

Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



**“Desarrollo de un concentrador solar de
foco fijo para generación de electricidad
por medio de un motor Stirling”**

Tesis que para obtener el grado de doctor en ingeniería
presenta:

José Efrén Ruelas Ruiz

Director de tesis:

Dr. Nicolás Velázquez Limón

Mexicali B. C. Octubre del 2012.

AGRADECIMIENTOS

A dios , por haber puesto los medios para realizar esta tarea.

A mi esposa, Ma. Luisa, por su paciencia, confianza, amor y motivación en todo momento.

A mis hijas, Paloma y Alondra por su cariño y compañía en todo momento.

A mis padres, José y Guadalupe , por su apoyo y su espera .

A mi hermano y hermanas, (Ángel, Juanita, Yolanda , Lucila y Noemí), que en todo momento me brindaron su amistad y apoyo.

A mi Asesor , Dr. Nicolás Velázquez Limón, por compartir sus conocimientos y amistad.

A mis profesores, (Dra. Gisela Montero, Dr. Aníbal Luna , Dr. Jesús Cerezo, Dr. Pérez Márquez), por compartir sus conocimientos, ofrecerme su amistad y adoptarme en sus clases.

A mis amigos y compañeros, (Guillermo, Pedro, Francisco, Alexis, Adolfo, Fernando, Pando, Midory , Luis, Ricardo, Daniel, Gallegos, Jesús y todos los que trabajaron en el proyecto), por su apoyo y motivación.

A mi casa de estudio, el Instituto de Ingeniería, por sus facilidades prestadas en la realización y desarrollo de los estudios de doctorado .

A mi alma mater, Universidad Autónoma de Baja California, por ser la casa de estudios.

A mi centro de trabajo, Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, por la comisión para realizar estudios de doctorado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para los estudios de doctorado.

ÍNDICE

RESUMEN.....	IV
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2. ANTECEDENTES.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	11
1.3.1. Objetivo general.....	11
1.3.2. Objetivos específicos	11
1.4. HIPÓTESIS	11
1.5. ACTIVIDADES DE CADA AUTOR EN LAS PUBLICACIONES PRESENTADAS.....	12
1.6.1. Artículo: “A mathematical model to develop a Scheffler-type solar concentrator coupled with a Stirling engine”	12
1.6.2. Artículo: “Diseño de un concentrador solar acoplado a un motor Stirling fijo”	12
1.6.3. Artículo: “Estudio comparativo entre un concentrador solar continuo y uno segmentado”	13
1.6.4. Solicitud de patente: “Concentrador solar puntual de foco fijo para múltiples propósitos”	13
CAPITULO 2. PRESENTACIÓN DE LOS ESTUDIOS.....	14
2.1. A MATHEMATICAL MODEL TO DEVELOP A SCHEFFLER-TYPE SOLAR CONCENTRATOR COUPLED WITH A STIRLING ENGINE	14
2.2. DISEÑO DE UN CONCENTRADOR SOLAR ACOPLADO A UN MOTOR STIRLING FIJO.....	16
2.3. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UN CONCENTRADOR SOLAR CONTINUO Y UNO SEGMENTADO	17
2.4. CONCENTRADOR SOLAR PUNTUAL DE FOCO FIJO PARA MÚLTIPLES PROPÓSITOS	19
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
ANEXO 1 (Artículo: A mathematical model to develop a Scheffler-type solar concentrator coupled with a Stirling engine)	22
ANEXO 2 (Artículo: Diseño de un concentrador solar acoplado a un motor Stirling fijo)	33
ANEXO 3 (Artículo: Estudio comparativo entre un concentrador solar continuo y uno segmentado)	41
ANEXO 4 (Solicitud de patente: Concentrador solar puntual de foco fijo para múltiples propósitos)	50

RESUMEN

La generación de electricidad empleando los medios convencionales, derivados de combustibles fósiles contribuye en gran medida a la degradación del medio ambiente, así como al calentamiento global, aunado a ésta problemática, la dependencia del petróleo, un recurso no renovable que está por agotarse, propicia la búsqueda de fuentes renovables de energía. Tal es el caso de las tecnologías de concentración solar térmica, entre las que podemos mencionar principalmente: Cilindro Parabólico, Fresnel, disco parabólico con motor Stirling y helióstatos con torre central.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un nuevo sistema de Concentración Solar de Foco Fijo (CSFF), que elimina las desventajas que se tienen en las tecnologías convencionales. El objetivo general del proyecto es desarrollar teórica y experimentalmente un CSFF que satisfaga la demanda de energía térmica de un motor Stirling de 3 kWe. El modelo matemático propuesto incorpora una nueva geometría del CSFF en coordenadas cartesianas, al cual se le integran las ecuaciones del comportamiento térmico de un receptor de cavidad con la finalidad de desarrollar un simulador y llevar a cabo el diseño del CSFF.

Los resultados del estudio paramétrico proporcionan las dimensiones de diseño del CSFF, que de manera semejante al concentrador de disco parabólico, la mayor concentración se obtiene con un ángulo de borde de 45° , pero con la diferencia de que el receptor de cavidad se encuentra con una inclinación 80.7° en posición fija, obteniéndose una eficiencia térmica de dicho receptor del 88%. El modelo matemático y metodología desarrollados en este trabajo pueden ser extrapolados a otras aplicaciones, sin embargo cuando se requieran de potencias mayores se tendrá que incluir estudios de factibilidad técnica y que permitan establecer si el ancho de la imagen solar se ajusta al área del receptor para la nueva aplicación. Finalmente la nueva ecuación propuesta para estimar el factor de intercepción es versátil, debido a que puede ser aplicada tanto a concentradores de disco parabólico como a concentradores de secciones de disco parabólico ajustando los límites de integración.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La generación de electricidad empleando los medios convencionales, derivados de combustibles fósiles contribuye en gran medida a la degradación del medio ambiente, así como al calentamiento global, aunado a ésta problemática, la dependencia del petróleo, un recurso no renovable que está por agotarse, genera la búsqueda de fuentes renovables de energía. Para solucionar esta problemática se ha recurrido principalmente a la incorporación de tecnologías que aprovechan la radiación solar para generación de electricidad, tal es el caso de las tecnologías de concentración solar térmica, entre las que podemos mencionar principalmente: Cilindro Parabólico, Fresnel, Disco parabólico con motor Stirling y Helióstatos con torre central [1].



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

En este contexto las tecnologías de concentración solar por disco parabólico que se emplean para la generación de electricidad por medio de un motor Stirling, instalado en el punto focal del disco parabólico como el mostrado en la figura 1, presentan altos costos de instalación, operación y mantenimiento, aunado a una disminución de la eficiencia de conversión de la energía solar a eléctrica, debida a problemas de sombreado del motor Stirling sobre la superficie del reflector y las pérdidas térmicas por convección variables en la cavidad del motor Prakash et al. [2].

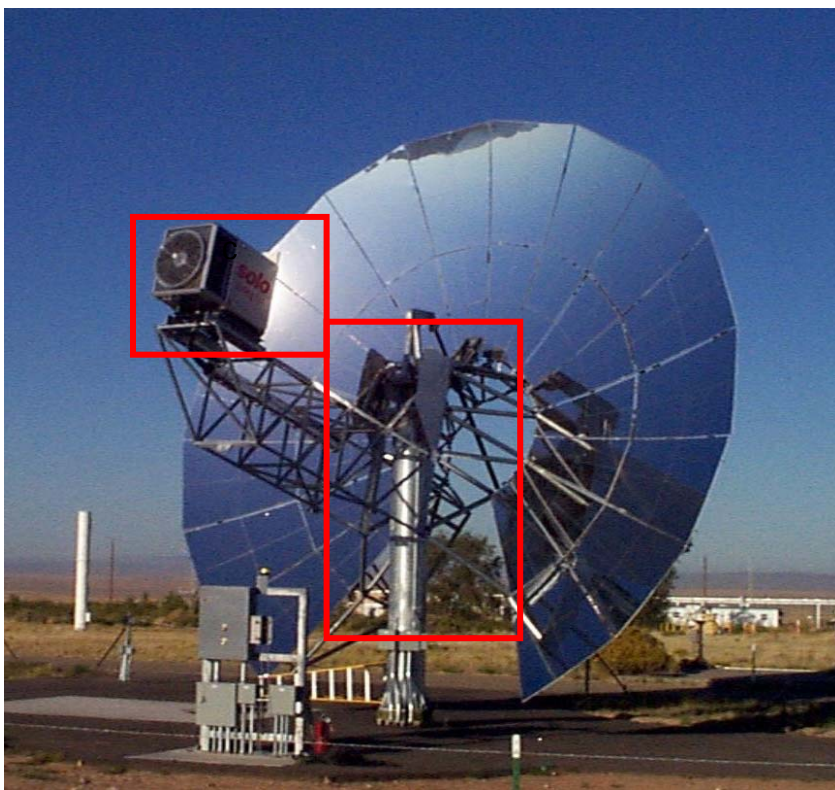


Figura 1. Sistema de Disco parabólico Stirling (Fuente: Sandia National Laboratory).



1.2. Justificación

De acuerdo a la problemática planteada anteriormente, las tecnologías convencionales de generación de electricidad por medio de los sistemas de disco parabólico motor Stirling demandan una mayor viabilidad técnica y económica para favorecer su implementación, para ello se requiere de un sistema de concentración solar que reúna las siguientes características:

- Reducción de las pérdidas térmicas por convección en el motor Stirling.
- Eliminación de los problemas de sombreado originado por el motor Stirling.
- Incremento de la eficiencia del sistema de concentración solar.
- Operación del motor Stirling en una posición fija, para habilitar la posibilidad de incorporar un sistema de fuego directo que permita la operación cuando no se tenga el recurso solar.

1.3. Antecedentes

Los colectores solares térmicos son dispositivos capaces de captar la radiación solar y transmitirla a un fluido, para su posterior aprovechamiento, como es el caso de la generación de electricidad. Para ello se emplean las siguientes tecnologías: Cilindro Parabólico, Fresnel, Disco parabólico con motor Stirling, Helióstatos con torre central [1]. El proyecto, se encuentra en el contexto de la tecnología de generación de electricidad por medio de un motor Stirling y a su vez, se centra en los concentradores solares puntuales de foco fijo, entre los que encontramos las siguientes tecnologías: Helióstatos, Concentradores HTC y Scheffler, los cuales son descritos a continuación.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

1.3.1 Helióstatos

Un estudio realizado por Cabanillas [3] sobre los heliostatos, describe que éstos son dispositivos esenciales de la tecnología de colectores solares de concentración, pues tienen la función de re-direccionar los rayos solares directos para colocarlos en el receptor central que se encuentra en la torre. Para lograr esto, cada heliostato tiene que tener movilidad en dos ejes, tanto en dirección acimutal como en altura sobre el horizonte, ambos movimientos deben ser controlados con precisión en el tiempo.

La idea conceptual de un dispositivo con estas características se le asigna a Fahrenheit, pero el primer heliostato operativo, se le atribuye al científico holandés Wilhem Jacob's Gravesande, quien alrededor del año 1720 logró obtener un instrumento funcional. En ese tiempo los heliostatos eran utilizados en laboratorios de investigación con varios propósitos, entre los que se nombran aparecen la iluminación de microscopios, el estudio de la luz polarizada y la espectroscopia [4].

Recientemente la construcción de heliostatos figura 2, resurge a mediados de los años 70's ya con fines de aprovechamiento de energía solar en torres centrales y en hornos solares de alta temperatura. La evolución de los heliostatos en estas últimas décadas ha sido muy importante, su objetivo sigue siendo el mismo; mantener el haz de luz solar reflejado sobre un blanco fijo, sin embargo sus materiales y funcionamiento han variado notablemente. El diseño actual incluye generalmente una gran área de reflexión, una rígida estructura mecánica para sostener los espejos y soportar los vientos, además cuentan con motores de pasos para darles el movimiento y la orientación requeridos, así como con dispositivos electrónicos de control de seguimiento [3].



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO



Figura 2. Foto de distintos helióstatos desarrollados a finales de los años 80's (fuente: Asociación de ingeniería, México 2008).

En los campos de torre central, normalmente los helióstatos son controlados por una computadora central, la cual calcula su posición para cada helióstato y el desplazamiento necesario para seguir proyectando el haz de luz solar sobre el blanco fijo. Una de las características que más ha cambiado del helióstato es el tamaño del área de reflexión, a mediados de los años 70's iniciaron con tamaños de 20 a 30 m², para finales de los 80's ya se podían encontrar diseños de 95 m², ahora existen hasta de 148 m² y estudios sugieren que pueden llegar a ser factibles hasta de 400 m² [3].

En la figura 3 se muestra esta evolución del tamaño con el tiempo. Tomando como base las plantas de torre central construidas, podemos observar que los helióstatos han ido creciendo sustancialmente buscando el punto de equilibrio económico de costo-factibilidad, en la planta Solar-One se usó un tamaño de 40 m² y en la PS-10 de 120 m² [4].



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

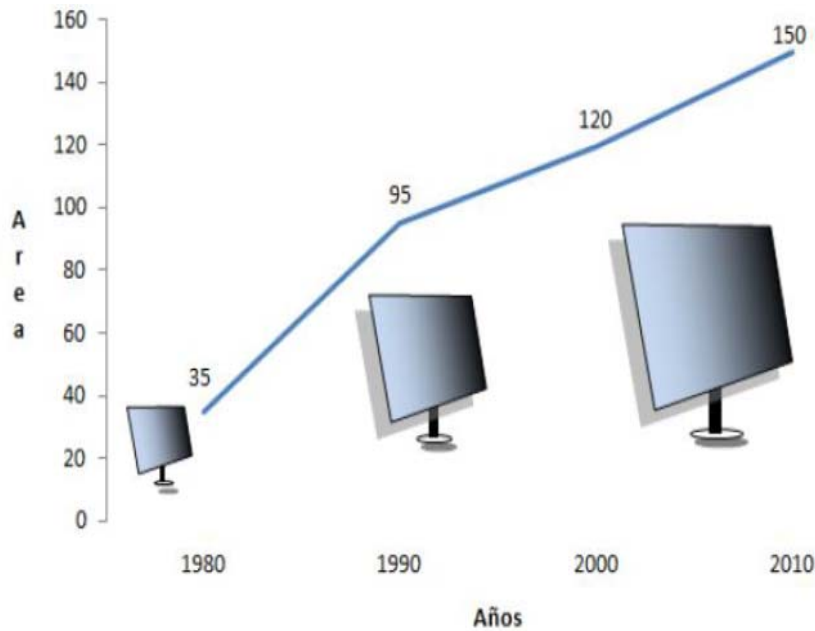


Figura 3.- Evolución del tamaño en m² de los helióstatos con respecto al tiempo (fuente: Asociación de ingeniería, México 2008).

Este crecimiento se debe principalmente a los costos de la superficie del reflector y del seguimiento mecánico que en ocasiones llegan a ser casi la mitad del costo total del helióstato. Otro factor que influye en el agrandamiento de los helióstatos es el cableado de control y de energía eléctrica que se requiere llevar a cada uno de estos a lo largo de todo el campo [4].

1.3.2 Tecnología del reflector HTC

El concentrador solar HTC se tiene referencias sobre su desarrollo en Alemania [5], en el año de 1982 a raíz de la patente EP0045921 de la comunidad europea (figura 4), en la cual se reporta que el reflector y el absorbedor se ubican dentro de una paraboloide rotada 45° respecto al eje principal que proporciona la ubicación del absorbedor fijo, además menciona que emplea espejos de peso ligero contruidos con lámina y cuya aplicación inicial fue la generación de vapor.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

⑬  **Europäisches Patentamt**
European Patent Office
Office européen des brevets

⑪ Veröffentlichungsnummer: **0 045 921**
A1

⑫ **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

⑲ Anmeldenummer: 81106047.4
⑳ Anmeldetag: 01.08.81

⑤① Int. Cl.³: **F 24 J 3/02**
G 02 B 5/10

③① Priorität: 08.08.80 DE 3030033	⑦① Anmelder: Bomin-Solar GmbH & Co KG Industriestrasse 8 D-7850 Lörrach(DE)
④③ Veröffentlichungstag der Anmeldung: 17.02.82 Patentblatt 82/7	⑦② Erfinder: Kleinwächter, Johann, Prof. Dr. Ing. Industriestrasse 8 D-7850 Lörrach(DE)
④④ Benannte Vertragsstaaten: AT BE CH DE FR GB IT LI LU NL SE	⑦④ Vertreter: Beil, Walter, Dr. et al. BEIL, WOLFF & BEIL Rechtsanwälte Adelonstrasse 58 D-6230 Frankfurt am Main 80(DE)

Figura 4.- Patente de concentrador solar de Bomin-solar GmbH & CoKG (Fuente: Patente EP0045921, 1982).

La aplicación de ésta tecnología para la generación de electricidad por medio de motores Stirling es reportada por William [6] en el año de 1992, para ello se le hacen algunas modificaciones a los espejos, estructura y superficie de reflexión, mediante la incorporación de 6 membranas formadas por láminas al vacío, que son abatibles para vientos fuertes, además de la incorporación de rieles que guían el movimiento del reflector como se muestra en la figura 5. De acuerdo con William [6] se tiene reporte que solamente se construyeron 3 equipos. Debido a que estos concentradores se remplazaron por concentradores de disco parabólico, al presentar mejores eficiencia en la generación de electricidad con motores Stirling [7].



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

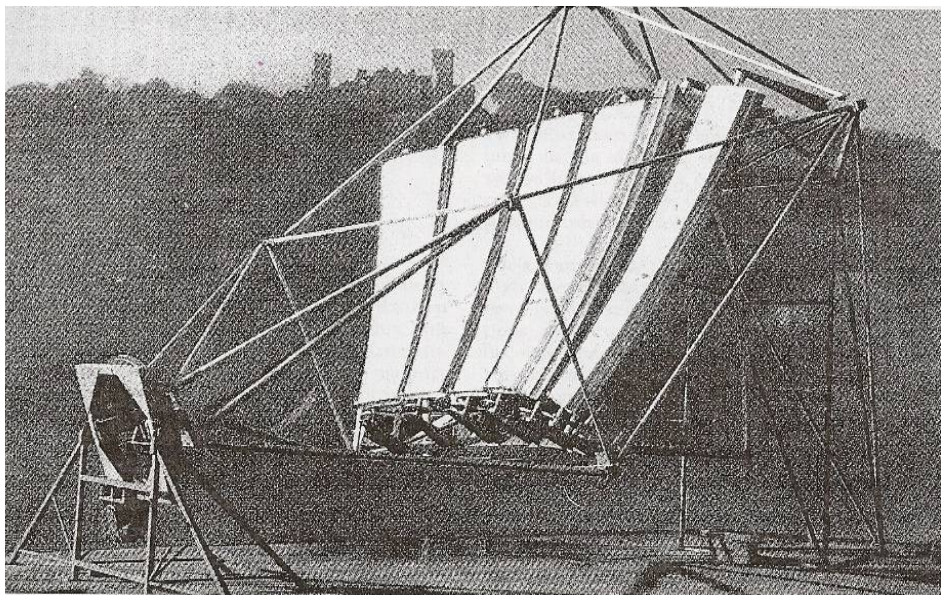


Figura 5.- Concentrador solar HTC (Fuente: Winter, 2009).

1.3.3 Tecnología del reflector Scheffler

La idea básica que condujo al desarrollo del reflector solar Scheffler [7], fue hacer que el cocinar con la energía del sol se convirtiera en lo más cómodo posible. Al mismo tiempo, el aparato debía estar construido de tal forma, que pudiera ser elaborado en cualquier taller de soldadura rural. En base a lo anterior se ideó que para mantener el foco fijo y en el interior de la vivienda era necesario tomar de una sección de parábola donde el foco de la parábola completa estuviera en el interior de una vivienda, como se muestra en la figura 6.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

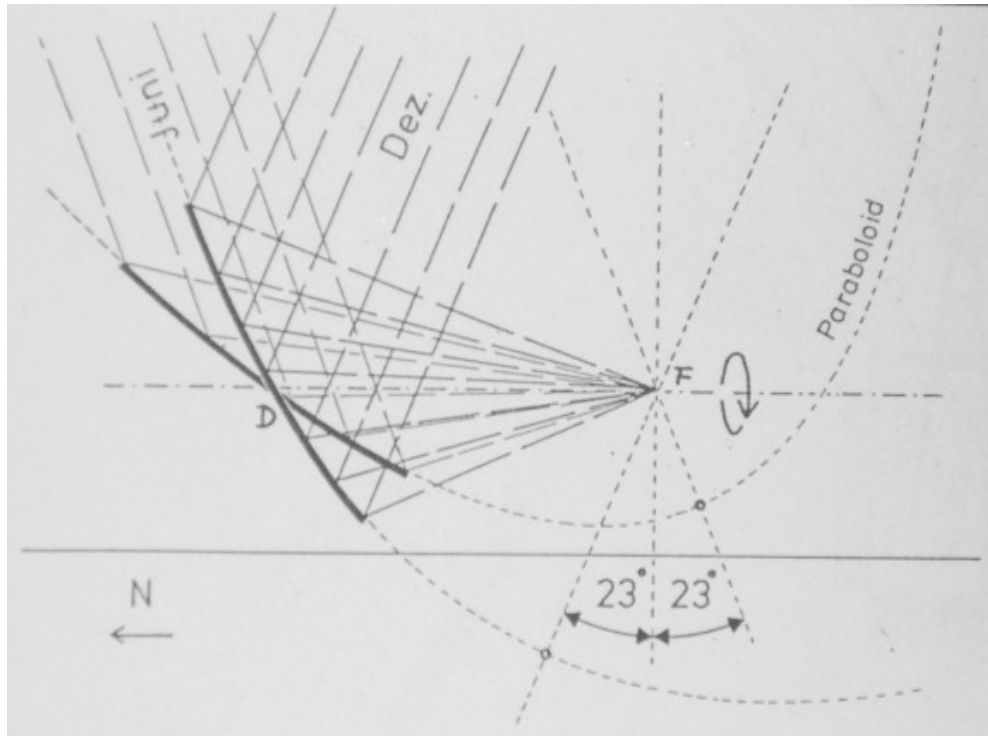


Figura 6.- Idea básica del reflector Scheffler (Scheffler 2006).

