentrated radiation. *2793018A*.
- University of Oregon. (2007). *Solar Radiation Monitoring Laboratory*. Obtenido de <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>
- Warren, J. S. (2000). *Modern optical engineering*. Ney York: McGraw-Hill.
- Wolfarm MathWolrd. (2018). *Gaussian Function*. Obtenido de <http://mathworld.wolfram.com/GaussianFunction.html>
- Y. Meller, A. Kribus. (2013). Kaleidoscope homogenizers sensitivity to shading. *Solar Energy*, 88, 204-214.

Anexos

Productos y reconocimientos obtenidos.

Congreso Nacional de Estudiantes de Energías Renovables, 2016

Primer lugar de los proyectos presentados en el nivel de maestría





IER
Instituto de Energías
Renovables

Análisis y diseño de sistemas de posicionamiento de espejos en un concentrador solar para homogeneización de flujo radiativo

Luis Andrés Amat Castrillón ¹, Lúar Moreno Álvarez ¹,
Héctor González Caramillo ², Carlos Alberto Pérez Rábago ².

¹ Instituto Tecnológico de la Laguna, Tecnológico Nacional de México. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Blvd. Revolución y Av. Inst. Tec. Laguna, S/N Torreón, Coahuila, 27000, México.

² Instituto de Energías Renovables, UNAM. Departamento de Sistemas Energéticos, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México.

andres_amat@hotmail.com

C
N
E
E
R

2
0
1
6

Resumen

En este trabajo se abordarán los resultados parciales del estudio, análisis, e implementación de algunas modificaciones a los sistemas mecánicos de posicionamiento que proporcionan la alineación óptica requerida por el conjunto de espejos de algunos dispositivos de concentración solar instalados en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM. El trabajo es efectuado como parte de una estancia de investigación de tesis de maestría del primer autor, que permitirá iniciar el diseño, así como obtener las bases técnicas necesarias para la adquisición, construcción e instalación de una infraestructura similar para la investigación de la energía solar térmica de concentración en el Instituto Tecnológico de la Laguna, con el objetivo de mejorar el aprovechamiento y utilización de dicha energía al conseguir flujos de concentración homogéneos, lo cual puede significar mayores eficiencias en sistemas térmicos de generación de energía eléctrica, procesos térmicos de almacenamiento de energía en fundición de sustancias, tratamiento de aguas residuales, motores térmicos de generación de potencia, entre otros.

Congreso Nacional de Sustentabilidad y Energías Renovables, 2017

Selección por parte del comité técnico científico del congreso como uno de los mejores 15 trabajos con derecho a exponerse mediante ponencia pública.



El Comité Organizador del primer Congreso Nacional de Sustentabilidad y Energías Renovables (CONASER), extiende la presente constancia a:

Lúar Moreno Álvarez

Por su participación en el CONASER con la presentación de la ponencia:

Un modelo estadístico para la homogenización del flujo solar en receptores planos mediante la reorientación de espejos concentradores

Celebrado en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, campus Cuernavaca, los días 26, 27 y 28 de abril de 2017.

Dr. Miguel Robles Pérez
Coordinador de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables

Mtro. Ismael Couto Benítez
Director del programa de Ingeniería en Desarrollo Sustentable

Xochitepec, Morelos, 29 de abril de 2017

CONASER 2017 | Ponencia: X

www.cva.itesm.mx/conaser2017/ponencias.html

Aplicaciones Inicio de sesión - Cua Google Académico Traductor Diccionario de la lengua Electronic library, Do BookSC El tiempo en México Instituto Tecnológico Otros favoritos

Tecnológico de Monterrey CONASER 2017 PROGRAMA REGISTRO CONTACTO COSTOS JARDINES

Ponencias del CONASER 2017

Felicidades a todos los proyectos seleccionados para presentarse en el CONASER 2017.
Agradecemos a todos los participantes de esta edición y a continuación presentamos los nombres de los proyectos, así como sus horarios de presentación.
¡Enhorabuena!

Resultados de Ponencias:
* Todas las ponencias se presentarán el día jueves 27 de abril

Un modelo estadístico para la homogeneización del fluido solar en receptores planos mediante la reorientación de espejos concentradores
Dr. Lúar Moreno Álvarez
Hora de presentación: 10:30
Lugar de presentación: 5to piso

Caracterización de celdas fotovoltaicas de triple unión en simulador solar de alta concentración
Mtro. Héctor González-Camarillo
Hora de presentación: 10:45
Lugar de presentación: 5to piso