En la figura 7 se muestra el aspecto físico del concentrador Scheffler como fuente de calor para una pequeña cocina comunitaria en India [8], sin embargo a este concentrador se le han asignado diversas aplicaciones, como es el caso reportado por Munir y Hensel [9] como fuente de calor para extraer aceite, el reportado por Chandak y Somani [10] en una aplicación de destilador y el caso reportado por Michael Tyroller [11] en donde se emplea a este concentrador como fuente de calor para un esterilizador en un hospital rural.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO



Figura 7.- Foto de un concentrador solar Scheffler (Fuente: Scheffler, 2006).

De acuerdo con las características de las tecnologías mencionadas anteriormente, presentan características que las vuelven inadecuadas para ser aplicadas en el diseño de un Concentrador Solar de Foco Fijo (CSFF) acoplado a un motor Stirling de 3 kW. Es por eso que con la finalidad de suprimir los inconvenientes que presentan los concentradores solares puntuales de foco fijo, se plantea el desarrollo de un nuevo CSFF que presente mejoras significativas respecto a la eficiencia y operación de los sistemas de concentración solar puntual.



1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Desarrollar teórica y experimentalmente un concentrador solar que proporcione la energía térmica requerida por un motor Stirling en posición fija, para generar 3 Kw eléctricos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar un modelado matemático que permita simular y diseñar el concentrador y sus componentes.
- Crear un prototipo experimental con tecnología patentable, que nos permita catalizar la transferencia de tecnología.
- Generar nuevos conocimientos con un fin práctico, que planteen alternativas tecnológicas innovadoras para solucionar los problemas de generación de electricidad empleando concentración solar.

1.5. Hipótesis

Con base en las investigaciones realizadas por Prakash et al. [2] y Fracer [12] el diseño de un sistema de generación eléctrica que emplee motores Stirling con orientación fija y ángulos de inclinación entre el motor Stirling y el reflector cercanos a los 90°, permite reducir las pérdidas térmicas por convección e incrementa la eficiencia en la conversión de energía solar a eléctrica. Por lo anterior la hipótesis de trabajo es:

“Es posible desarrollar un sistema de concentración solar, que permita mantener fijo el motor Stirling y que presente ventajas respecto a los sistemas de concentración solar de disco parabólico”



1.6. Actividades de cada autor en las publicaciones presentadas

1.6.1. Artículo: “A mathematical model to develop a Scheffler-type solar concentrator coupled with a Stirling engine” Journal of Energy Applied, ISSN: 0306-2619. IF. 5.106. (Indexed in: Scopus, Elsevier, Chemical Abstracts, Open J-Gate, Genamics JournalSeek, MediaFinder®-Standard, DOI information: 10.1016/j.apenergy.2012.05.040)

Autor	Responsabilidad
José Ruelas	Planteamiento del modelo matemático, estudio de simulación e interpretación de resultados.
Nicolás Velázquez	Director de tesis, asesor en el planteamiento del modelo matemático, estudio de simulación y discusión de resultados
Jesus Cerezo	Asesor en presentación de la información.

1.6.2. Artículo: “Diseño de un concentrador solar acoplado a un motor Stirling fijo” Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo Vol. 4 No. 1, 015-022, ISSN 1665-7381. (Indexado por: CONACYT, SciELO, Redalyc, Latindex, Periódica)

Autor	Responsabilidad
José Ruelas	Planteamiento del modelo matemático de ambos concentradores solares, estudio de simulación y análisis de resultados.
Nicolás Velázquez	Director de tesis, asesor en el planteamiento del modelo matemático y la discusión de resultados.
Ricardo Beltran	Asesor en el análisis de la información



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

1.6.3. Artículo: “Estudio comparativo entre un concentrador solar continuo y uno segmentado”, Entorno Académico. Vol 9. ISSN: 1870-5316.

Autor	Responsabilidad
José Ruelas	Planteamiento del modelo de trazado de rayos, estudio de simulación e interpretación de resultados.
Nicolás Velázquez	Director de tesis, asesor en el planteamiento del trazado de rayos, estudio de simulación y discusión de resultados
Ricardo Beltrán	Asesor en el análisis de la información.

1.6.4. Solicitud de patente: “Concentrador solar de foco fijo para múltiples aplicaciones” Expediente en trámite.

Autor	Responsabilidad
José Ruelas	Elaboración de la propuesta del concentrador solar, estudio de simulación e interpretación de resultados
Nicolás Velázquez	Asesor en la elaboración de la propuesta y discusión de resultados.



CAPÍTULO 2. PRESENTACIÓN DE LOS ESTUDIOS

Los métodos, resultados y conclusiones de este estudio son presentados en los artículos y solicitud de patente contenidos en los anexos de esta disertación. En este capítulo se presenta un resumen de las contribuciones más importantes de esta investigación así como las principales aportaciones.

2.1. A mathematical model to develop a Scheffler-type solar concentrator coupled with a Stirling engine. (Revista: Journal Applied Energy. ISSN: 0306-2619. IF. 5.106)

Resumen: En este artículo se desarrolla y aplica un nuevo modelo matemático para estimar el factor de interceptación de un Concentrador Solar Tipo Scheffler (CSTS), basado en el



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

comportamiento geométrico y óptico del concentrador en coordenadas cartesianas e incorporando el modelo térmico del receptor, se llevan a cabo exploraciones numéricas para determinar la viabilidad técnica de operar un motor Stirling fijo de 3 kWe. La validación numérica del modelo matemático se determina mediante la comparación de resultados experimentales reportados para el concentrador de WGA500 por [13] y el receptor del sistema CNRS-PROMES [14]. Los resultados numéricos permiten el diseñar y dimensionar el CSTS. Encontrando que la concentración más alta se obtuvo con un ángulo de borde de 45 grados, al igual que el concentrador solar de disco parabólico, a diferencia de que el receptor CSTS muestra un incremento de 7% en la eficiencia térmica.

Aportaciones: al llevar a cabo el modelado matemático del concentrador solar tipo Scheffler

Se generaron las siguientes aportaciones:

- Un modelo matemático que permite dimensionar un concentrador solar tipo Scheffler de acuerdo a los requerimiento de calidad y cantidad de energía.
- Una ecuación para calcular el factor de interceptación tanto en concentradores solares tipo Scheffler como de disco parabólico.
- Se estableció que el modelo matemático predice de manera adecuada el comportamiento óptico térmico del concentrador solar de foco fijo de acuerdo a los resultados de validación.
- Comparación del concentradores solares tipo Scheffler respecto a un concentrador solar de disco parabólico.
- Un concentrador solar tipo Scheffler con características que mejoran la eficiencia respecto a un concentrador solar de disco parabólico.



2.2. Diseño de un concentrador solar acoplado a un motor Stirling

fijo. (Revista: Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo, ISSN: 0306-2619)

Resumen: En el presente trabajo se desarrolla y aplica un nuevo modelo geométrico de un Concentrador Solar de Foco Fijo (CSFF) en coordenadas cartesianas, al cual se le incorpora el modelo térmico de un receptor de cavidad para determinar las dimensiones de diseño del CSFF, con el propósito de satisfacer la demanda de energía térmica de un motor Stirling de 3 kWe. La validación del modelo propuesto se realiza a partir de resultados experimentales, utilizando la información reportada sobre el concentrador WGA500 [13] y receptor del sistema CNRS-PROMES [14]. Los resultados del estudio paramétrico proporcionan las dimensiones de diseño del CSFF, que de manera semejante al concentrador de disco parabólico, la mayor concentración se obtiene con un ángulo de borde de 45° , pero con la diferencia de que el receptor de cavidad se encuentra con una inclinación 80.7° en posición fija, obteniéndose una eficiencia térmica de dicho receptor del 88%.

El modelo matemático y metodología propuesta pueden ser utilizados para diseñar CSFF acoplados a receptores de cavidad para aplicaciones distintas al motor Stirling, solo ajustando los parámetros de diseño y condiciones de operación según los requerimientos de la nueva aplicación.

Aportaciones: al llevar a cabo el estudio sobre el diseño del concentrador solar de foco fijo se generaron las siguientes aportaciones:

- Un algoritmo que establece la secuencia de solución del modelo matemático.
- Un algoritmo que establece la secuencia de exploración para dimensionar a un concentrador solar de foco fijo que satisface la cantidad y calidad de energía para un motor Stirling de 3 kWe en la región de Mexicali.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

- Esquemas para determinar las características geométricas respecto a la posición y dimensiones del receptor del concentrador solar de foco fijo.
- Las dimensiones del concentrador solar de foco fijo satisface la cantidad y calidad de energía que demanda un motor Stirling de 3 kWe en la región de Mexicali.
- Incremento en la eficiencia del receptor del disco parabólico de 81% a 88% del receptor del concentrador solar de foco fijo, debido a que la inclinación de la cavidad receptora favorece la disminución de las pérdidas térmicas.
- Mejoras en cuanto a la operación del concentrador debido a que se obtienen altas eficiencias a pesar de operar con errores de concentración de 12 mrad.

2.3. Estudio comparativo entre un concentrador solar continuo y uno segmentado. Revista: Entorno Académico. ISSN: 1870-5316.

Resumen: El presente artículo se refiere al estudio comparativo entre las superficies de un reflector continuo y uno segmentado de un Concentrador Solar Tipo Scheffler (CSTS), cuyas dimensiones de reflector y receptor están dadas de acuerdo a la demanda térmica de un motor Stirling de 2.75 kWe. La comparación se realiza con el fin de conocer la distribución de los rayos en el receptor. El primer caso se refiere a una superficie de reflector construido con segmentos circulares de 0.05 m y en segundo caso por un reflector de superficie continua ideal, para ello se desarrolla y aplica una metodología de diseño óptico asistido por computadora (CAD) con el objetivo de obtener modelos de simulación por computadora que permitan establecer las características del sistema de concentración. Los resultados obtenidos muestran que es factible emplear superficies de reflector con segmentos menores a los 0.05 m, que a diferencia del reflector continuo, éste permite tener errores de seguimiento de hasta 2 grados.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

Aportaciones: mediante el estudio realizado se encontró que:

- Ambos casos estudiados proporcionan la concentración de rayos requerida en una área de apertura de diámetro de 30 cm, para el motor Stirling en cualquier fecha del año, pero con una concentración diferente, de lo que se infiere que conviene emplear un CSTS con geometría lo más continua posible.
- Para el primer caso (reflector construido con segmentos circulares), la imagen que se obtiene en el absorbedor se comporta como un abanico que incrementa su tamaño, debido a la orientación del reflector, y el tamaño de la dispersión en forma de abanico, varía de acuerdo con la orientación del colector, pues los rayos reflejados tienen que viajar mayores distancias, incrementando la dispersión de la imagen en el receptor.
- Ambos tipos CSTS requieren que el reflector tenga seguimiento de forma continua que garantice la incidencia normal de los rayos. Sin embargo para el segundo caso (reflector continuo) permite errores de seguimiento mayores debido a la concentración puntual en el área del receptor.
- En un CSTS de geometría continua y seguimiento en 2 ejes, se puede emplear la geometría del área de apertura que más convenga para reducir las pérdidas térmicas sin afectar la concentración.
- Las herramientas de CAD en interacción con software de simulación óptica permiten conocer el comportamiento del sistema de concentración solar y evaluar el reflector en un periodo corto de tiempo, antes de ser diseñado.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

2.4. Concentrador solar puntual de foco fijo para múltiples propósitos.

Solicitud de patente, Expediente en trámite.

Resumen: La presente solicitud de patente se refiere a un captador, concentrador de la radiación solar, que por medio de una superficie reflejante y un mecanismo de seguimiento, dirige la radiación captada a un receptor fijo con mejoras en eficiencia y operación respecto a otros concentradores, además permite incorporar un sistema de fuego directo, para proporcionar la energía térmica a un motor Stirling. El novedoso concentrador solar es una excelente opción para los sistemas de generación de vapor solar, destilación solar, fundición de aluminio y generación eléctrica con motores Stirling. Tiene características técnicas muy recomendables para satisfacer las diferentes necesidades de energía térmica de alta temperatura (más 250 °C) de los sectores residencial, comercial, industrial, ganadero, agrícola y energético.

Aportaciones: Mediante la presentación de ésta solicitud de patente, se busca:

- Contribuir al desarrollo de tecnología propia del país al generar conocimiento en el área de las energías renovables, planteando alternativas tecnológicas innovadoras a los problemas de uso y generación de energía.
- Equipar con una planta piloto de generación eléctrica por medio de energía solar, al Centro de Estudios de las Energías Renovables del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.
- Contribuir al mejoramiento del medio ambiente mediante el desarrollo de propuesta de tecnologías limpias para el aprovechamiento de energía solar en la generación de electricidad, sin descartar otras aplicaciones.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. J. Winter, R. Sizmann, L. Vant-Hull, Solar Power Plants - Fundamentals, Technology, Systems, Economics. Springer-Verlag, Berlin, 1991. pp 225 275.
- [2] M. Prakash, S.B. Kedare, J.K Nayak, Determination of stagnation and convective zones in a solar cavity receiver, International Journal of Thermal Sciences 49 (2010) 680-691.
- [3] Cabanillas L. "Perspectivas de la tecnología de concertación solar en México (torres centrales)", IV coloquio de la Academia de ingeniería, MEXICO DF , 2008.
- [4] Gregory J. Kolb, 2007, "Heliostat Cost Reduction Study", Inventaire des instruments scientifiques, SANDIA NAT. LAB., SAND 2007-329. J 2007
- [5] Bomin-solar GmbH& CoKG, Concentrador solar de foco fijo, European Patent Application EP0045921, Alemania 1982.
- [6] William B. Stine "A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology ", Mechanical Engineering California State Polytechnic Univer SAND93-7026 UC-236 1994.
- [7] Scheffler , Solar distillation for essential oils extraction a decentralized approach for rural development, International Solar Food Processing Conference, India 2009.
- [8] A. Munir, O. Hensel, W. Scheffler, Design principle and calculations of a Scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications, Solar Energy 84 (2010) 1490-1502.
- [9] Munir A, Hensel O, Solar distillation for essential oils extraction a decentralized approach for rural development, International Solar Food Processing Conference, India 2009.
- [10] Chandak A y Somani S, Design of multistage evaporators for integrating with Scheffler Solar concentrators for food processing applications, International Solar Food Processing Conference, India, 2009.
- [11] Michael Tyroller, Solar Steam Sterilizer For Rural Hospitals, Solar Bruecke Alemania 2006.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

- [12] Fraser P. Stirling Dish System Performance And Prediction Model A Thesis Master Of Science University Of Wisconsin-Madison, 2008
- [13] Diver R. B., Andraka C. E., Scott R. K., Goldberg V., Thomas G., The advanced dish development system project, Proceedings of Solar Forum 2001, Solar Energy, The Power to Choose, 2001.
- [14] Reinalter, W., Ulmer, S., Heller, P., Rauch, T., Gineste, J.-M., Ferriere, A., Nepveu, F., Detailed performance analysis of the 10 kW CNRS-PROMES dish/Stirling system. Proceedings of the 13th SolarPACES International Symposium, 2006.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

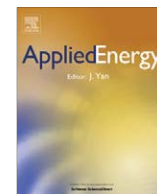
ANEXO 1

“A mathematical model to develop a Scheffler-type solar concentrator coupled with a Stirling”, Journal of Applied Energy. ISSN: 0306-2619. IF. 5.106. (Indexed in: SciVerse ScienceDirect, Scopus, Elsevier, DOI information: 10.1016/j.apenergy.2012.05.040)



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Applied Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy

A mathematical model to develop a Scheffler-type solar concentrator coupled with a Stirling engine

José Ruelas^{a,*}, Nicolás Velázquez^b, Jesús Cerezo^b

^a Department of Mechanical Engineering, Instituto Tecnológico Superior de Cajeme, Cd. Obregón Sonora, Mexico

^b Center for Study of Renewable Energy, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali Baja California, Mexico

HIGHLIGHTS

- Mathematical model to develop a Scheffler-type solar concentrator.
- Equation to estimate the intercept factor.
- Comparisons between the parabolic dish and a Scheffler-type solar concentrator.
- Proposed Scheffler-type solar concentrator with advantages over parabolic dish concentrator.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 December 2011

Received in revised form 9 May 2012

Accepted 25 May 2012

Available online xxx

Keywords:

Solar energy

Stirling engine

Intercept factor

Parabolic dish

Scheffler concentrator

Mathematical model

ABSTRACT

This study develops and applies a new mathematical model for estimating the intercept factor of a Scheffler-type solar concentrator (STSC) based on the geometric and optical behaviour of the concentrator in Cartesian coordinates, and the incorporation of a thermal model of the receptor is performed using numerical examinations to determine the technical feasibility of attaching the STSC to a 3 kWe Stirling engine. A numerical validation of the mathematical model is determined based on the experimental results reported for the WGA500 concentrator and the CNRS-PROMES system receiver. The numerical results allow for the design of the STSC and a comparison with a parabolic dish that provides the same thermal demand. Our findings show that the highest concentration was obtained with an edge angle of 45°, which was observed in the parabolic dish as well, but the STSC receiver shows a 7% increase in the thermal efficiency compared with the efficiency of the parabolic dish receiver. Finally, the STSC is appropriate for regions where the solar height allows for a reduction of convective thermal loss.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

When generating electricity using alternative energy sources, it is appealing to incorporate technologies that concentrate solar thermal energy, such as heliostats, parabolic troughs and parabolic dishes connected to a Stirling engine [1]. The latest solar thermal technologies have high costs of installation, operation and maintenance and a decreased solar energy-to-electricity conversion efficiency [2]. Having a Stirling engine at the focal point of a parabolic dish decreases the effects of this efficiency problem by incorporating a solar concentrator with a fixed focal point. Scheffler developed a solar concentrator for solar cookers that are fixed inside the house [3]. This concentrator also has other applications, such as oil extraction [4], distillation [5] and sterilisation applications [6]. To incorporate this technology to generate electricity using Stirling engines, it is necessary to make some adjustments,

such as incorporating an azimuth axis that tracks the solar height and form continuously and incorporates the reflector surface with the least amount of imperfections, which is motivated by a study of ray tracing [7].

Different mathematical models have been developed using various mathematical tools and software to optimise the design of assembly systems. The model proposed by Harris and Lenz [8] analysed the thermal behaviour of a parabolic dish concentrator that used the view factor to estimate the amount of radiation reaching the receiver cavity in cylindrical, conical, elliptical and spherical receivers. Additional results for various concentrator geometrical shapes have been provided in Badescu [9]. Shuai et al. [10] used the Monte Carlo method to determine the performance of the radiation concentrated by a parabolic dish receiver for various geometries. Kumar and Reddy [11] presented a software implementation of a CFD (computational fluid dynamics) study to determine the optimal size of the aperture opening area of a spherical cavity coupled to a parabolic dish, which depends on the item's minimum convection. Chin-Hsiang and Hang-Suin [12] presented a study to

* Corresponding author. Tel.: +52 644 4108650; fax: +52 644 4108651.

E-mail address: jose.ruelas@uabc.edu.mx (J. Ruelas).

Nomenclature

A	area (m^2)
a	normal distribution segment (–)
b	constant approximation to normal distribution (–)
C_{geo}	geometric concentration (–)
d	diameter (m)
f	focal length (m)
Gr	Grashof number (–)
h	convective heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
I	direct solar irradiance (W/m^2)
K	fluid Thermal Conductivity ($\text{W}/(\text{m K})$)
L	thickness length (m)
p	distance from concentrator surface to focal point (m)
Pr	Prandtl number (–)
n	number of segment reflectors (–)
Nu	Nusselt number (–)
Q	energy flux density (W/m^2)
r	radius (m)
Ra	Rayleigh number (–)
Re	Reynolds number (–)
Sp	spacing (m)
S	separation (m)
T	temperature (K)
t	normal distribution variable (–)
w	width of the focal image (m)

Greek symbols

α_{eff}	effective absorbance of the cavity
ε	subtended angle of the sun
ε^*	emissivity

σ	standard deviation (mrad)
σ^*	Stefan–Boltzmann constant
η	efficiency (–)
ρ	surface reflectance (–)
φ	intercept factor (–)
θ	inclination angle of the cavity ($^\circ$)
v	wind speed (m/s)
ψ	rim angle ($^\circ$)

Subscripts

abs	absorber
amb	ambient
ap	aperture
ins	insulator
$cond$	conduction
$conv$	convection
cav	cavity
for	forced
Eff	effective
ext	outside
int	inside
rad	radiation
ref	reflector
rec	receiver
nat	natural
tub	pipe

optimise geometrical parameters for Stirling engines based on a theoretical analysis. Nepveu et al. [13] presented a model for a parabolic dish concentrator, known as a Eurodish, coupled to a 10 kW Stirling engine.

Halit et al. [14] presented an experimental study on the development of a beta-type Stirling engine for low and moderate temperature heat. Fraser [15] presented a model to estimate the performance of an Alpha-type Stirling engine, and the energy that is transmitted to the receiver is calculated by the equation proposed by Duffie and Beckman [16].

This equation states that the energy concentrated in the receiver of a solar concentrator is directly proportional to the direct radiation, the aperture opening area of the reflector, reflectivity and intercept factor. The latter concept is particularly useful in establishing the dimensions of the concentrator because reducing the receiver aperture opening diameter as a percentage of the solar image and incorporating the thermal model of the receptor defines the dimensions of the receiver for minimum heat loss.

There are different models available to estimate the intercept factor; Jaffe [17] and Badescu [18] presented a model that involves optical, thermal and conversion aspects of energy to optimise the dimensions of the parabolic dish concentrator. Romero [19] developed software for Sandia Laboratories that determined the energy that is intercepted by the circular or rectangular segments of a parabolic dish, which involves the optical aspects of the concentrator. Fraser [15] and Badescu [20] provided the results that are the most appropriate for parabolic dish concentrators that are coupled to a Stirling engine for different capacities. The models proposed by Badescu [21], Stine and Harrigan [22] considered both the influence of varying the receiver aperture opening diameter, which depends on the rim angle and height of the focal point, as well as the standard deviation of the errors caused by the geometrical factors and the optical concentration system.

After reviewing the literature, it was determined that no other previous model can be applied directly to evaluate the performance of an STSC because these models do not incorporate the geometric model of the STSC; therefore, in this study, a new mathematical model for an STSC coupled to a cavity receiver of a Stirling engine is presented. An analysis of the performance is carried out to compare an STSC and a parabolic dish to determine the technical viability of using this technology.

1.1. Description of an STSC

An STSC is the result of the interception of the open circular area with a small side section of a parabola, and this directs the solar radiation to a fixed focal point where a Stirling engine is installed and secured by a fixed support structure. It used a 2-axis tracking system, which consists of a daily tracking mechanism that moves the reflector mounted on a carriage in proportion to solar and other time-tracking mechanisms, which provides for rotation of the reflector that is synchronised with the movement of the sun during the day. This angular movement of the reflector is made around an axis oriented to maintain a fixed focal point normal to the incidence of the aperture opening area of the reflector, thus concentrating the solar radiation in the cavity that receives and heats a gas (helium, hydrogen or air) at high temperatures [23]. Later, the Stirling engine converts the heat into electricity, as observed in Fig. 1.

2. Materials and methods**2.1. Mathematical model**

In this section, the mathematical model for attaching an STSC to a Stirling engine is developed using the mathematical estimation of

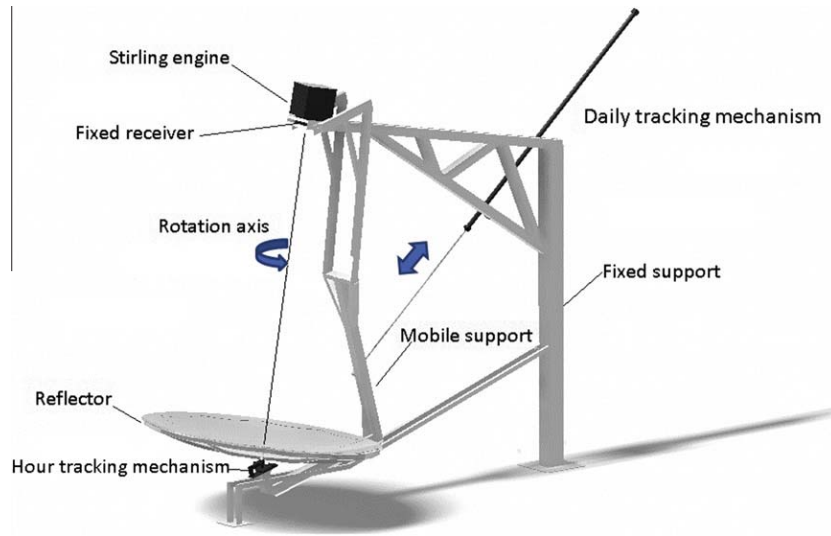


Fig. 1. STSC schematic.

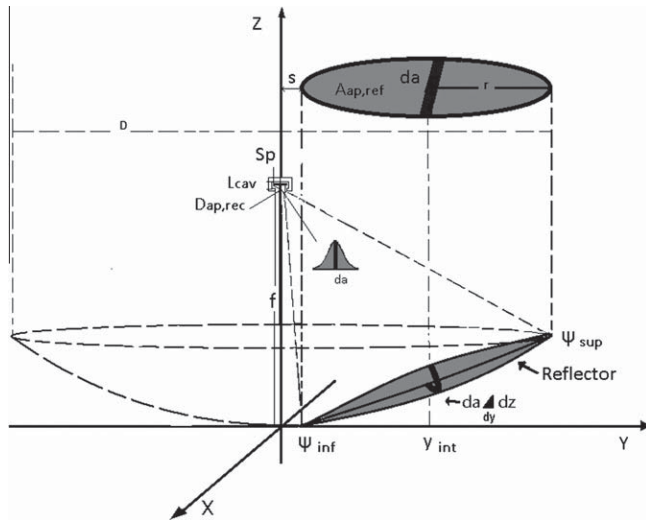


Fig. 2. Geometric scheme of an STSC.

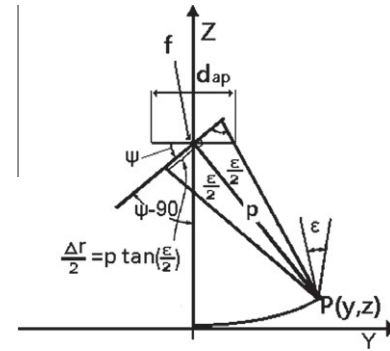


Fig. 3. Scheme of the solar image in the focal plane.

the intercept factor for an STSC, which considers the optical and geometric models and incorporates the thermal model of a cavity receiver in accordance with the following considerations: the distribution of the solar image at the focal point corresponds to a normal distribution; the temperature inside the receiving cavity is evenly distributed; the heat transfer analysis is performed under stable conditions and is one-dimensional; the material properties remain constant; and the mathematical model begins by using Eq. (1), described by Duffie and Beckman [16], which estimates the amount of energy captured by a cavity receiver.

$$Q_{rec} = I_d A_{ap,ref} \rho \varphi \quad (1)$$

In Eq. (1), all of the terms are known, except for the intercept factor of the STSC, which is necessary to consider the geometric model of the STSC. Eq. (2) corresponds to the estimation of the intercept factor, and the total energy incident on the reflector (denominator) is easily established by substituting the value of the direct radiation and the aperture opening area. However, to determine the amount of energy intercepted (numerator), it is necessary to develop the

terms of the numerator, which involve the geometric and optical models of the STSC.

$$\varphi = \frac{\int_{-n}^{+n} I(a) da}{\int_{-a}^{+a} I(a) da} \quad (2)$$

2.1.1. Geometric model

To develop the STSC model, we propose the integration of the geometric model, which corresponds to the intercept of a circular area with a virtual parabola, as shown in Fig. 2. In this geometrical model, it is necessary to specify the height of the virtual parabola, the coordinates of the centre of the circular area and the radius. This model moves the intercept point along the y-axis, which can be applied to parabolic concentrators, shifting the intercept point to the origin. The limits of the reflector are given on the y-axis and are delimited by $(y_{int} \pm r)$. Finally, the black-shaded section represents the differential area increase or the reflector segment, which corresponds to the area under the normal distribution curve of the solar image (i.e., the focal point).

The STSC geometric model is obtained by applying the surface integral for the interception of the two solids [24] and the total energy intercept, as observed in Eq. (3).

$$\int_{-n}^{+n} I(a) da = \int_n \int_{(R)} I(A) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy \quad (3)$$

Table 1

Comparison between the mathematical model and the experimental results.

Date of test	Mathematical model		Experimental CNRS	
	Value (kW)	Variation (%)	Value (kW)	Measurement
Intercepted energy	37.75	3.1	37.75	Reference value
Radiation losses	1.4	±25	1.71	In the range
Lost radiation emitted	2.59	±16	2.39	In the range
Convection losses	2.13	±50	1.98	In the range
Heat entering the motor	31.63	±4.3	31.67	In the range

To develop Eq. (3), it is necessary to define the equation of the parabola in Cartesian space, as observed in Eq. (4).

$$z = \frac{x^2}{4f} + \frac{y^2}{4f} \quad (4)$$

It is also necessary to define the equation of a cylinder in Cartesian space; Eq. (5) is used to delimit the area intercepted.

$$(x - 0)^2 + (y - y_{\text{int}})^2 = r^2 \quad (5)$$

By substituting Eq. (4) and Eq. (5) into Eq. (3), we obtain the differential area that can be assessed within the limits of the intercept of the parabola, and using the definition summation to replace the integral, we obtain the geometric model integration of the STSC, Eq. (6), which can be solved using an iterative method.

$$\int_{-n(y)}^{+n(y)} I(a) da = \sum_{y_{\text{int}}-r}^{y_{\text{int}}+r} I(a) \sqrt{k_1 y + k_2} \times \sqrt{r^2 y + 2y_{\text{int}} y - y_{\text{int}}^2 - r^2 y_{\text{int}} - y^2} \quad (6)$$

where $k_2 = \frac{4h^2 - y_{\text{int}}^2 - r^2 y_{\text{int}}}{4f^2}$ and $k_1 = \frac{(2y_{\text{int}} + r^2)}{4f^2}$

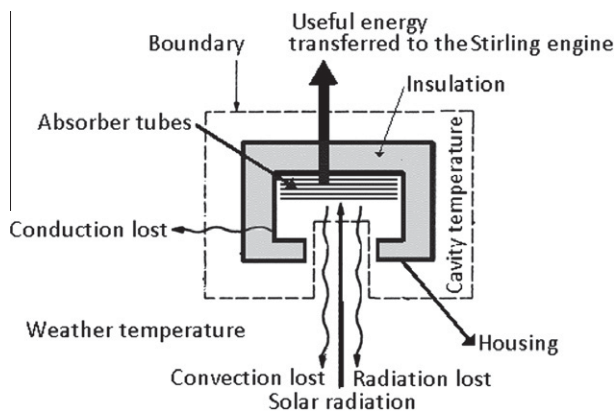
2.1.2. Optical model

To integrate the optical model [22] to Cartesian coordinates, as observed in Fig. 3, the variable $I(a)$ is replaced by the solar image in the function for the coordinates of the y -axis.

Eq. (7) involves the trigonometric and optical aspects of the solar image at the focal point and considers the statistical aspects that are due to the characteristics of the concentrator system components.

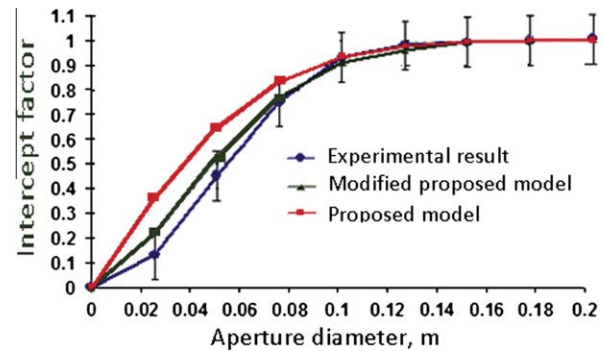
$$n(y) = \frac{2}{\sigma_{\text{tot}}} \tan^{-1} \left(\frac{d_{\text{ap}} \cos \psi}{2p} \right) \quad (7)$$

where $p = \sqrt{y^2 + (f - z)^2}$, is the normal distance from the reflector to the focal point, $\psi = \tan^{-1} \left(\frac{y}{f - z} \right)$, is the rim angle of the reflector

**Fig. 4.** Heat transfer in the cavity of the receptor.**Table 2**

STSC design parameters.

Design parameters		Operating conditions	
Number of absorber tubes	32	Direct solar radiation	900 W/m ²
Outside diameter of the tubes	0.63 cm	Air velocity	2.3 m/s
Material absorber tubes	SS 316	Ambient temperature	315 K
Absorber area	$6.44 \times 10^{-2} \text{ m}^2$	Solar maximum altitude	80.7°
Reflectance of the reflector	0.92	Fluid temperature	929 K
Insulation conductivity	0.042 W/(m K)	Heat transfer to fluid	8423 W
Insulation thickness	0.075 m	Total error	12 mrad

**Fig. 5.** Comparison of the proposed model, the modified proposed model and the experimental results.

$z = \frac{y^2}{4f}$, is the z -axis coordinate for the y -axis, and $\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{(2\sigma_{\text{structure}})^2 + \sigma_{\text{sensor}}^2 + \sigma_{\text{drive}}^2 + \sigma_{\text{alignment}}^2 + (2\sigma_{\text{refl}})^2 + \sigma_{\text{sun}}^2}$, is the standard deviation of all the errors in the terms of the characteristics of the concentrator.

The normal distribution of the radiation at the focal point Eq. (8) is given by Abramowitz and Stegun [25]; however, there are more exact descriptions of the error distribution [21]. It is not necessary to include additional parameters that are not included in the present study. When considering the STSC, the maximum error of the approximation of the polynomial $I(a)$ is a continuous function $z(x)$, unlike the model proposed by Stine and Harrigan [22].

$$I(a) = 1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{n(y)^2}{2}} (b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5) + 2\text{res} \quad (8)$$

The intercept factor for the STSC is obtained by substituting the results of geometric, statistical and optical models, which depend on the variables of the dimensions and characteristics of the solar concentrator, as observed in Eq. (9).

$$\varphi = \frac{\sum_{y_{int}-r}^{y_{int}+r} I_d \left(1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{n(y)^2}{8}} (b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5) + 2res \right) \left(\sqrt{k_1 y + k_2} \sqrt{r^2 y + 2y_{int} y - y_{int}^2 - r^2 y_{int} - y^2} \right)}{I_d (\pi r^2)} \quad (9)$$

Allowing Eq. (9) to represent the geometry of a parabolic dish concentrator located at the origin ($y_{int} = 0$), the intercept factor for a parabolic dish concentrator in Cartesian coordinates is given by Eq. (10).

$$\varphi = \frac{\sum_0^{y_{int}+r} I_d \left(1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{n(y)^2}{8}} (b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5) + 2res \right) \left(\sqrt{k_1 y + k_2} \sqrt{r^2 y + 2y_{int} y - y_{int}^2 - r^2 y_{int} - y^2} \right)}{I_d (\pi r^2)} \quad (10)$$

2.1.3. Receiver thermal model

The receiver model was recently proposed by Fraser [15] and is obtained from the thermal analysis of a circular open cavity receiver with a flat absorber and thermal insulation in the walls. In this model, the receiver takes the energy from the reflector, and after

being affected by heat loss, the fluid is transferred to a Stirling engine that works through a cylindrical tube absorber plane, as shown in Fig. 4. This model assumes that the solar energy distribu-

tion is uniform in the cavity, that the optical and thermal properties of the receptor remain constant and that the thermal losses that occur in the cavity are due to the temperature difference between the cavity and the environment. The radiation and convection losses are due to the receiver aperture area and conduction

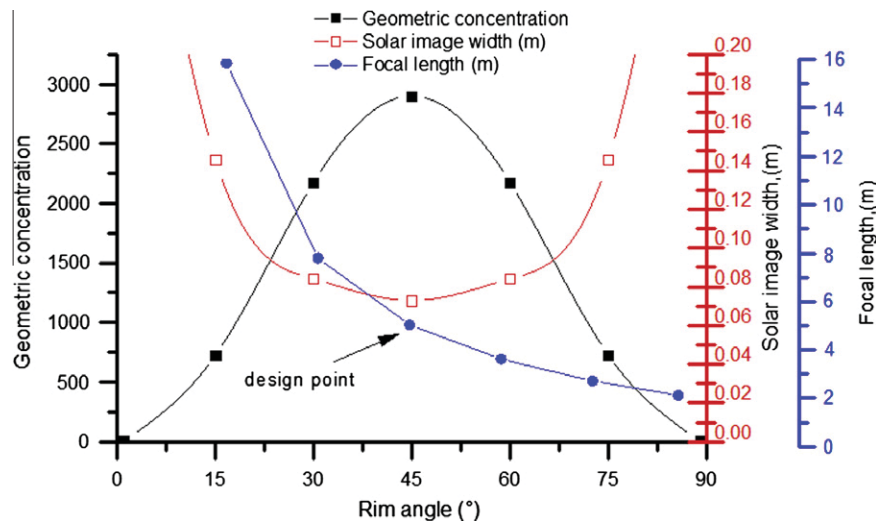


Fig. 6. Experimental determination of the focal length.

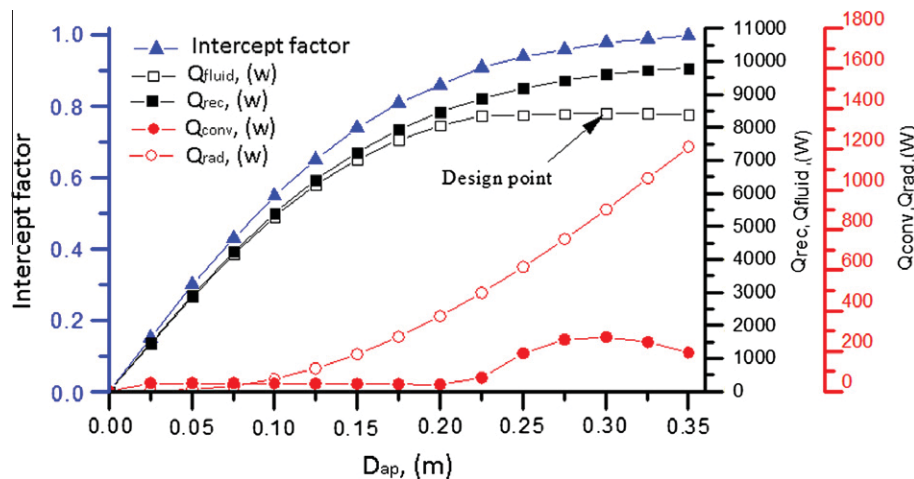


Fig. 7. Experimental determination of the receiver aperture opening diameter.

losses, which are transferred to the inner walls of the cavity, to the exterior walls and finally to the atmosphere by convection.

The mathematical model of the receiver achieves an energy balance, as shown in Eq. (11).

$$Q_{cav} = Q_{rec} - Q_{rad,ref} - Q_{rad,emi} - Q_{conv,nat} - Q_{conv,for} - Q_{cond,conv} \quad (11)$$

The heat loss by the reflected radiation is given by Eq. (12).

$$Q_{rad,ref} = (1 - \alpha_{eff}) Q_{rec} \quad (12)$$

where $(1 - \alpha_{eff})$ is the effective reflectance, shown in Eq. (13), of the cavity given by Duffie and Beckman [16].

$$\alpha_{eff} = \left(\frac{\alpha_{cav}}{\alpha_{cav} + (1 - \alpha_{cav}) \left(\frac{A_{ap,cav}}{A_{cav}} \right)} \right) \quad (13)$$

Radiation losses are calculated using Eq. (14), where $A_{ap,rec}$ is a function of the cavity's aperture opening diameter.

$$Q_{rad,emi} = \epsilon_{cav}^* \sigma A_{ap,rec} (T_{cav}^4 - T_{amb}^4) \quad (14)$$

Natural convection losses are given by Eq. (15).

$$Q_{conv,nat} = h_{int,nat} A_{int,cav} (T_{cav} - T_{amb}) \quad (15)$$

To calculate the losses by natural convection in the cavity surface with Eq. (16), the correlation proposed by Stine et al. [26], which has been validated in other studies by Nepveu [27] and Sendhil [28], was used.

$$Nu_{int,nat} = 0.088 Gr^{1/3} (T_{cav}/T_{amb})^{0.18} \cos(\theta)^{2.47} (d_{ap}/d_{cav})^m, \text{ where} \\ m = -0.982 (d_{ap}/d_{cav}) + 1.12 \quad (16)$$

Forced convection losses are given by Eq. (17).

$$Q_{conv,for} = h_{int,for} A_{int,cav} (T_{cav} - T_{amb}) \quad (17)$$

To calculate the forced convection inside the cavity Eq. (18), factors such as wind and the slope of the cavity are considered, and we use the model proposed by Ma [29].

$$h_{int,for} = f(\theta) V^{1.401}; \text{ where } f(\theta) \\ = 0.163 + 0.749 \sin(\theta) - 0.502 \sin(2\theta) + 0.327 \\ \times \sin(3\theta) \quad (18)$$

The conduction heat loss in the cavity is transferred through the walls of the cavity and is then transferred to the environment by convection, in accordance with Eq. (19).

$$Q_{cond,conv} = \frac{(T_{cav} - T_{amb})}{L / (k_{ins} A_{int,cav} + 1 / (h_{ext,cav} A_{ext,cav}))} \quad (19)$$

The total convection heat transfer coefficient involves the natural and forced convection [26], as shown by Eq. (20).

$$h_{ext,cav} = (h_{ext,nat}^3 + h_{ext,for}^3)^{1/3} \quad (20)$$

To calculate the convection coefficient on the outer surface of the cavity when oriented vertically, the Nusselt number is given by Eq. (21) and Eq. (22) with respect to the correlation developed by Churchill and Chu and with reference to Incropera and DeWitt [30].

$$Nu_{ext,nat} = 0.27 Ra^{1/4}; (10^3 \leq Ra \leq 10^{10}; 60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ) \quad (21)$$

$$Nu_{ext,for} = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (22)$$

Finally, the heat remaining in the cavity, Q_{cav} , is transferred to the fluid useful energy (see Fig. 4) through the walls of the absorber tubes, as shown by Eq. (23).

$$Q_{con,tub} = \frac{(T_{cav} - T_{int,tub})}{\log(d_{ext}/d_{int}) / (2\pi k_{tub} L_{abs} N_{tub,abs})} \quad (23)$$

Table 3

Parameters for comparison of a parabolic dish with respect to STSC.

Parameters	Parabolic dish	STSC
Diameter of the reflector	4 m	3.92 m
Rim angle	45°	45°
Focal length	2.6 m	5.04 m
Receiver diameter	0.36 m	0.36 m
Receiver aperture opening diameter	0.15 m	0.3 m
Cavity length	0.125 m	0.057 m
Inclination of the cavity	40° prom	80.7° fixed
Total error of the solar collector	8 mrad	12 mrad
Intercept factor	0.99	0.98
Radiation intercepted	10301 W	9597 W
Heat in the fluid	8423 W	8423 W
Receiver efficiency	81%	88%

3. Results and discussion

3.1. Model resolution

The mathematical model is solved using a convergent approximation algorithm in which there is a proposed initial temperature of the cavity and the temperature will increase gradually to reach an energy balance in the cavity receiver. Initially the geometric dimensions and properties of the concentration system and environmental conditions are introduced. Then, the intercept factor of the concentrator, the energy delivered to the receiver and the energy transferred to the atmosphere by convection, radiation and conduction are calculated to finally obtain the amount of energy transferred to the fluid. The algorithm is implemented in the program Engineering Equation Solver (EES).

3.2. Model validation

The validation process of the optical-geometric model is performed by comparing the experimental results for the WGA500 concentrator [31] and the results of the simulator of the geometric-optical model. To do this, the optical and geometric features of the WGA500 concentrator (focal length 4.5 m, diameter 3.8 m parabola, reflector) are introduced in the simulator. This type of concentrator is most appropriate for validating low-power solar concentrators, according to a study by Fraser [15]. Fig. 5 shows that the proposed model is modified by adjusting the exponential of the polynomial I (a) of Eq. (8) from a value of 1.5–1.15, resulting in a better approximation of the curve of the experimental results, coinciding with maximum variations of 10%, while the proposed model without modification presents variations greater than 10%. These results also show that for intercept factors greater than 0.9, the proposed modified model coincides with maximum variations of 1%. This result is adequate because the intercept factor is used precisely in this range as in this range, reductions in the heat losses caused by the excessive size of the opening of the cavity receiver are achieved.

The validation process of the thermal model is performed by comparing the experimental results reported for the 10 kW cavity receiver CNRS-PROMES system and the results obtained from simulation of the thermal model for this purpose. The thermal and geometric features of the 10 kW receiver CNRS-PROMES system (focal length 4.5 m, diameter 3.8 m parabola, reflector) [32] are introduced in the simulator. According to [15], this type of receptor is most appropriate for validating low-power receivers. Table 1 shows that the results of the proposed model are in the range established with respect to the experimental values. It is clear that the losses are not compared by conduction because this system considers the losses by conduction within the losses due to convec-

tion heat losses that are subsequently transferred by conduction to the environment by convection.

3.3. Numerical results

The scan sequence of parameters is performed to search for design parameters of the reflector using the mathematical model and the design parameters that correspond to the characteristics of the Stirling engine according to previous work [33] and the operating parameters for the weather conditions of Mexicali, Baja California, Mexico, which are shown in Table 2.

The model resolution consists of proposing a radius, for the reflector aperture area, and then this radius value is adjusted to obtain the quantity and quality of energy required by the 3 kWe Stirling engine, which corresponds to a thermal energy demand of 8423 W with a fluid temperature of 957 K, according to the study by Beltran et al. [33]. A radius of 1.96 m was found, which meets the quality and quantity of heat required by the Stirling engine. For this radius, the y-intercept value is 2.21 m, and the reflector diameter is 8.34 m for the parabola when considering a spacing of 0.25 m, as shown by Eq. (24).

$$d_{ref} = 2(2r + S) \quad (24)$$

Simultaneously, the model performs a scan to find the focal length and rim angle that provide the highest geometric concentration Eq. (25). Finding that the highest concentration corresponds to an rim angle of 45°,

$$C_{geo} = \frac{4\pi r^2}{\pi W_n^2} \quad (25)$$

This rim angle corresponds to a focal length of the parabola of 5.04 m because the rim angle of 45° provides for a smaller solar image in the focal plane, and then, the highest geometric concentration is obtained (Fig. 6).

Continuing the sequence design, a calculation is performed to determine the location of the absorber by calculating the length of the cavity Eq. (26) and the spacing of the absorber (S_p) with respect to the focal point Eq. (27), as observed in Fig. 2. The radiation is distributed best on the absorber surface with a cavity length of 5.72 cm and a spacing of 20.86 cm to comply with this condition, because the projection cone image is taken after the focal point.

$$L_{cav} = \frac{d_{cav} - d_{ap,rec} - E_{sp}}{\tan(\psi_{sup})} \quad (26)$$

$$S_p = \frac{d_{ap,rec} - L_{cav} \tan(\psi_{inf})}{2} \quad (27)$$

The receiver aperture diameter is designed to transfer the most heat to the fluid, and this condition is obtained with an aperture diameter of 0.3 m and an intercept factor of 0.98. This finding is determined because, at this point, the aperture diameter increases, which not only increases the intercept factor but also further increases the loss due to radiation and convection losses caused by the excessive size of the aperture diameter (Fig. 7).

Table 3 shows the parameters used to size the STSC and the parabolic dish concentrator that satisfies the same thermal demand reported by Beltran and Velázquez [32]. To make a comparison between an STSC and a parabolic dish, the STSC operates with less precision but has a better thermal efficiency ($\eta = Q_{rec}/Q_{fluid}$), which is increased by 7%. This result is due to the inclination of the receiver angle and due to a decrease in the losses caused by convection; however, the focal length increases because of the relationship to the diameter of the parabola, and this relationship increases the area of the solar image at the focal point.

4. Conclusions

In this work, an STSC is designed to be coupled to a 3 kWe Stirling engine in a fixed position by introducing a new mathematical model that includes geometric, optical and thermal aspects. The model and methodology can be extrapolated to other applications by adjusting the design parameters and operation conditions.

The results allow for the determination of the focal length, which demonstrates that the largest concentration using the STSC with a rim angle of 45° is similar to the concentration achieved with a parabolic dish, but the receptor improves the efficiency by 7% compared with parabolic dishes that operate with a lower error of concentration. This result is due mainly to the case study that presents a receiver incline that favours the reduction convective heat loss. However, the relationship (f/d) results in a greater focal length for the STSC than the focal length of a parabolic dish. Consequently, the STSC is appropriate for regions that allow a reduction of heat losses and thermal energy requirements because the absorber area and focal length is adjusted to the focal image.

Finally, the new geometric model for estimating the intercept factor is versatile because it can be applied to both parabolic dish concentrators and STSCs by adjusting the correct limits of integration.

Acknowledgments

The authors extend their gratitude to CONAVI for their support with the Project CONAVI-2009-01-127156 and to CONACYT and ITESCA.

References

- [1] Slavina V, Bakos G, Finn timer K. Conversion of thermal energy into electricity via a water pump operating in Stirling engine cycle. *J Appl Energy* 2009;86:1162–9.
- [2] Prakash M, Kedare S, Nayak J. Determination of stagnation and convective zones in a solar cavity receiver. *Int J Therm Sci* 2010;49:680–91.
- [3] Munir A, Hensel O, Scheffler W. Design principle and calculations of a Scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications. *J Solar Energy* 2010;84:1490–502.
- [4] Patil R, Awari G, Singh M. Experimental analysis of Scheffler reflector water heater. *J Thermal Sci* 2011;15:599–604.
- [5] Chandak A, Somani S, Deepak D. Design, development and testing of multi effect distiller/evaporator using Scheffler solar concentrators. *J Eng Sci Technol* 2009;4:315–21.
- [6] Dravida M, Chandak A, Phutea S, Khadsea R, Adchitrea H, Kulkarnia S. The use of solar energy for powering a portable autoclave. *J Hosp Infect* 2012;80:345–7.
- [7] Ruelas J, Velázquez N, Beltran R. Design optic assisted for computer of concentrator solar. In: *Proceedings of XV congress international of the SOMIM*, 2009 September 23–25, Obregon, Son, Mexico; 2009. p. 253–60.
- [8] Harris J, Lenz T. Radiation performance of dish solar concentrator–cavity receiver systems. *J Solar Energy* 1985;34:135–42.
- [9] Badescu V. Dynamic solar space power systems: optimum design and operation. *J Space Technol* 1994;14:331–7.
- [10] Shuai Y, Xia L, Tan G. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. *J Solar Energy* 2008;82:13–21.
- [11] Kumar N, Reddy K. Comparison of receivers for solar dish collector system. *J Energy Convers Manage* 2008;49:812–9.
- [12] Chin-Hsiang Ch, Hang-Suin Y. Optimization of geometrical parameters for Stirling engines based on theoretical analysis. *J Appl Energy* 2012;92:395–405.
- [13] Nepveu F, Ferriere A, Bataille F. Thermal model of a dish/Stirling systems. *J Solar Energy* 2009;83:81–9.
- [14] Halit K, Hüseyin S, Can Ç, Fatih A. An experimental study on the development of a beta-type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources. *J Appl Energy* 2009;86:68–73.
- [15] Fraser P. Stirling dish system performance and prediction model. MSc thesis in mechanical engineering, Madison, USA: University of Wisconsin; 2008.
- [16] Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes*. 3rd ed. Hoboken New Jersey, USA: John Wiley & Sons; 2006.
- [17] Jaffe L. Optimization of dish solar collectors. *J Energy* 1983;7:684–94.
- [18] Badescu V. Optimization of Stirling and Ericsson cycles using solar radiation. *J Space Power* 1992;11:99–106.
- [19] Romero V. A software package for facilitated optical analysis of 3-D distributed solar energy concentrators. Report SAND-91-2238. Albuquerque, NM, USA: Sandia National Laboratories; 1994.
- [20] Badescu V. Optimum operation of a solar converter in combination with a Stirling or Ericsson heat engine. *Int J Energy* 1992;17:601–7.

- [21] Badescu V. Different tracking error distributions and their effects on the long-term performances of parabolic dish solar power systems. *Int J Solar Energy* 1994;14:203–16.
- [22] Stine WB, Harrigan RW. *Solar energy fundamentals and design with computer applications*. New York NY USA: Wiley-Interscience; 1985.
- [23] Parente A, Galletti C, Riccardi J, Schiavetti M, Tognotti L. Experimental and numerical investigation of a micro-CHP flameless unit. *J Appl Energy* 2012;89:1–203.
- [24] Ayres FJ. *Differential and integral calculus*. Madrid España: Schaum; 1989.
- [25] Abramowitz M, Stegun IA, Knovel. *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*. In: 10th ed. US Washington, DC, USA: Dept. of Commerce; 1972.
- [26] Stine W and McDonald C. Cavity receiver convective heat loss. In: *Solar world congress, international solar energy society*; 4–8 September. Kobe Japan; 1989. p. 1318–22.
- [27] Nepveu F, Ferriere A, Bataille F. Thermal model of a dish/Stirling systems. *J Solar Energy* 2009;83:81–9.
- [28] Kumar S, Reddy N. Numerical investigation of natural convection heat loss in modified cavity receiver for fuzzy focal solar dish concentrator. *J Solar Energy* 2007;81:846–55.
- [29] Ma R. Wind effects on convective heat loss from a cavity receiver for a parabolic concentrating solar collector. Report SAND92-7293. Livermore, CA, USA: Sandia National Laboratories; 1993.
- [30] Incropera PF, DeWitt DP. *Fundamentals of transference heat*. 4th ed. Mexico DF: Prentice Hall; 1999.
- [31] Diver RB, Andraka CE, Scott RK, Goldberg V, Thomas G. The advanced dish development system project. In: *Proceedings of solar forum*; 2001 April 21. Washington, DC, USA; 2001. p. 1–6.
- [32] Reinalter W, Ulmer S, Heller P, Rauch T, Gineste J, Ferriere A, Nepveu F. Detailed performance analysis of the 10 kW CNRS-PROMES dish/Stirling system. In: *Proceedings of the 13th SolarPACES international symposium*, 2006, Seville Spain; 2006. A7–S7 p. 1–9.
- [33] Beltran R, Velázquez N, Saucedo D, Ruelas J. Analysis and studio of solar concentrator of parabolic dish whit receptor cavity. In: *Proceedings of XXXIII week national of solar energy*, Guadalajara, J, Mexico, 2009 28 September–3 October; 2009. p. 633–7.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

ANEXO 2.

“Diseño de un concentrador solar acoplado a un motor Stirling fijo”

Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo Vol. 4 No. 1, pag 015-022, ISSN 1665-7381. (Indexado por:

CONACYT, SciELO, Redalyc, Latindex, Periódica)

Diseño de un Concentrador Solar Acoplado a un Motor Stirling Fijo

José E. Ruelas Ruiz^a, Nicolás Velázquez Limón^b, Ricardo Beltrán Chacón^c

Centro de Estudio de las Energías Renovables del Instituto de Ingeniería, UABC
Bld. Benito Juárez y Calle de la Normal s/n, CP 2128, Mexicali Baja California
^ajose.ruelas@uabc.edu.mx, ^bnicolas.velazquez@uabc.edu.mx, ^crichi_beltran@yahoo.com

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla y aplica un nuevo modelo geométrico de un concentrador solar de foco fijo (CSFF) en coordenadas cartesianas, al cual se le incorpora el modelo térmico de un receptor de cavidad para determinar las dimensiones de diseño del CSFF, con el propósito de satisfacer la demanda de energía térmica de un motor Stirling de 3 kWe. La validación del modelo propuesto se realiza a partir de resultados experimentales, utilizando la información reportada sobre el concentrador WGA500 y receptor del sistema CNRS-PROMES. Los resultados del estudio paramétrico proporcionan las dimensiones de diseño del CSFF, que de manera semejante al concentrador de disco parabólico, la mayor concentración se obtiene con un ángulo de borde de 45°, pero con la diferencia de que el receptor de cavidad se encuentra con una inclinación 80.7° en posición fija, obteniéndose una eficiencia térmica de dicho receptor del 88%. El modelo matemático y metodología propuesta pueden ser utilizados para diseñar CSFF acoplados a receptores de cavidad para aplicaciones distintas al motor Stirling, solo ajustando los parámetros de diseño y condiciones de operación según los requerimientos de la nueva aplicación.

Abstract

In this paper develops and applies a new geometrical model of a fixed-focus solar concentrator (CSFF) in Cartesian coordinates, which incorporates the thermal model of a cavity receiver to determine the design parameters of CSFF needed to satisfy the thermal energy demand of a 3-kWe Stirling engine. The numerical validation of the proposed model is made from experimental results reported concentrator WGA500 and receiver system PROMES CNRS. The numerical results providing the dimensions of CSFF, which similarly to the parabolic dish, the highest concentration was obtained with edge angle 45° but with the difference that the receiver operates with in fixed position and receptor efficiency of 88%. The proposed model and methodology can be used for sizing CSFF coupled receptors open cavity according to the heat and temperature requirements of the application.

Palabras clave:

Energía solar, diseño, concentrador solar, motor Stirling

Keywords:

Solar energy, Design, solar concentrator, Stirling engine

NOMENCLATURA

A	Area, m ²
a	Variable del segmento de distribución normal
b	Constante de aproximación a distribución normal
f	Distancia focal, m
d	Diámetro, m
Em	Emisividad
Esp	Espaciamiento, m
Gr	Numero de Grashof
Id	Radiación solar directa, W/m ²
k	Conductividad térmica, W/m ² ·K
L	Longitud, m
n	Numero de segmento de reflector
N	Dispersión de la imagen solar en el punto focal
Nu	Numero de Nusselt
p	Distancia del borde al punto focal, m
Q	Calor, W/m ²
r	Radio, m
R	Radio de la imagen solar

T	Temperatura, K
t	Variable de aproximación a distribución normal
w	Ancho de la imagen focal, m

Símbolos griegos

α_{eff}	Absorbancia efectiva de la cavidad
ε	Angulo subtendido del sol, mrad
σ	Desviación Standard del error, mrad
ρ	Eficiencia
η	Reflectancia de la superficie
φ	Factor de intercepción
θ	Ángulo de inclinación de la cavidad, rad
v	Velocidad del viento, m/s
ψ	Ángulo de borde, rad

Subíndices

abs	Absorbedor
ap	Apertura

cond	Conducción
conv	Convección
cav	Cavidad
ext	Exterior
in	Interior
rad	Radiación
ref	Reflejado
rec	Receptor
tub	Tubo

Introducción

En la generación de electricidad empleando energía solar térmica, se ha recurrido a la incorporación de tecnologías de concentración solar como: helióstatos, canal parabólico, Fresnel y disco parabólico, donde este último se acopla a un motor Stirling (Winter, Sizmann y Vant-Hull). La tecnología de disco parabólico/motor Stirling presenta problemas de sombreado del reflector, disminución de área de reflector, pérdidas de convección variables provocando una disminución en la eficiencia de conversión de la energía solar a eléctrica, por el hecho de tener el motor Stirling en el punto focal del disco parabólico y moverse en forma conjunta siguiendo las trayectorias aparentes del sol, M. Prakash, S.B. Kedare y J.K. Nayak. De acuerdo con Winter, Sizmann y Vant-Hull; M. Prakash, S.B. Kedare y J.K. Nayak el emplear un concentrador solar cuyo receptor de cavidad se encuentre fijo y además orientado hacia abajo, puede contribuir a la reducción de la problemática, para ello se requiere diseñar un CSFF que proporcione la energía térmica requerida por el motor Stirling.

Uno de los primeros esfuerzos en el desarrollo de CSFF, es el caso del concentrador Scheffler, el cual se ideó para que las cocinas solares estuvieran fijas y en el interior de la vivienda, A. Munir, O. Hensel y W. Scheffler, aunque también se le ha dado otras aplicaciones como: extractor de aceite, Munir A and Hensel O, destilador, Chandak A. y Somani S. y esterilizador Michael Tyroller. Ruelas J., Velázquez N. y Beltrán R. definieron las características geométricas ideales del CSFF, por medio de un estudio de imagen solar con la técnica de trazado de rayos, sin considerar los aspectos térmicos del concentrador.

Con la finalidad de optimizar el diseño de los sistemas de concentración solar, se han desarrollado diferentes modelos empleando diversas herramientas matemáticas y de software. El modelo matemático propuesto por Harris J. y Lenz T. analiza el comportamiento operativo de un concentrador de disco parabólico, empleando el factor de vista para estimar la cantidad de radiación captada en diferentes tipos de receptores de cavidad (cilíndricas, cónicas, elípticas y esféricas). Shuai Y., Xia L. y Tan G. *et al* emplean el método de Monte-Carlo para determinar el desempeño del concentrador de disco parabólico con diversas geometrías de receptor. Kumar N. y Reddy K. presentan la aplicación del software CFD (computational fluid dynamics) para determinar las dimensiones óptimas del área de apertura de una cavidad abierta esférica acoplada a un disco parabólico, tomando como criterio principal el mínimo de pérdidas por convección. Costea M., Petrescu S. y Harman

C. *et al* presentan un estudio bajo la primera y segunda ley de la termodinámica que permite determinar el desempeño del acoplamiento solar entre un concentrador de disco parabólico y un motor Stirling. Nepveu F., Ferriere A. y, Bataille F. *et al* propusieron un modelo matemático para el concentrador Eurodisch acoplado a un motor Stirling de 10 kW. T. Krishnaiah, S. Srinivasa Rao, K. Madhumurthy y K.S. Reddy presentan un modelo matemático y realizan un estudio paramétrico de un concentrador de disco parabólico acoplado a un motor Stirling tipo gama. P. Fraser plantea un modelo para estimar el desempeño operativo de un motor Stirling tipo alfa acoplado a un concentrador de disco parabólico, en los últimos cuatro modelos mencionados anteriormente, se estima la energía que entra al receptor empleando la ecuación propuesta por Duffie J. A. y Beckman W., esta ecuación establece que la energía concentrada en un receptor de cavidad es directamente proporcional a la radiación directa, al área de apertura del reflector, a la reflectividad y al factor de intercepción. En el modelo propuesto por Stine W. B. y Harrigan R W., retoman la ecuación propuesta por Duffie J. A. y Beckman W. e incorpora el efecto de variar el diámetro de apertura del receptor en función del ángulo de borde y la altura del punto focal del reflector, considerando los errores del sistema de concentración en el factor de intercepción, este último concepto es particularmente útil para establecer las dimensiones del concentrador y su acoplamiento con el receptor de cavidad, debido a que reduciendo el diámetro de apertura del receptor, se tienen 2 efectos encontrados, por un lado se disminuye la cantidad de radiación captada y por otro lado se tienen menores pérdidas térmicas, por lo que se hace necesario encontrar un punto de equilibrio que proporcione la máxima eficiencia del sistema. Se han desarrollado diferentes modelos para estimar la energía interceptada por un receptor, Jaffe Leonard D. presenta un modelo que involucra los aspectos ópticos y térmicos para optimizar el acoplamiento del disco parabólico y receptor de cavidad de manera experimental. Romero V. J., determina la energía interceptada por un receptor, debida a segmentos circulares o rectangulares del disco parabólico, involucrando los aspectos ópticos del concentrador para el desarrollo de un software del laboratorio Sandia. P. Fraser en un estudio comparativo establece el modelo más adecuado para estimar la energía interceptada por un receptor de cavidad de un motor Stirling de 10 kW acoplado a un disco parabólico.

Debido a que ninguno de los estudios realizados anteriormente pueden ser aplicados directamente en el diseño de un CSFF, ya que es necesario incorporar el modelo geométrico de dicho concentrador, en la presente investigación se propone un modelo matemático y una metodología para el diseño de un CSFF acoplado a un receptor de cavidad de un motor Stirling de 3kW, donde la metodología pueda ser extrapolada a otro tipo de aplicación del CSFF.

Descripción del Sistema

El CSFF propuesto es mostrado en la figura 1, corresponde a una pequeña sección lateral de una parábola, que dirige

la radiación solar a un punto focal fijo donde se encuentra instalado un motor Stirling, dicho motor está sujeto por medio de una estructura. Para mantener la radiación solar en el punto focal fijo, se emplea un sistema de seguimiento en 2 ejes, que consta de dos mecanismos, uno de seguimiento diario, el cual desplaza el reflector sobre un soporte móvil de manera proporcional a la declinación solar y el otro de seguimiento horario, que proporciona la rotación del reflector de forma sincronizada con el movimiento del sol durante el día. Estos movimientos del reflector permiten concentrar la radiación solar en una cavidad receptora donde se calienta un gas (helio, hidrógeno o aire) a una temperatura de alrededor de 700° C., Finkelstein T. y Organ A. J., posteriormente mediante el motor Stirling se realiza la conversión de energía térmica a energía eléctrica. Los valores de los parámetros de diseño para el caso de estudio son mostrados en sección de metodología de diseño y las dimensiones resultantes de aplicar el modelo matemático y metodología son mostrados en la sección de resultados.

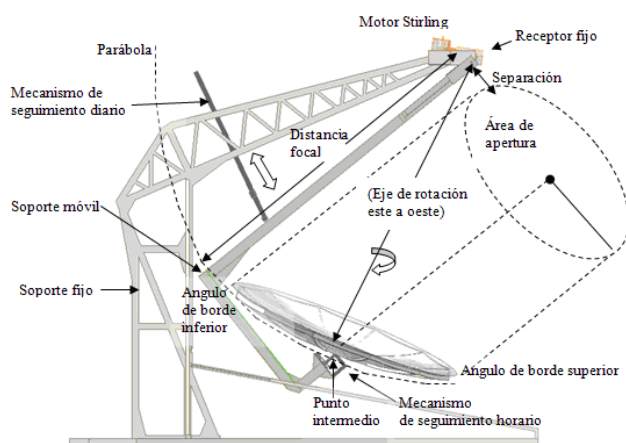


Figura 1. Esquemas del CSFF.

Modelado Matemático

En esta sección se desarrolla el modelo matemático del CSFF, en el cual primeramente se obtiene el modelo óptico-geométrico por medio de la estimación analítica del factor de interceptación y posteriormente se describe el modelo térmico de un receptor cilíndrico de cavidad abierta. Para ello se emplean las siguientes consideraciones: la distribución de la imagen solar en el punto focal corresponde a una distribución normal, la temperatura en el interior de la cavidad receptora es homogénea, el modelo se desarrolla bajo las mismas condiciones que las correlaciones empleadas, el análisis de transferencia de calor se realiza en estado estable y de manera unidimensional. El planteamiento del modelo inicia utilizando la ecuación 1 descrita por Duffie J. A. y Beckman W., con la cual se estima la cantidad de energía captada por un receptor de cavidad.

$$Q_{cav} = I_d \cdot A_{ap} \cdot \rho \cdot \varphi \quad (1)$$

La utilidad de emplear la ecuación 1 es que permite estimar las dimensiones geométricas del reflector y todas las variables son datos conocidos, excepto el factor de interceptación de un CSFF, para lo cual es necesario desarrollar la ecuación 2, Stine W. B. y Harrigan R. W. En esta ecuación el denominador co-

rresponde a la energía total que incide en el reflector, la cual es proporcional al valor de la radiación directa multiplicada por el área de apertura. Sin embargo para determinar la energía interceptada (numerador ecuación 2), es necesario resolver la integral aplicando las consideraciones geométricas y ópticas del CSFF.

$$\varphi = \frac{\int_{-n}^{+n} I(a) da}{\int_{-\alpha}^{\alpha} I(a) da} \quad (2)$$

Modelo geométrico

El modelo geométrico del CSFF corresponde a la interceptación de la proyección de una sección circular del área de apertura de la parábola de origen, como se muestra en la figura 2, para ello es necesario especificar: la altura de la parábola (f), la coordenada en el (eje y) del centro del área apertura circular (y_{int}) y su radio (r). En este modelo se puede mover el punto de interceptación (y_{int}) a lo largo del (eje y), de tal manera que puede ser aplicado en concentradores de disco parabólico, desplazando el punto de intersección al origen es decir ($y_{int}=0$). De acuerdo con la figura 2, el modelo se resuelve desarrollando una integral de superficie, Ayres F. J., que corresponde a la suma de segmentos geométricos del CSFF para el total de área del reflector de acuerdo con la ecuación 3.

$$\int_{-n}^{+n} I(a) da = \iint_{n(R)} I(a) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy \quad (3)$$

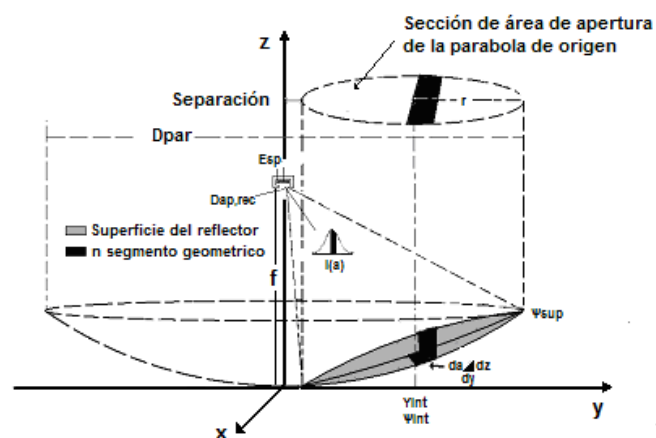


Figura 2. Esquema de la proyección de la sección área de apertura sobre la parábola que da origen al CSFF.

La superficie del reflector corresponde a dos sólidos que se interceptan: una parábola, ecuación 4 y un cilindro empleado como límite de la interceptación ecuación 5.

$$z = \frac{x^2}{4f} + \frac{y^2}{4f} \quad (4)$$

$$(x-0)^2 + (y-y_{int})^2 = r^2 \quad (5)$$

El modelo geométrico queda planteado matemáticamente con la ecuación 6, faltando desarrollar la función $I(a)$, correspondiente al modelo óptico.

$$\int_{-n(y)}^{+n(y)} I(a) da = \sum_{y_{\text{int}}-r}^{y_{\text{int}}+r} I(a) \sqrt{k_1 y + k_2 \sqrt{r^2 y + 2y_{\text{int}} y - y_{\text{int}}^2 - r^2 y_{\text{int}} - y^2}} \quad (6)$$

Donde: k_1 y k_2 son constantes obtenidas de las características geométricas de la parábola de origen del reflector y la sección de área de apertura de la parábola.

Modelo óptico

Se incorpora el modelo óptico de Stine. W. B. y Harrigan R. W. en coordenadas cartesianas al modelo del CSFF, sustituyendo la variable diámetro de apertura del receptor de cavidad (d_{ap}), en función del radio de la imagen solar (ΔR) y este a su vez en función de la relación geométrica de la imagen solar en el punto focal respecto al eje y .

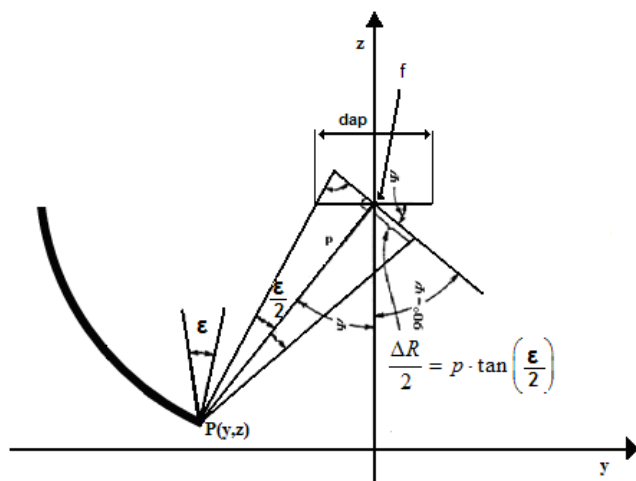


Figura 3. Esquema de la imagen solar en el plano focal del CSFF.

Con la ecuación 7 se representan los aspectos trigonométricos y ópticos de la dispersión de la imagen solar reflejada en el punto focal "N(y)", involucrando aspectos de operación de los componentes del concentrador, como precisión del sistema de seguimiento, error especular, alineación, tamaño de la imagen, estabilidad estructural, Stine W. B. y Harrigan R. W.

$$N(y) = \frac{2}{\sigma_{\text{total}}} \tan^{-1} \left(\frac{d_{ap} \cos \psi}{2p} \right) \quad (7)$$

Donde: $p = \sqrt{y^2 + (f - z)^2}$: es la distancia desde el borde del reflector a el punto focal.

$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{y}{f - z} \right)$: es el ángulo de borde del reflector en el plano focal.

$z = \frac{y^2}{4(f)}$: es coordenada del eje Z.

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{2\sigma_{\text{estructura}}^2 + \sigma_{\text{sensor}}^2 + \sigma_{\text{mecanismo}}^2 + \sigma_{\text{alineación}}^2 + 2\sigma_{\text{especular}}^2 + \sigma_{\text{sol}}^2}$$

es la desviación estándar de los errores de concentración Stine W. B. y Harrigan R. W.

La distribución normal de la radiación en el punto focal ecuación 8, está dada por Abramowitz y Stegun. En el modelo del CSFF se considera el error residual máximo (res) en la aproximación del polinomio $I(a)$ para una función continua $z(x)$, mediante el polinomio formado por las constantes (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) y la variable de correlación (t).

$$I(a) = \left(1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{N(y)^2}{2}} (b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5) + 2res \right) \quad (8)$$

Finalmente el factor de intercepción para un CSFF está dado por:

$$\varphi = \frac{\sum_{y_{\text{int}}-r}^{y_{\text{int}}+r} I_d \left(1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{N(y)^2}{2}} (b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5) + 2res \right) \left(\sqrt{k_1 y + k_2 \sqrt{r^2 y + 2y_{\text{int}} y - y_{\text{int}}^2 - r^2 y_{\text{int}} - y^2}} \right)}{I_d (\pi r^2)} \quad (9)$$

El factor de intercepción para un concentrador de disco parabólico en coordenadas cartesianas ecuación 10, se obtiene a partir de la ecuación 9, ajustando el centro del área de apertura del reflector al valor del origen ($y_{\text{int}} = 0$).

$$\varphi = \frac{\sum_0^{y_{\text{int}}+r} I_d \left(1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{N(y)^2}{2}} (b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5) + 2res \right) \left(\sqrt{k_1 y + k_2 \sqrt{r^2 y + 2y_{\text{int}} y - y_{\text{int}}^2 - r^2 y_{\text{int}} - y^2}} \right)}{I_d (\pi r^2)} \quad (10)$$

Modelo térmico

El modelo del receptor fue planteado recientemente por Fraser [14], éste modelo se obtiene del análisis térmico de un receptor de cavidad circular con absorbedor plano y aislante térmico en las paredes. En este modelo el receptor toma la energía proveniente del reflector y después de ser afectada por las pérdidas térmicas, es transferida a un fluido de trabajo del motor Stirling mediante un absorbedor plano de tubos cilíndricos, como se muestra en la figura 4.

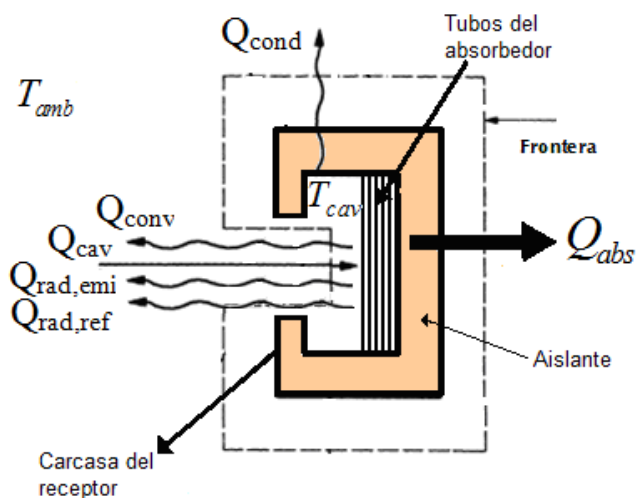


Figura 4. Esquema del modelo físico del receptor de cavidad.

Para obtener el modelo matemático del receptor se realiza un balance de energía, donde la energía captada por la cavidad del receptor corresponde a Q_{abs} .

$$Q_{abs} = Q_{cav} - Q_{rad,ref} - Q_{rad,emi} - Q_{conv} - Q_{cond} \quad (11)$$

El calor perdido por radiación reflejada está dada por la ecuación 12, Duffie J. A. y Beckman W.

$$Q_{rad,ref} = (1 - \alpha_{eff}) \cdot Q_{rec} \quad (12)$$

Donde: α_{eff} es la reflectancia efectiva de la cavidad.

$$\alpha_{eff} = \frac{\alpha_{cav}}{\alpha_{cav} + (1 - \alpha_{cav}) \cdot (A_{ap} / A_{cav})} \quad (13)$$

Las pérdidas por radiación emitida ($Q_{rad,emi}$) se calculan mediante la ecuación 14, donde $A_{ap,rec}$ está en función del diámetro de apertura de la cavidad.

$$Q_{rad,emi} = E_{m_{cav}} \cdot \sigma \cdot A_{ap,rec} \cdot (T_{cav}^4 - T_{amb}^4) \quad (14)$$

Las pérdidas por convección en el interior de la cavidad están dadas por la ecuación 15, donde el coeficiente de convección total representa la suma de los coeficientes de convección natural y forzada.

$$Q_{cav,conv} = h_{total} A_{int,cav} (T_{cav} - T_{amb}) \quad (15)$$

La ecuación 16 se emplea para determinar el coeficiente de convección natural en la superficie mediante la correlación propuesta por Stine William B. y C. G. McDonald. *et al.*

$$Nu_{int,nat} = 0.088 \cdot Gr^{1/3} \cdot (T_{ext,cav} / T_{amb})^{0.18} \cos(\theta)^{2.47} (D_{ap} / D_{cav})^m; \quad (16)$$

donde $m = -0.982 (D_{ap} / D_{cav}) + 1.12$

La ecuación 17 se emplea para calcular el coeficiente de convección forzada en el interior de la cavidad considerando factores como el viento y la inclinación de la cavidad tomada de Ma Robert Y.

$$h_{int,viento} = f(\theta) \cdot \nu^{1.401}, \text{ donde:} \quad (17)$$

$$f(\theta) = 0.1634 + 0.7498 \cdot \sin(\theta) - 0.5026 \cdot \sin(2\theta) + 0.3278 \cdot \sin(3\theta)$$

La ecuación 18 se refiere al calor de la cavidad se transfieren por conducción a través de las paredes y posteriormente se transfiere al ambiente por convección, se determina por:

$$Q_{abs,cond} = \frac{(T_{cav} - T_{amb})}{L / (k_{ais} \cdot A_{int,cav}) + (1 / h_{ext,cav} \cdot A_{ext,cav})} \quad (18)$$

El coeficiente total de transferencia de calor por convección del exterior de la cavidad ecuación 19, involucra la convección natural y forzada de acuerdo con [26].

$$h_{ext,cav} = (h_{nat}^n + h_{for}^n)^{1/n} \quad (19)$$

El número de Nusselt empleado en el cálculo del coeficiente de convección natural y forzada de la superficie exterior de la cavidad, se determinan empleando las ecuaciones 20 y 21 respectivamente de acuerdo con Incropera F.P. y DeWitt D.P.

$$Nu_{ext,nat} = 0.27 \cdot Ra^{1/4} (10^3 \leq Ra \leq 10^{10}; 60^\circ \leq 90^\circ) \quad (20)$$

$$Nu_{ext,for} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (21)$$

Finalmente el calor en la cavidad de absorbedor (Q_{abs}), se transfiere por conducción a través de las paredes de los tubos del absorbedor ecuación 22.

$$Q_{con,tub} = \frac{(T_{ext,cav} - T_{fluido})}{\log(D_{ext} / D_{int}) / 2\pi \cdot k_{tub} \cdot L_{abs} \cdot N_{tub,abs}} \quad (22)$$

Resolución Numérica

Los parámetros de diseño se obtienen de exploraciones numéricas, mediante un simulador desarrollado en el software Engineering Equation Solver (EES), para ello se emplea un algoritmo que resuelve los modelos matemáticos mediante una secuencia iterativa, en la cual se incrementa el valor de la temperatura de la cavidad hasta que se cumple el balance de energía en el receptor como se muestra en la figura 5.

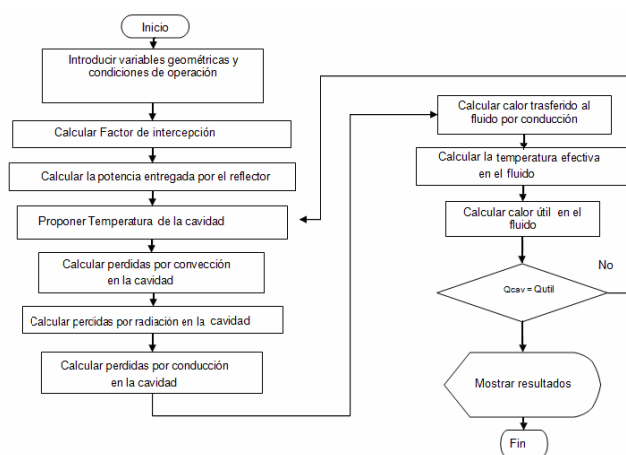


Figura 5. Algoritmo de solución del modelo matemático.

Validación numérica

El modelo matemático del concentrador es validado mediante la comparación de los resultados experimentales reportados para el concentrador parabólico WGA500, Diver R. B., Andraka C. E., Scott R. K., Goldberg V. y Thomas G., comparados con los obtenidos del simulador del modelo matemático propuesto, debido a que este modelo es el mas apropiado para este tipo de concentradores de acuerdo con P. Fraser. Como se muestra en figura 6, se obtiene que el modelo propuesto modificado, es decir ajustando el exponencial del polinomio a 1.5 ($I(a)^{1.5}$ de ecuación 8), se obtiene mayor ajuste a la curva, coincidiendo con el modelo experimental con variaciones máximas del 10% mientras el modelo propuesto sin modificaciones presenta variaciones mayores 10%. En el caso de factores de intersección mayores al 0.9 el modelo propuesto modificado coincide con variaciones máximas del 1%. Este resultado es adecuado porque el factor de intersección se utiliza precisamente en ese rango, debido a que en este rango, se logra la reducción de las pérdidas térmicas originadas por las dimensiones excesivas de la apertura del receptor.

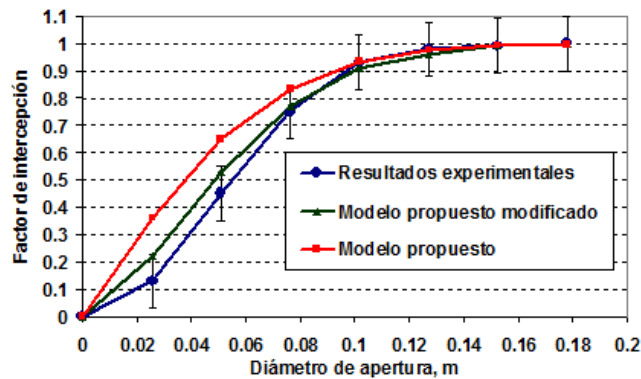


Figura 6.- Gráfica para validación del factor de intercepción.

La validación del modelo de receptor de cavidad se realiza mediante la comparación de los resultados experimentales del sistema CNRS-PROMES de 10 kW, Reinalter W., Ulmer S., Heller P., Rauch T., Gineste J.-M., Ferriere A. y Nepveu F, debido a que este tipo de receptores es el más apropiado de acuerdo con P. Fraser. En la tabla 1 se muestra que los resultados obtenidos del modelo propuesto están en el rango establecido respecto a los valores experimentales. Cabe aclarar que no se comparan las pérdidas por conducción, debido a que este sistema considera las pérdidas por conducción dentro de las pérdidas por convección a raíz de que las pérdidas térmicas por conducción se transfieren posteriormente al ambiente por convección.

Tabla 1. Comparación de modelo propuesto y los resultados experimentales del receptor.

PARÁMETRO	CNRS-PROMES kW (% variación)	MODELO PROPUESTO kW	OBSERVACIÓN
Energía interceptada	37.75 (3.1)	37.75	Valor de referencia
Pérdida por radiación reflejada	1.4 (25)	1.338	Dentro del rango
Pérdidas por radiación emitida	2.59 (16)	1.894	Dentro del rango
Pérdidas por convección	1.13 (50)	0.592	Dentro del rango

Metodología de diseño

La secuencia de exploración de parámetros consiste en una búsqueda de parámetros de diseño del reflector, aplicando el algoritmo interactivo de la figura 7, para ello se emplean los parámetros de diseño correspondientes a las características del absorbente del motor Stirling de acuerdo con Beltran R. y Velázquez N., las condiciones climatológicas típicas de Mexicali, B.C., México y la precisión del sistema de concentración disponible para el caso del error total y la reflectancia. Estos valores son mostrados en la tabla 2.

En la metodología, se propone un valor del radio de apertura del reflector y posteriormente se ajusta hasta obtener la cantidad y calidad de energía requerida por el motor Stirling de 3 kWe. La cual corresponde una demanda de energía térmica de 8423 W con una temperatura en el fluido de 957 K de acuerdo con el estudio realizado por Beltran R. y Velázquez N.

Tabla 2. Parámetros de diseño del sistema CSFF.

Parámetros de diseño		Condiciones operación	
Numero de tubos del absorbente	32	Radiación solar directa	900 W/m ²
Diámetro exterior de los tubos	0.63 cm	Velocidad del aire	3 m/s
Material de los tubos del absorbente	SS 316	Temperatura ambiente	315 K
Área de absorbente	6.44x10 ⁻² m ²	Altura Solar máxima	80.7°
Reflectancia del reflector	0.92	Temperatura de el fluido	929 K
Conductividad del aislante	0.042 W/(m K)	Calor en el fluido requerido	8423W
Espesor del aislante	0.075 m	Error total	12 mrad

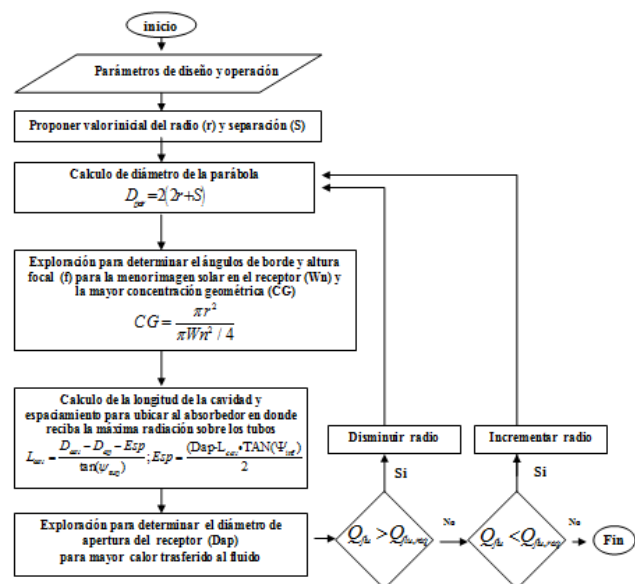


Figura 7. Diagrama de flujo para dimensionar el sistema.

Resultados

Aplicando el algoritmo mostrado en la figura 7, se encuentra que con 1.96 m de radio de área de apertura del reflector, se satisface la cantidad y calidad de calor requerido por el motor Stirling. Para este valor de radio el punto central de intercepción es de 2.21 m con diámetro de la parábola de 8.34 m considerando una separación de 0.25 m. En la figura 8 se realiza una exploración para encontrar la distancia focal que proporciona la mayor concentración geométrica fijando el diámetro de la parábola de acuerdo con el algoritmo mostrado anteriormente, encontrando que con un ángulo de borde de 45° se obtiene la mayor concentración geométrica, esto es debido a que el ángulo de borde de 45° proporciona la imagen solar de menor tamaño en el plano focal, a este ángulo de borde corresponde una distancia focal de la parábola de 5.04 m.

Continuando con la secuencia de diseño se realiza el cálculo para determinar la ubicación del absorbente mediante el cálculo de la longitud de la cavidad (L_cav) y el espaciamiento del absorbente respecto al punto focal (Esp), esto con el fin

de obtener una distribución de la radiación en la superficie del absorbedor. Se obtuvo que con una longitud de cavidad (L_{cav}) de 5.72 cm y un espaciamiento (Esp) de 20.86 cm se cumple con esta condición, esto es debido a que se aprovecha la proyección del cono de la imagen después del punto focal figura 9.

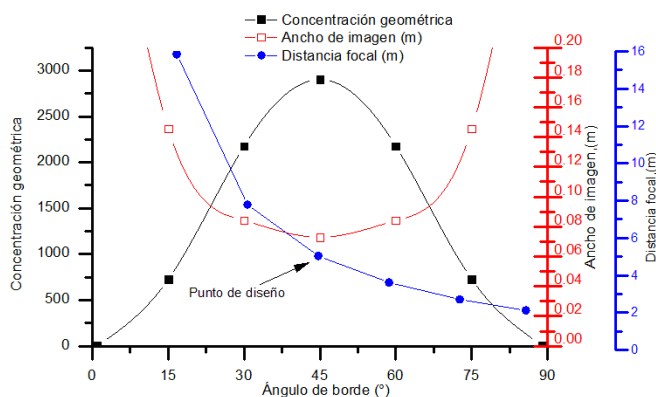


Figura 8. Exploración para determinar la distancia focal.

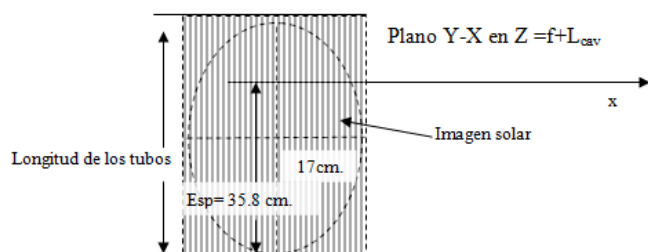


Figura 9. Ubicación geométrica del absorbedor.

Continuando con el orden de cálculo de parámetros se realiza una exploración para determinar el diámetro de apertura del receptor (D_{ap}), como se muestra en la figura 10, la mayor cantidad de calor transferido al fluido se obtiene con un diámetro de apertura 0.3 m y un factor de intercepción de 0.98, debido que a partir de éste punto el incrementar el diámetro de apertura, aumenta el factor de intercepción, pero también se incrementan en mayor medida las pérdidas por radiación y aun que las pérdidas por convección disminuyen a partir de este punto pero en menor proporción que el incremento de las pérdidas por radiación ocasiona una disminución en el calor transferido al fluido, originado por el incremento excesivo del diámetro de apertura.

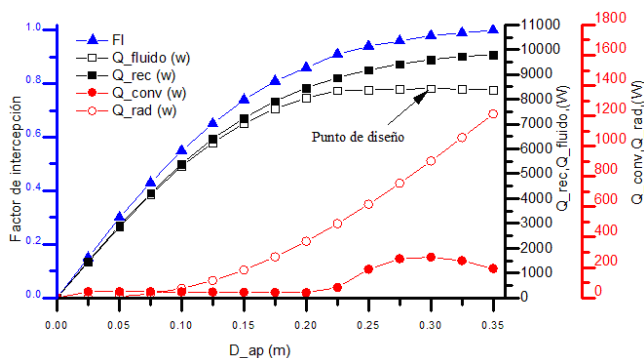


Figura 10.- Exploración para determinar el diámetro de apertura del receptor.

En la tabla 3, se muestran los parámetros para dimensionar el CSFF, algunos parámetros son obtenidos de los cálculos anteriores y el resto se obtienen por consideraciones geométricas del espesor del aislante en el receptor de acuerdo con la figura 2.

Tabla 3. Dimensiones de reflector y receptor del CSFF.

Dimensiones del reflector		Dimensiones del receptor	
Radio de apertura del reflector	1.96 m	Diámetro de apertura del receptor	0.3 m
Diámetro de la parábola	8.09 m	Diámetro exterior del receptor	0.46 m
Ángulo de borde superior	45 °	Longitud de la cavidad	0.057 m
Ángulo de borde intermedio	24.81°	Espacio del absorbedor	0.353 m
Altura focal	5.03 m	Longitud exterior del receptor	0.28 m
Distancia (Yint-f)	5.12 m	Factor de intercepción	0.98
Separación	0.25 m		

Conclusiones

La metodología y modelo matemático son una excelente herramienta para dimensionar un CSFF acoplados a motores Stirling en posición fija, debido a que el nuevo modelo matemático involucra los aspectos geométricos, ópticos y térmicos del concentrador. Dicho modelo y metodología puede ser extrapolado a otras aplicaciones, pero debido a la relación de los parámetro f/d , la distancia focal corresponde al doble de la distancia focal de un concentrador de disco parabólico. Cuando se requieran de potencias mayores se tendrá que incluir estudios de factibilidad técnica, que permitan establecer si el ancho de la imagen solar se ajusta al área de receptor para la nueva aplicación.

El CSFF presenta una eficiencia del receptor del 88% con errores de concentración de 12mrad, es decir se obtienen altas eficiencias a pesar de emplear equipos con baja precisión, esto es debido a que la inclinación del receptor favorece la disminución de las pérdidas térmicas.

Los resultados numéricos permiten determinar la distancia focal que proporciona la mayor concentración del CSFF, la cual corresponde a un ángulo de borde de 45°, al igual que el concentrador solar de disco parabólico.

La nueva ecuación empleada para estimar el factor de intercepción es versátil, debido a que puede ser aplicada tanto a concentradores de disco parabólico como a concentradores de secciones de disco parabólico ajustando los límites de integración.

Agradecimientos

El autor extiende su agradecimiento a CONAVI por el apoyo para la realización del proyecto CONAVI-2009-01-1 271 56 y de igual manera a CONACYT e ITESCA .

Referencias

C. J. Winter, R. Sizmann, L. Vant-Hull, *Solar Power Plants - Fundamentals, Technology, Systems, Economics*. Springer-Verlag, Berlin, 1991. pp 225 275.



DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIJO

ANEXO 3.

“Estudio comparativo entre un concentrador solar continuo y uno segmentado”,

Entorno Académico. Vol 9. ISSN 1870-5316. (artículo de divulgación, en revista arbitrada)

Estudio Comparativo entre un Concentrador Solar Continuo y uno Segmentado

The first case relates to a reflector surface constructed with circular segments of 0.05 m in the second case by a continuous surface reflector ideal, for it is developed and applied a methodology for computer-aided optical design in order to obtain simulation models allowing computer system characteristics of concentrator. The results show that feasibility of employing reflector surfaces with smaller segments than 0.05 m, which unlike the continuous reflector, this allows tracking errors till 2 degrees.

José Efrén Ruelas Ruiz. Profesor Investigador del Instituto Tecnológico Superior de Cajeme.
Nicolás Velázquez Limón. Jefe del Centro de Estudios de las Energías Renovables de la Universidad Autónoma de Baja California.
Ricardo Beltrán Chacón. Estudiante del Doctorado de la Universidad Autónoma de Baja California.

Resumen

El presente artículo se refiere al estudio comparativo entre las superficies de un reflector continuo y uno segmentado de un Concentrador Solar tipo Scheffler (CSTS), cuyas dimensiones de reflector y receptor están dadas de acuerdo a la demanda térmica de un motor Stirling de 2.75 kWe. La comparación se realiza con el fin de conocer la distribución de los rayos en el receptor. El primer caso se refiere a una superficie de reflector construido con segmentos circulares de 0.05 m y en segundo caso por un reflector de superficie continua ideal, para ello se desarrolla y aplica una metodología de diseño óptico asistido por computadora con el objetivo de obtener modelos de simulación por computadora que permitan establecer las características del sistema de concentración. Los resultados obtenidos muestra que es factible de emplear superficies de reflector con segmentos menores a los 0.05 m, que a diferencia de el reflector continuo, este permite tener errores de seguimiento de hasta 2 grados.

Abstract

This article refers to the comparative study between a segment surfaces reflector and a continuous surfaces reflector for a Solar Concentrator type Scheffler (CSTS), the dimensions of the reflector and receiver are given according to the thermal demand of 2.75 kW Stirling engine. The comparison is made for know the distribution of the rays on the receiver.

Keywords: Simulation, Optics, Solar Concentrator, Scheffler, Stirling.

Q_{abs} Radiación incidente en el absorbedor [W/m²]

I_d Radiación solar incidente [W/m²]

A_{ap} Área de apertura [m²]

ρ Reflectancia de la superficie

φ Factor de intercepción

Palabras clave

Simulación, Óptico, Concentrador Solar, Scheffler, Stirling.

Introducción

El presente trabajo forma parte de la investigación que plantea el desarrollo teórico y experimental de un concentrador solar con absorbedor fijo, para generación eléctrica mediante un motor Stirling de 2.75 kW, que se lleva a cabo en el Centro de Estudio de las Energías Renovables de la Universidad Autónoma de Baja California. Inicialmente se piensa en un concentrador solar con absorbedor fijo para mejorar y facilitar el desarrollo de la tecnología de generación eléctrica distribuida por medio de motores Stirling con aplicación en los sectores rurales aislados o zonas urbanas que no cuentan con el suministro de energía eléctrica, sin descartar, posibles aplicaciones alternas de esta tecnología, la cual está en crecimiento debido a los problemas de dependencia del petróleo y calentamiento global del planeta.

Se han realizado simulaciones con la técnica de trazado de rayos en concentradores solares de disco parabólico [1] para concentradores tipo fresnel [2] y también se han aplicado en estudio del comportamiento de los concentradores en edificaciones [3], sin embargo no se cuenta con un estudio o simulación de trazado de rayos en concentradores solares tipo Scheffler; por ello, en el presente trabajo se desarrolla una metodología para realizar simulación empleando la técnica de trazado de rayos, que permita estudiar el comportamiento óptico de las reflexiones, entre un reflector solar tipo Scheffler [4] y una cavidad de absorbente de foco fijo, de dimensiones que corresponden a un motor Stirling de 2.75 kW eléctricos [5].

Desarrollo

El presente estudio plantea una metodología con la finalidad de obtener el modelo de CAD y el comportamiento óptico del reflector tipo Scheffler, mediante análisis del primer caso, el cual corresponde a un reflector con superficie construida con segmentos circulares de 0.05m y el segundo caso corresponde al reflector con superficie continua. La metodología es aplicada en un sistema de concentración solar compuesto por un reflector solar acoplado a un receptor de cavidad cuyas dimensiones que corresponde a un motor Stirling de 2.75 Kw eléctricos, estos equipos incluyen sistemas adicionales como es el caso de estructuras de soporte y sistemas de seguimiento, como se muestra en la figura 1.

Referente a la metodología empleada para realizar la simulación del comportamiento óptico del concentrador (figura 2), esta compuesta por las siguientes etapas: Obtención de las variables de diseño, dimensionado de acuerdo al modelo geométrico del reflector tipo Scheffler, Obtención del modelo de CAD, Simulación de las reflexiones empleando la técnica de trazado de rayos. En la figura 2 se aprecia que la etapa de trazado de rayos, se puede analizar el comportamiento del concentrador, para diferentes variantes geométricas del reflector.

En una primera etapa se obtienen las dimensiones geométricas tanto de la parábola: área de apertura con diferentes geometrías, ajustadas a las especificaciones de espacio disponible y las especificaciones de concentración de energía radiante en el receptor del motor Stirling [5], tabla 1.

La ecuación 1, permite cuantificar la cantidad de energía solar captada por un concentrador solar [6] y con ella calcular el área de apertura del reflector.

$$Q_{abs} = I_d \cdot A_{ap} \cdot \rho \cdot \varphi \quad (1)$$

Ahora tomando en cuenta las condiciones de altura dadas por la ecuación 2, se establecen por medio de la ecuación de la parábola del punto focal (p) corresponde a 2 m de alto.

$$y = \frac{x^2}{4p} \quad (2)$$

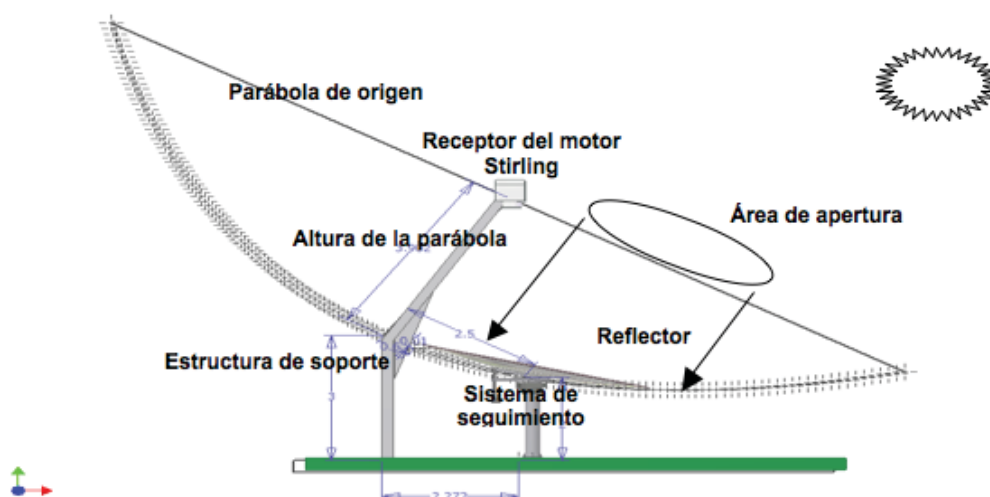


Figura 1. Esquema del concentrador tipo Scheffler.

Tabla 1. Especificaciones de demanda de energía.

DEMANDA ENERGÉTICA DEL MOTOR STIRLING	
Área de Absorbedor	840 cm ²
Radiación requerida Absorbedor	6600 W térmicos

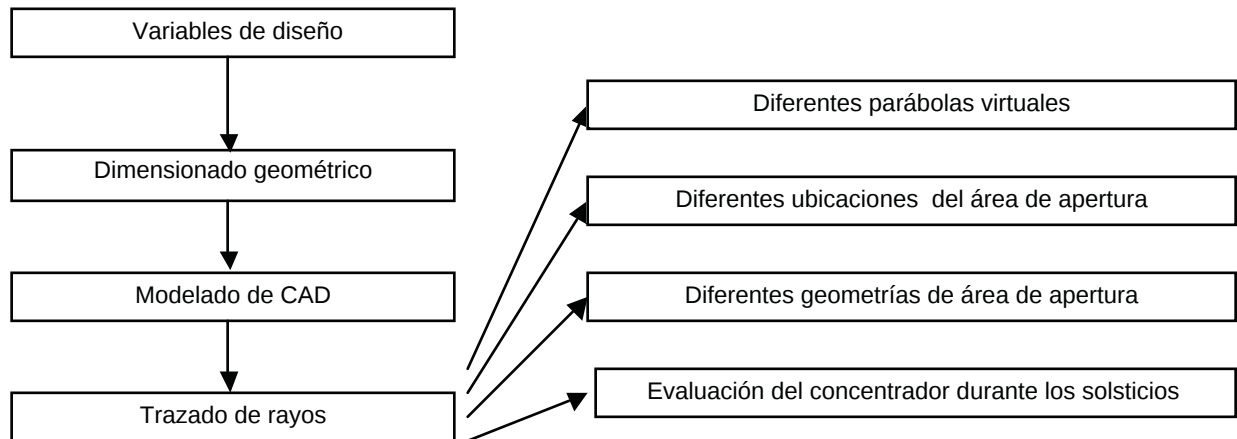


Figura 2. Diagrama de flujo para el estudio óptico del concentrador.

Posteriormente se estudian geometrías de área de apertura correspondientes a un rectángulo, una elipse y un círculo. A dichas geometrías se calcula sus dimensiones, según sea el caso para emplear estos datos anteriores en los modelos de CAD como se muestran en la figura 2, la cual corresponde a una área de apertura circular.

Finalmente para la obtención de las medidas del reflector Scheffler, se realiza una intersección con el área de apertura circular perpendicular al plano y la parábola virtual, apoyándose en el software de CAD como se muestra en la figura 3.

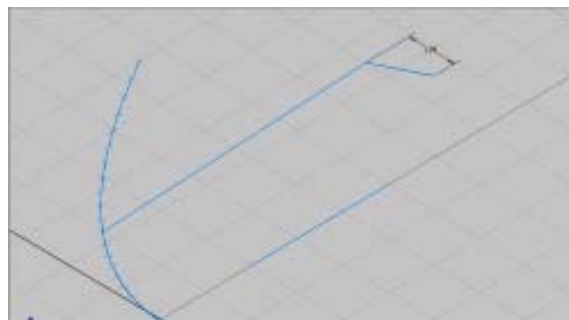


Figura 2. Parábola virtual y radio del área de apertura

Como resultado de esta operación se obtiene un sólido en 3D correspondiente al reflector Scheffler con área de apertura circular, para los otros casos (área de apertura cuadrada y elíptica) se tiene que repetir las operaciones de anteriores.

Simulación y estudio óptico para el caso I.

Primeramente en el software de trazado de rayos, se especifican las propiedades de reflector que en este caso es un espejo perfecto y del absorbedor que en este caso corresponde a un absorbedor perfecto, para después ubicar el reflector y absorbedor en el espacio X, Y, Z correspondiente a la parábola virtual, los

objetos de soporte, la dirección y dimensión de la retícula de rayos que incidirán sobre el reflector. En la figura 4 se muestra el comportamiento de las reflexiones para las diferentes geometrías analizadas y a manera de ilustración, se aplica un mayado de 15 rayos por división con el objetivo de poder apreciar las diferentes geometrías de reflector.

Posteriormente, se determina si el reflector opera con una buena concentración durante todo el año, para ello es necesario calcular la posición del sol, en los solsticios y modificar la dirección de los rayos en el software de modelado óptico.

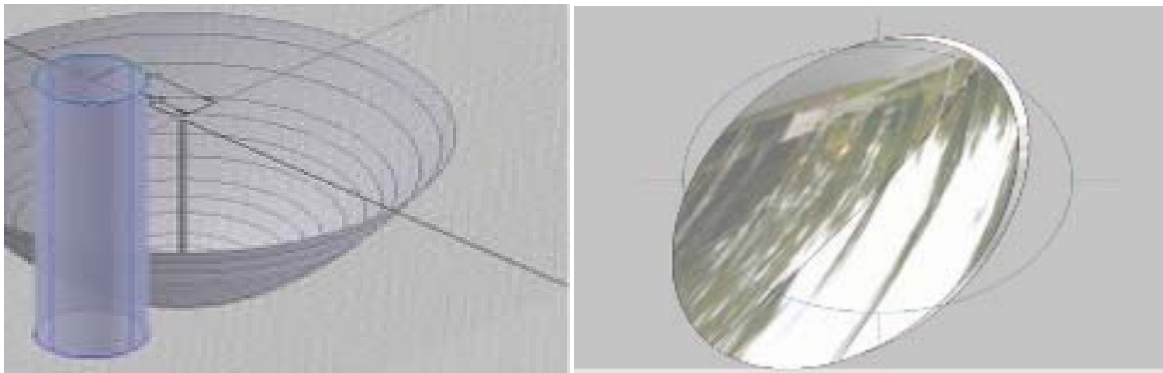


Figura 3. Proceso de obtención del modelo en 3D del reflector Scheffler

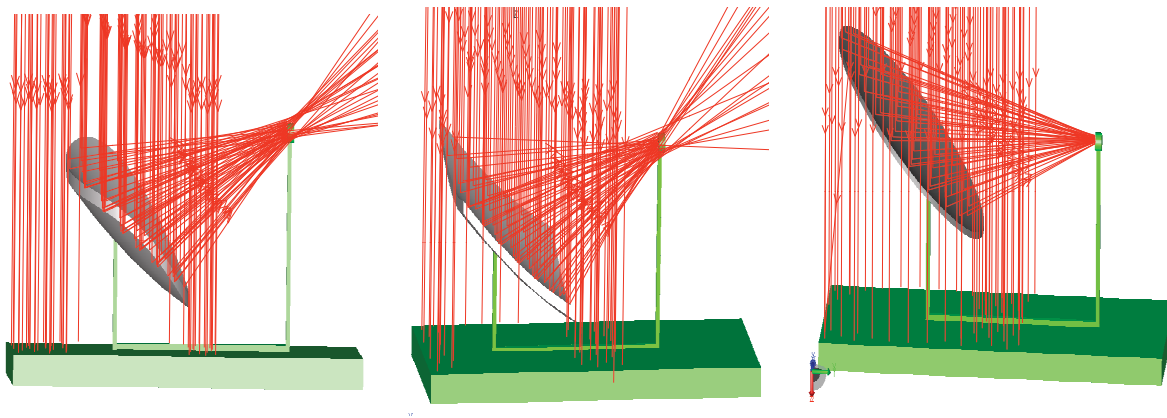


Figura 4. Trazado de rayos, para diferentes áreas de apertura (elíptica, rectangular, circular).

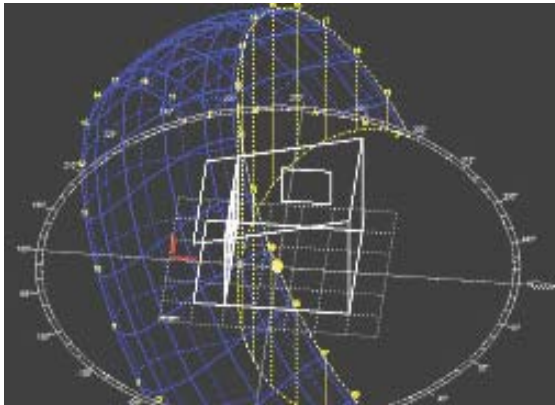


Figura 5. Diagrama de posición solar que corresponde a Mexicali

En la figura 5 se muestra el diagrama de trayectoria solar anual y se emplea como referencia para orientar el reflector de acuerdo a la ubicación geográfica del lugar, que en este caso corresponde a la ciudad de Mexicali. Posteriormente en el software de trazado de rayos se especifica la dirección y dimensión de la malla rayos de acuerdo con los ángulos calculados de la ubicación del sol. A manera de ejemplo en la figura 6 se muestra el colector ajustado a la posición del sol correspondiente al las 12:00 del solsticio de verano.

Adicionalmente se evalúa el porcentaje de rayos que inciden en el reflector y absorbedor. Para garantizar que toda el área del reflector está cubierta por rayos, se verifica la parte posterior, como se muestra en la figura 6. Finalmente se genera un reporte de la cantidad de rayos que inciden en las caras de los objetos correspondientes a la superficie del reflector y el absorbedor.

En este caso se obtiene la imagen que forman los rayos que inciden en el absorbedor, que se forma como resultado de la orientación del colector durante los solsticios. En la figura 7 se muestra a manera de ilustración la imagen que se obtiene en el absorbedor correspondiente al solsticio de verano a las 13:00

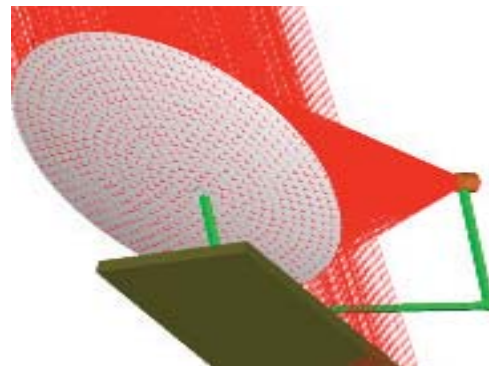


Figura 6. Orientación del reflector solar correspondiente al 21 de junio a la 12:00.



Figura 7. Imagen del el absorbedor correspondiente al solsticio de verano a las 13:00

En este caso se obtuvo que la geometría de área de apertura circular presente tiene mayor concentración de acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 2, debido a que esta geometría es la que tiene una distribución de su área más puntual respecto a las otras.

Tabla 2. Evaluación de la incidencia de rayos para diferentes geometrías de área de apertura.

Geometría del área de apertura	Cantidad de rayos en el reflector	Cantidad de rayos en el en el absorbedor	Porcentaje de concentración de rayos
Rectangular	4883	2481	50.8
Elíptica	5522	2733	49.5
Circular	4413	4413	100

La imagen de mayor concentración que se obtiene en la fecha del 21 de junio a las 12:00 como se muestra en la figura 8 y la menor concentración que se obtiene en la fecha del 21 de diciembre a las 12:00. Esto es debido a que la orientación del colector y la dirección de la incidencia de los rayos sol, provocan una incremento en la dispersión de los rayos reflejados en el absorbedor.



Figura 8. Imágenes de la variación de la concentración de rayos en el receptor.

Fecha y hora	Cantidad de rayos en el reflector	Cantidad de rayos en absorbedor	Porcentaje de concentración
21_junio_12:00	5670	5670	100
21_junio_13:00	4434	4434	100
21_junio_14:00	4244	4244	100
21_junio_15:00	4328	4328	100
21_junio_16:00	4765	4765	100
21_junio_17:00	4785	4785	100
21_junio_18:00	4338	4338	100
21_junio_19:00	4554	4554	100
21_Dic_12:00	4550	4550	100
21_Dic_13:00	4588	4588	100
21_Dic_14:00	4548	4548	100
21_Dic_15:00	4802	4802	100
21_Dic_16:00	4765	4765	100
21_Dic_17:00	4768	4768	100
21_Dic_18:00	4706	4706	100

La evaluación del porcentaje de concentración (tabla 3), se lleva a cabo a partir del medio día aprovechando el comportamiento simétrico de la posición del sol durante el día y para los solsticios de verano e invierno que corresponden en un año 21 de junio y 21 de diciembre. La evaluación del comportamiento promedio del reflector resultó, tener una concentración del 100% de los rayos, sin embargo se tiene una variación en la cantidad de rayos que intercepta el reflector. Se obtuvo una máxima disminución en la cantidad de rayos concentrados de rayos de 11.6% y un promedio de 4.4 % (figura 9).

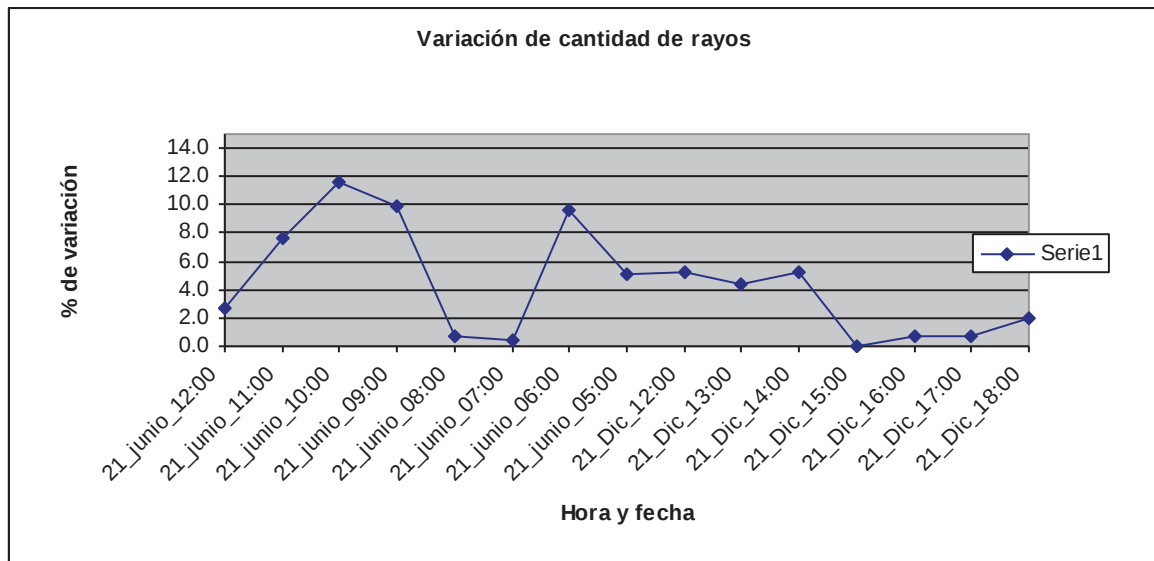


Figura 9. Porcentajes de rayos concentrados en los solsticios.

Simulación y estudio óptico para el caso II.

Para el análisis del caso II, que se refiere al análisis óptico de un concentrador solar construido con una superficie continua, se realizan las mismas comparaciones que en el caso anterior. En este caso la variación en la imagen debida a la geometría del área de apertura no afecta a la concentración puntual, figura 10.

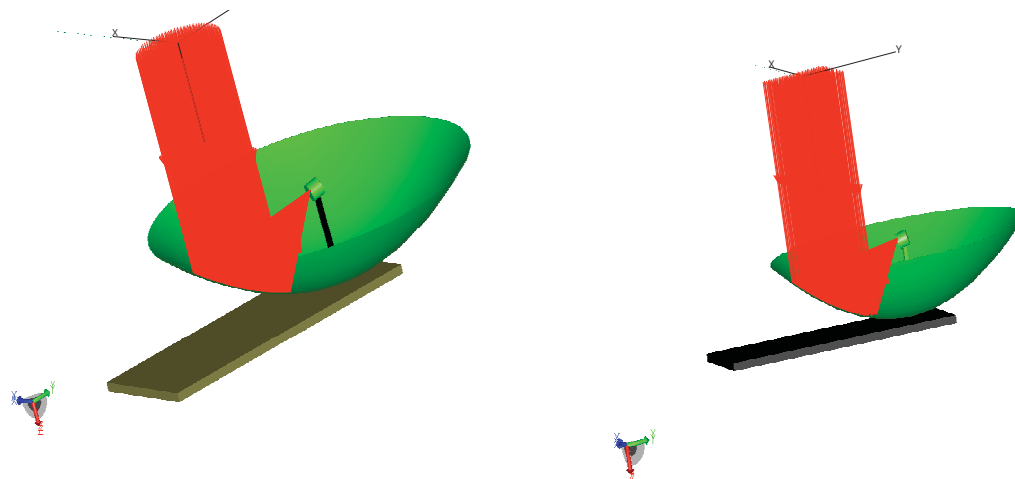


Figura 10.- Distribución de los rayos para un reflector de área de apertura elíptica.

En la figura 11 se muestra que el tener un reflector de superficie continua permite manejar errores de seguimiento solar menores a 2 grados, sin embargo cabe mencionar que hacen falta involucrar los aspectos estructurales y de seguimiento solar que conforman el sistema, los cuales se contemplan en otras investigaciones.

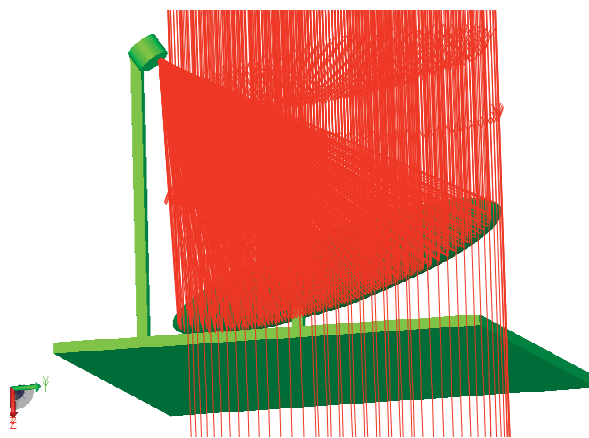


Figura 11.- Desviación de la imagen de concentración.

Conclusiones

Ambos caso estudiados proporciona la concentración de rayos requerida en una área de apertura de diámetro de 30cm para el motor stirling en cualquier fecha del año, pero con una concentración diferente, esto permite inferir que conviene emplear un CSTS con geometría lo mas continua posible.

Para el primer caso (reflector construido con segmentos circulares), la imagen que se obtiene en el absorbedor se comporta como un abanico que incrementa su tamaño debido a la orientación del reflector, esto varía de acuerdo con la orientación del colector, pues los rayos sol al ser reflejados tienen que viajar mayores distancias, incrementado la dispersión de la imagen en el receptor.

Ambos tipos CSTS requieren que el reflector tenga seguimiento de forma continua que garantice la incidencia normal de los rayos. sin embargo para el segundo caso (reflector continuo) permite errores seguimiento mayores debido a la concentración puntual y el área del receptor.

En un CSTS de geometría continua y seguimiento en 2 ejes, se puede emplear la geometría del área de apertura que más convenga para reducir las pérdidas térmicas sin afectar la concentración.

La herramientas de CAD en interacción con software de simulación óptica proporciona una herramienta que permite conocer el comportamiento del sistema de concentración solar antes de ser diseñando y evaluar el reflector en un periodo corto de tiempo.

Referencias

- [1] Rojas, Fernández Reche j. (2008). Metodología de la realización del estudio teórico del trazado de rayos del concentrador solar distal I. XIV congreso iberoamericano de energía solar. Vigo Galicia España. 497-502.
- [2] Pujol et al. (2008). Análisis de un concentrador solar lineal con reflector estacionario y foco móvil para aplicaciones de media temperatura. XIV congreso iberoamericano de energía solar. Vigo Galicia España. 515-518.
- [3] Chemisana Villegas D. (2009). Diseño y caracterización de un concentrador térmico fotovoltaico para integración arquitectónica, tesis doctoral. Universidad de Lleida España

[4] Wolfgang S. (2006). Introduction to the revolutionary design of Scheffler reflectors. Solar Bruecke Alemania. (paper)

[5] Beltrán R., Velázquez N. (2006). Proceedings Adaptation and study of a satellite dish like solar collector for a system of solar thermal power generation. Proceedings of ANES/ASME Solar Joint XXX Mexican National Solar Energy.

[6] Duffie, J. Beckman W. (1980). Solar energy thermal processes. New York. Wiley Interscience.

Nota Autobiográfica

M.I. José Efrén Ruelas Ruiz. Es Ingeniero en Electrónica por el ITSON, Maestro en Ingeniería por la UNAM y actualmente es Candidato a Doctor por la UABC. Profesor Investigador del Instituto Tecnológico Superior de Cajeme. jose.ruelas@uabc.edu.mx

Dr. Nicolás Velázquez Limón. Investigador y Jefe del Centro de Estudios de las Energías Renovables del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. nicolas.velazquez@uabc.edu.mx

Dr. Ricardo Beltrán Chacón. Doctor en Ingeniería por la UABC. Actualmente se desempeña como profesor de la Universidad Autónoma de Baja California. rbeltran@uabc.edu.mx

ANEXO 4.

Solicitud de patente: “Concentrador solar de foco fijo para múltiples propósitos”

Solicitud de patente y expediente en trámite en las oficinas regionales del IMPI en la UABC.

IMPI-00-009

Consideraciones generales para su llenado:

- Este formato es de distribución gratuita. Se autoriza su libre reproducción, siempre y cuando éste no sea alterado y sea presentado impreso su anverso (Página 1) y reverso (Página 2) en una sola hoja de papel blanco y en tamaño oficio.
- Debe llenarse en idioma español, preferentemente a máquina. No obstante, podrá presentarse con letra de molde, siempre que la solicitud sea legible. La información de la solicitud debe ser requisitada toda por el mismo medio, sin tachaduras ni enmendaduras.
- El formato de solicitud por duplicado, debidamente requisitado y firmado en todos sus ejemplares, así como sus documentos anexos, deben presentarse en la Coordinación Departamental de Recepción y Control de Documentos de la Dirección Divisional de Patentes del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, con domicilio en Arenal # 550, Pueblo Santa María Tepepan, Delegación Xochimilco, C.P. 16020, México, D.F., con horario de atención de 8:45 a 16:00 horas de lunes a viernes o en la ventanilla de las Oficinas Regionales del IMPI o las Delegaciones o Subdelegaciones Federales de la Secretaría de Economía.
- También podrá remitirse la solicitud por correo, servicios de mensajería u otros equivalentes o, en su caso, presentarse por transmisión telefónica facsimilar, en los términos previstos en el artículo 5o. del Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial.
- Los documentos anexos redactados en idioma distinto al español deberán acompañarse de la traducción correspondiente.
- Los documentos anexos provenientes del extranjero, cuando proceda, deberán acompañarse de la legalización o, en su caso, apostilla correspondiente.
- En el formato de solicitud marque con una X en el recuadro la solicitud que desea presentar.
- En caso de Registro de Diseño Industrial señale además si se trata de un modelo o un dibujo.
- La denominación o título debe ser connotativa de la invención.
- Si la invención fue divulgada dentro de los doce meses previos a la fecha de presentación de la solicitud, indique la fecha de divulgación y anexe la información comprobatoria que marca el Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial.
- En la solicitud de invención que sea divisional de una solicitud previamente presentada, deberá proporcionar el número de expediente, la figura jurídica y la fecha de presentación de dicha solicitud.
- El derecho de reclamar la prioridad sólo tiene lugar si la presente solicitud ha sido previamente presentada en algún país miembro del Convenio de París para la Protección de la Propiedad Industrial. Proporcionar los siguientes datos:
- País donde se presentó por primera vez la solicitud, fecha y número asignado a la solicitud en dicho país.
- En el listado de documentos que se anexan mencione el total de hojas que comprende cada documento y al final el total de hojas

Trámite al que corresponde la forma: Solicitud de Patente, Registro de Diseño Industrial y Registro de Modelo de Utilidad.

Número de Registro Federal de Trámites y Servicios: IMPI-03-001-A, IMPI-03-001-B, IMPI-03-002-A, IMPI-03-002-B, IMPI-03-003-A, IMPI-03-003-B, IMPI-004-A, IMPI-03-004-B.

Fecha de autorización de la forma por parte de la Dirección General Adjunta de Propiedad Industrial del IMPI: 15-II-2010.

Fecha de autorización de la forma por parte de la Comisión Federal de Mejora Regulatoria: 1-III-2010.

Fundamento jurídico-administrativo:

Ley de la Propiedad Industrial. Arts. 38-47, 50, 52, 54 53, 55,-61 (D.O.F. 27-VI-91, (D.O.F. 27-VI-91, reformas D.O.F. 02-VIII-94; 25-X-96, 26-XII-97, 17-V-99, 26-I-04, 16-VI-05, 25-I-06, 06-V-09 y 06-I-2010).

Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial. Arts. 5-8, 16, 24-39, 43, 45 y 46. (D.O.F. 23-XI-94, reformas D.O.F. 10-IX-02 y 19-IX-03).

Acuerdo por el que se establecen las reglas para la presentación de solicitudes ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Arts.3-10 y 34 (D.O.F. 14-XII-94, reforma 22-III-99, 14-XII-00, 20-VI-03 y 11-VII-03).

Acuerdo por el que se da a conocer la tarifa por los servicios que presta el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Art. 1 inciso a); 9, inciso a) y demás aplicables (D.O.F. 23-VIII-95, reformas 28-XII-95, 10-XII-96, 2-V-97, 4-V-98 y 23-II-99, 11-X-00, 17-X-01, 13-XI-01, 24-XII-01, 27-II-02, 14-III-02, 14-XI-02, 04-II-03, 8-X-03, 27-X-04, 23-III-05, 13-IX-07, 23-II-09, 10-VIII-09 y 24-VIII-09).

Acuerdo por el que se da a conocer la lista de instituciones reconocidas por el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial para el depósito de material genético (D.O.F. 30-V-97).

Acuerdo por el que se establecen reglas y criterios para la resolución de diversos trámites ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Art. 4-18 (D.O.F. 9-VIII-04).

Acuerdo por el que se dan a conocer los horarios de trabajo del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. Art. 3 y 6 (D.O.F. 31-III-99).

Documentos anexos:

Solicitud de Patente y Registro de Modelo de Utilidad

- Comprobante de pago de la tarifa correspondiente (original y copia)
- Descripción, reivindicación, resumen y dibujo (duplicado)

Solicitud de Registro de Diseño Industrial

- Comprobante de pago de la tarifa (original y copia)
- Descripción, reivindicación y dibujo o fotografía (duplicado)

Documentos adicionales que deberán presentarse en su caso:

- Constancia de depósito de material biológico
- Acreditación de personalidad del apoderado, en su caso (original)
- Acreditación del poderante en el caso de persona moral, señalando el instrumento donde obran dichas facultades y acta constitutiva (original)
- Documento donde se acredita el carácter del causahabiente o de cesión de derechos (original)
- Documento comprobatorio de divulgación previa, en su caso (original y copia)
- Documento de prioridad y su traducción, en su caso (copia certificada expedida por la oficina extranjera)
- Escrito solicitando el descuento del 50%, cuando corresponda (original)

Criterios de resolución del trámite

- Presentar toda la documentación requerida y pagos de la tarifa conforme a la legislación nacional y convenios internacionales de los que México forma parte.
- Será suficiente el cumplir con los requisitos formales al momento de presentar su solicitud.

Tiempo de respuesta:

El plazo máximo de primera respuesta es de 3 meses. No aplica la positiva ni la negativa ficta.

Número telefónico para quejas:

Órgano Interno de Control en el IMPI
5624-04-12 ó 13 (directo)
5624-04-00 (conmutador)
Extensiones: 11028 y 11234.
Fax: 56-24-04-35
Correo electrónico: quejanet@impi.gob.mx

Para cualquier aclaración, duda y/o comentario con respecto a este trámite, sírvase llamar al Sistema de Atención Telefónica a la Ciudadanía-SACTEL a los teléfonos: 20002000 en el D.F. y área metropolitana, del interior de la República sin costo para el usuario al 01-800-11205-84 o desde Estados Unidos y Canadá al 1-800-475-23-93.

Número telefónico del responsable del trámite para consultas: 53 34 07 00 extensiones 10098 y 10026.

CONCENTRADOR SOLAR PUNTUAL DE FOCO FIJO PARA MULTIPLES PROPOSITOS

CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION

5 La presente invención se refiere a un captador, concentrador de la radiación solar, que por medio de una superficie reflejante y un mecanismo de seguimiento, dirige la radiación captada a un receptor fijo con mejoras en eficiencia y operación respecto a otros concentradores, además permite incorporar un sistema de fuego directo, para proporcionar la energía térmica a un motor Stirling. El novedoso concentrador solar
10 es una excelente opción para los sistemas de generación de vapor solar, destilación solar, fundición de aluminio y generación eléctrica con motores Stirling. Tiene características técnicas muy recomendables para satisfacer las diferentes necesidades de energía térmica de alta temperatura (de más 250 °C) de los sectores residencial, comercial, industrial, ganadero, agrícola y energético. Por lo tanto
15 considero que la presente invención pertenece a las patentes de tipo mecánico.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Actualmente es bien conocida y documentada la existencia de concentradores solares de foco fijo, siendo la tecnología de torre central una de las más populares, las cuales cuentan con diferentes componentes patentados, por ejemplo se
20 encuentran patentes de torre central (WO2007099184A1, WO05050103A1), de heliostatos (AU4997979, ES2155031), de sistemas de seguimiento (US4519382, US4564275), de incorporación de plantas térmicas con torre central (WO9511371) por mencionar algunas. Su funcionamiento consiste en mantener el haz de luz solar de los espejos reflejado sobre un blanco fijo, para ello el diseño incluye
25 generalmente una gran área de reflexión, una estructura mecánica para sostener los espejos y soportar los vientos, además cuentan con varios motores para darles el movimiento y orientación requeridos, así como con dispositivos electrónicos de control de seguimiento, como computadoras o microcontroladores los cuales calculan para cada helióstato, el desplazamiento necesario para seguir proyectando
30 el haz de luz solar sobre el blanco fijo. Sin embargo esta tecnología para lograr la factibilidad técnica y económica requiere de grandes áreas de captación, por ejemplo

la planta Solar-One que empleo heliostatos de un tamaño de 40 m^2 , o la planta PS-10 de 120 m^2 . Este crecimiento se debe principalmente a los costos de la superficie del reflector, seguimiento mecánico que en ocasiones llegan a ser casi la mitad del costo total del heliostato. Otro factor que influye en el agrandamiento de los heliostatos es el cableado de control y de energía eléctrica que se requiere llevar a cada uno de estos a lo largo de todo el campo. (Gregory J. Kolb, 2007)

Una tecnología de concentración solar fija que no tiene problemas de requerir de grandes áreas de captación es la Fixed Solar Concentrator-Collector-Satelite Receiver and Co-Generator (patente US4490981) otorgada el año de 1985, esta invención se refiere al concentrador solar que emplea un segundo reflector y un vidrio fractal para capturar la radiación solar en un receptor satélite, que se ubica de acuerdo con la posición solar para generar energía, por medio de un ciclo rankine y celdas fotovoltaicas, sin embargo en esta invención ve disminuida la eficiencia óptica del concentrador por contar con más de un espejo para direccionar la radiación solar además de contar con un receptor, que no encuentra fijo y que ocasiona problemas de sombreado, al encontrarse justo en área de captación de la radiación solar.

Una tecnología de concentración solar de foco fijo que soluciona el problema de sombreado ocasionada por el receptor, se plantea en la patente del concentrador solar HTC (patente EP0045921), del cual se tiene referencias sobre su desarrollo en Alemania en el año de 1982 a raíz de la patente de la comunidad europea, en la cual se reporta que el reflector y el receptor se ubican dentro de una paraboloide rotada 45° respecto al eje principal que proporciona la ubicación del absorbedor fijo, además menciona que se tiene espejos de peso ligero contruidos con lámina, su aplicación inicial se da para aplicaciones de generación de vapor. La aplicación de esta tecnología para la generación de electricidad por medio de motores Stirling, se reporta en el año de 1992, para ello se le hacen algunas modificaciones como: espejos, estructura y superficie de reflexión, la cual es dividida en 6 facetas, formadas por láminas al vacío que son abatibles para vientos fuertes, además de la incorporación de rieles que guían el movimiento del reflector. Sin embargo, de esta tecnología solo se reporta la construcción de tres equipos y se dejó de construir, debido a que fue remplazada por la tecnología de disco parabólico, dado que requería de estructuras muy complejas con mantenimiento continuo, aunando que la

eficiencia del motor Stirling es atenuada por las pérdidas por convección en el absorbedor que se encontraba orientada a 45 grados respecto a su base (William B 1994).

Otra tecnología de concentración solar puntual de foco fijo, es el concentrador solar Scheffler, esta tecnología pertenece al dominio público y se desarrolla con la finalidad de que permitiera cocinar con la energía del sol de la manera más cómoda posible, al mismo tiempo, el aparato debía estar construido de tal forma, que pudiera ser elaborado en cualquier taller de soldadura rural, después de una cierta fase de formación. En base a lo anterior se ideó tomar de una sección de parábola cuyo ángulo de borde es superior a los 90 grados, donde el foco de la parábola completa estuviera en el interior de una vivienda y además permaneciera fijo (Wolfgang S. 2006). De este concentrador se han reportado otras aplicaciones en desalado, destilador, esterilizador solar, sin embargo esta tecnología presenta algunos inconvenientes entre ellos presenta una gran área de reflector, un sistema de seguimiento poco preciso, una eficiencia en el receptor atenuada por el hecho de emplear un segundo concentrador.

Es por eso que con la finalidad de suprimir los inconvenientes que presentan los concentradores solares puntuales de foco fijo antes mencionados, se pensó en el desarrollo de una nuevo concentrador solar puntual de foco fijo el cual se pretende proteger en la presente solicitud, ya que es de una construcción más sencilla, mejor operación y tiene mayor eficiencia en la conversión de la energía solar a energía térmica.

DESCRIPCIÓN

Los detalles característicos del presente **CONCENTRADOR SOLAR PUNTUAL DE FOCO FIJO QUE CAPTA, CONCENTRA Y CONVIERTE LA RADIACIÓN SOLAR EN ENERGÍA TÉRMICA** se muestran claramente en la siguiente descripción y en las figuras que se acompañan, siguiendo los mismos signos de referencia para indicar las partes y piezas mostradas. Sin embargo, dichas figuras se muestran a manera de ejemplos y no deben considerarse como limitativas para la presente solicitud.

- La figura 1 es una vista en perspectiva convencional del concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica donde se muestran los diferentes mecanismos que comprende el concentrador.
- 5 La figura 2 es una vista en perspectiva convencional vista desde el extremo superior donde el acoplamiento y movimientos de los mecanismos de seguimiento del concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica.
- 10 La figura 3 es una vista en lateral del concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, donde se ilustra la sección geométrica correspondiente al reflector.
- 15 La figura 4 es una vista en perspectiva convencional acercada del acoplamiento del mecanismo de seguimiento al reflector del concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica.
- La figura 5 es una vista en perspectiva convencional acercada del receptor del concentrador solar que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica donde se indican los detalles del receptor.
- 20 La figura 6 es una vista en perspectiva convencional de **una primera variante** del soporte fijo del concentrador solar que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, para proporcionarle mayor rigidez a esta estructura.
- 25 La figura 7 es una vista en perspectiva convencional de **una primera variante** del mecanismo de seguimiento diario del concentrador solar que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, de menor costo y facilidad de construcción.

Con base en las figuras 1,2,3,4 y 5 del concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica se establece que está compuesto por:

5 **Un mecanismo de soporte** el cual comprende al menos una estructura de **soporte fija** (1) perpendicular y sujeto al piso con al menos una base (2), al menos una estructura de **soporte móvil** (3) la cual puede desplazarse de manera semejante a un péndulo debido a que está sujeto en el extremo sujeción (4) del soporte fijo (1) por un medio de sujeción (por ejemplo tornillos, remaches, etc.) a un medio rotatorio (por ejemplo, balero, chumacera, ect), al menos un **riel de refuerzo** (5) sujeto al menos en un extremo a un parte fija por medio de una base (6) y con el espacio en el medio suficiente para permitir el desplazamiento transversal (7);

10 **Un mecanismo de seguimiento horario** el cual comprende un motor con engrane superior (8), el cual se acopla a un engrane de mayor diámetro (9) sobre el cual se encuentra sujeta una flecha (10), la cual está centrada por medio de una chumacera superior (11) y una chumacera inferior (12), en la parte superior de la flecha (10) se encuentra una base de sujeción del reflector
15 (13) con una inclinación 25 respecto a la base de la flecha. La base de sujeción (13) para acoplar al mecanismo de seguimiento diario cuenta también con otra base de sujeción (14) para acoplar al mecanismo de reflexión;

20 **Un mecanismo de seguimiento diario** el cual comprende un mecanismo de desplazamiento (16) (por ejemplo un actuador lineal, un motoreductor, ect) sujeto en un extremo al soporte fijo (17) por un medio de sujeción (por ejemplo tornillos, remaches, etc.) y en otro extremo sujeto al soporte móvil por otro por un medio de sujeción (18) (por ejemplo tornillos, remaches, etc.), el cual desplaza al soporte móvil (3) de manera proporcional a la declinación y de manera semejante a un péndulo debido a que el soporte móvil (3) se
25 encuentra sujeto en el extremo superior al soporte fijo (4) y en el otro extremo se encuentra una base de sujeción (19) para acoplar al mecanismo de seguimiento horario;

30 **Un mecanismo de reflexión** el cual corresponde a una superficie reflectiva (15) que es un segmento de una parabólica cuyo ángulo de borde es 45 y gira sobre un eje (20), que orienta dicha superficie, de forma que dirige los rayos al punto focal donde se encuentra el mecanismo de absorción fijo. Dicha superficie cuenta con una estructura de sujeción (21) (por ejemplo: fibra de

vidrio, tubulares de acero, soporte de plástico, ect) para lograr una mejor firmeza además de una base de sujeción (22) construida con algún material o compuesto sólido (por ejemplo: fibra de vidrio, tubulares de acero, soporte de plástico, ect) para acoplar al mecanismo de seguimiento horario;

- 5 **Un mecanismo de absorción** el cual comprende un receptor (23) de cavidad abierta (24) en el cual se encuentra los tubos del absorbedor (25) la entrada y salida del fluido de trabajo y en las paredes de la cubierta del receptor (23) se encuentran cubierta por un material aislante (26), que disminuye las pérdidas del calor de interior de receptor, dicho receptor se encuentra instalado en la
- 10 parte superior del soporte fijo (1).

En base a las figuras 1, 2, 3, 4 y 5 se muestra el acoplamiento del mecanismo de soporte, mecanismo de seguimiento horario, mecanismo de seguimiento diario, mecanismo de reflexión y mecanismo de absorción del concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, el

15 cual permite mantener el mecanismo de absorción fijo y con una orientación que favorece la transferencia de calor al fluido de trabajo, lo cual resuelve los problema de disminución de la eficiencia térmica en el receptor debida al cambio de inclinación del receptor ocasionada por el seguimiento solar y además posibilita el uso de fuego directo para el calentamiento del receptor por medio de biocombustibles o cualquier

20 otro combustible.

De acuerdo con la figuras 3, representa a manera de ejemplo un cambio en la posición del concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica para el día 21 de diciembre, además se ilustra la obtención geométrica del reflector, la cual es el resultado de la intercepción de una

25 área de apertura circular (27), con una parábola de ángulo de borde de 45 grado (28) con distancia focal (29), alineada respecto el extremo sujeción (4) del soporte fijo (1) donde se encuentra el punto focal dela parábola (30), el centro del reflector (31) corresponde al centro de área de apertura circular (27).

De acuerdo con las figuras 4, representa un acercamiento en perspectiva al

30 mecanismo de posicionamiento horario para ilustrar mejor la distribución de los componentes, así como el corte angular a la flecha (10) de 24.5 respecto a su propia base, donde es montada la base de sujeción del mecanismo de reflexión (22).

Con base en las figuras 6, se representa una **variante** del concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, la cual consiste en que mejorar la rigidez estructural del soporte fijo (1) mediante la incorporación de materiales de menor costo y modificando su estructura y disposición geométrica.

Con base en las figuras 7, representa una **variante** del concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, la cual consiste en incorporar un motor como actuador lineal (16) que enrolla un cable al mecanismo de posicionamiento horario con la finalidad de ejemplificar alguna de las diversas alternativa de actuador lineal.

FUNCIONAMIENTO DE LA INVENCION

La operación de la invención consiste en que la radiación solar que llega perpendicular al área de apertura al concentrador, impacta directamente con el reflector, el cual se encarga de concentrarla linealmente o dirigirla al receptor fijo donde los tubos del absorbedor con superficie selectiva con alta absorbancia, convierte a energía térmica, dicha energía se transfiere por conducción y convección a un fluido que circula por la parte interior de los tubos del absorbedor. El colector solar de la invención utiliza un mecanismo de seguimiento (mecanismo de seguimiento **B** con un control automático), el cual se encarga de mantener los rayos solares perpendiculares al área de apertura o superficie externa de la cubierta transparente. El fluido caloportador o fluido a calentar puede entrar al tubo absorbedor como líquido subenfriado, líquido saturado, en dos fases (líquido/vapor) e inclusive como vapor saturado y sobrecalentado, para salir bajo las mismas condiciones físicas, pero con una mayor energía y temperatura, lo cual hace a la invención muy versátil, pudiendo satisfacer diferentes necesidades térmicas de los sectores industrial, comercial, residencial, agrícola y ganadero.

REIVINDICACIONES

Habiendo descrito la invención, reclamamos la protección legal que corresponda a lo que consideramos nuestra propiedad y es presentado en las siguientes cláusulas:

- 5 1. Un concentrador solar de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, **caracterizado porque comprende:**

10 **Un mecanismo de soporte** el cual tiene al menos un estructura de **soporte fija** (1) perpendicular y sujeto al piso con al menos una base (2), al menos una estructura de **soporte móvil** (3) la cual puede desplazarse de manera semejante a un péndulo debido a que está sujeto en el extremo superior del soporte fijo (4) por un medio de sujeción (por ejemplo tornillos, remaches, etc.), a un medio rotatorio (por ejemplo, balero, chumacera, ect), al menos un **riel de refuerzo** (5) sujeto al menos en un extremo a un parte fija por medio de una base (6) y con el espacio en el medio suficiente para permitir el desplazamiento transversal (7);

15

20 **Un mecanismo de seguimiento horario** el cual tiene un motor con engrane superior (8), el cual se acopla a un engrane de mayor diámetro (9) sobre el cual se encuentra sujeta una flecha (10), la cual está centrada por medio de una chumacera superior (11) y una chumacera inferior (12), en la parte superior de la flecha (10) se encuentra una base de sujeción del reflector (13) con una inclinación 24.5 grado respecto a la base de la flecha. La base de sujeción (13) para acoplar al mecanismo de seguimiento diario cuenta también con otra base de sujeción (14) para acoplar al mecanismo de reflexión;

25 **Un mecanismo de seguimiento diario** el cual tiene un mecanismo de desplazamiento lineal (16) sujeto en un extremo al soporte fijo (17) por un medio de sujeción (por ejemplo tornillos, remaches, etc.) y en otro extremo sujeto al soporte móvil por otro por un medio de sujeción (18) (por ejemplo tornillos, remaches, etc.), el cual desplaza al soporte móvil (3) de manera proporcional a la declinación y de manera semejante a un péndulo debido a que el soporte móvil (3) se encuentra sujeto en el extremo superior al soporte fijo (4) y en el otro extremo se encuentra una base de sujeción (19) para acoplar al mecanismo de seguimiento horario;

30

5 **Un mecanismo de reflexión** el cual tiene una superficie reflectiva (15) que es un segmento de una parabólica cuyo ángulo de borde es 45 grados y gira sobre un eje (20), que orienta dicha superficie, de forma que dirige los rayos hacia el punto focal donde se encuentra el mecanismo de absorción fijo. Dicha superficie cuenta con una estructura de sujeción (21) (por ejemplo: fibra de vidrio, tubulares de acero, soporte de plástico, ect.) para lograr una mejor firmeza además de una base de sujeción (22) construida con algún material o compuesto solido (por ejemplo: fibra de vidrio, tubulares de acero, soporte de plástico, ect.) para acoplar al mecanismo de seguimiento horario;

10 **Un mecanismo de absorción** el cual tiene un receptor (23) de cavidad abierta (24) en el cual se encuentra los tubos del absorbedor (25) la entrada y salida del fluido de trabajo y en las paredes de la cubierta del receptor (23) se encuentran cubierta por un material aislante (26), que disminuye las pérdidas del calor de interior de receptor, dicho receptor se encuentra instalado en la
15 parte superior del soporte fijo (1).

2. El concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, de la reivindicación 1, donde el mecanismo de reflexión se **caracteriza además porque** la geometría de soporte del reflector corresponde a un segmento de una parabólica, cuyo ángulo de borde
20 disminuye el área de superficie reflectiva al emplear la mayor concentración geométrica con orientación que permite dirigir los rayos hacia el punto focal, donde se encuentra el mecanismo de absorción fijo.

3. El concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, de la reivindicación 1, donde el mecanismo de soporte se **caracteriza además porque** la geometría y disposición de los componentes estructurales como: estructura de soporte fija, estructura de soporte móvil y un riel de refuerzo proporcionan mayor rigidez al concentrador para soportar los esfuerzos ocasionados principalmente por vientos.

30 4. El concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, de la reivindicación 1, donde el mecanismos de seguimiento se **caracteriza además porque** comprende un mecanismo de

seguimiento horario y un mecanismo de seguimiento diario que posibilitan la incorporación de un receptor fijo mediante un seguimiento solar continuo.

5. El concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, de la reivindicación 1, donde el mecanismo de absorción se **caracteriza además porque** mejora el comportamiento óptico y térmico del concentrador, al encontrarse con inclinación que incrementa la eficiencia óptica y térmica.
6. El concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, de la reivindicación uno, donde el mecanismo de absorción está **caracterizado además porque** permite la instalación del motor Stirling para operar con energía solar, biocombustible o cualquier combustible.
7. El concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, de la reivindicación 1, donde mecanismo de absorción **se caracteriza además porque** permite la incorporación de receptores en el foco fijo para generación de vapor o fundición de aluminio.

20

25

30

RESUMEN

La presente invención se refiere a un concentrador solar puntual de foco fijo que capta, concentra y convierte la radiación solar en energía térmica, por medio de una superficie que corresponde a una sección de disco parabólico y un mecanismo de
5 seguimiento solar con estructuras de soporte del concentrador compactas, eficientes y económicas.

El objetivo de la presente invención es proveer un nuevo concentrador solar puntual de foco fijo de bajo precio, fácil fabricación y poco mantenimiento, que permita la instalación de motor Stirling que pueda emplear un sistema híbrido solar biogás u
10 otro combustible como fuentes de energía primaria, además de mejorar el comportamiento óptico y térmico del concentrador solar.

El renovado interés en este tipo de tecnología en los últimos años, es explicado por el alto potencial que se tiene al poder producir energía térmica y generar energía eléctrica de una forma sustentable, e incrementar la eficiencia de los sistemas de
15 cogeneración al producir energía eléctrica, calorífica y frigorífica simultáneamente, protegiendo el medio ambiente y obteniendo beneficios económicos para el usuario.

El novedoso colector solar tiene características técnicas y económicas muy recomendables para satisfacer las diferentes necesidades de energía térmica de alta temperatura (mayores a 250 °C) de los sectores residencial, comercial, industrial,
20 energético, agrícola y ganadero. Es una excelente opción para los sistemas de generación de energía eléctrica por medio de motores Stirling, la generación vapor solar, desalación solar y unidades de refrigeración y aire acondicionado activadas con energía térmica e inclusive la fundición de aluminio.

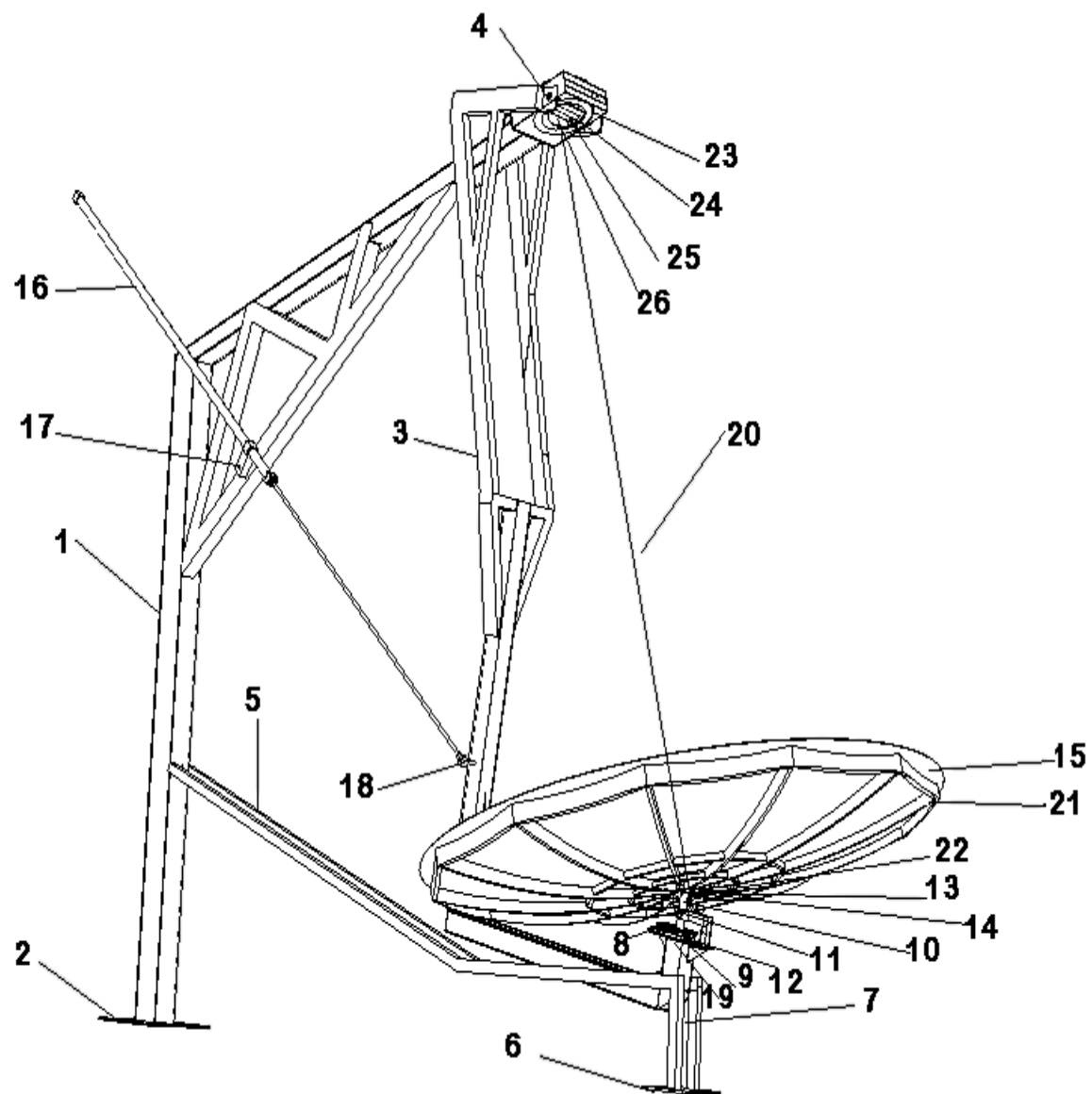


Figura 1.

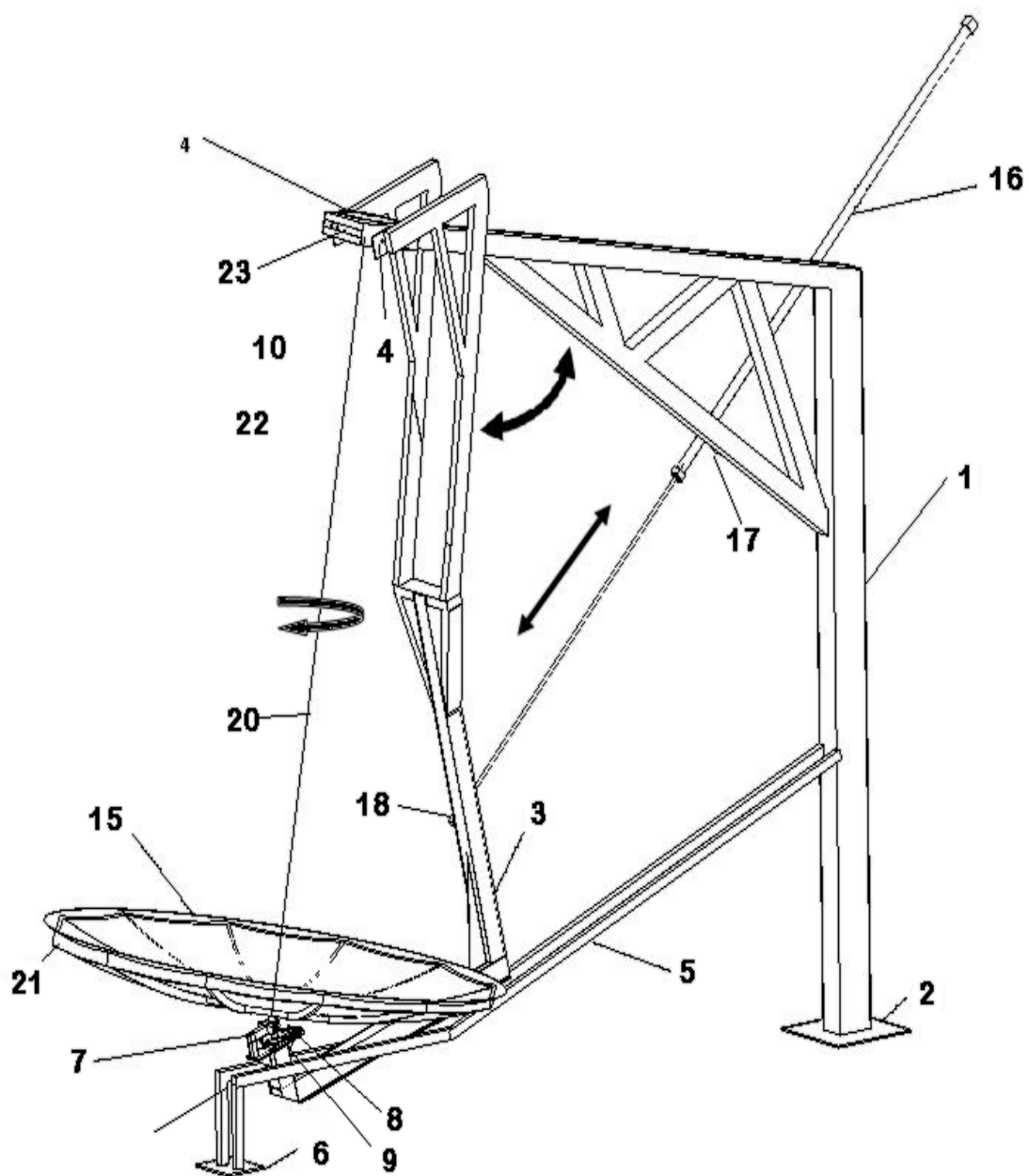


Figura 2.

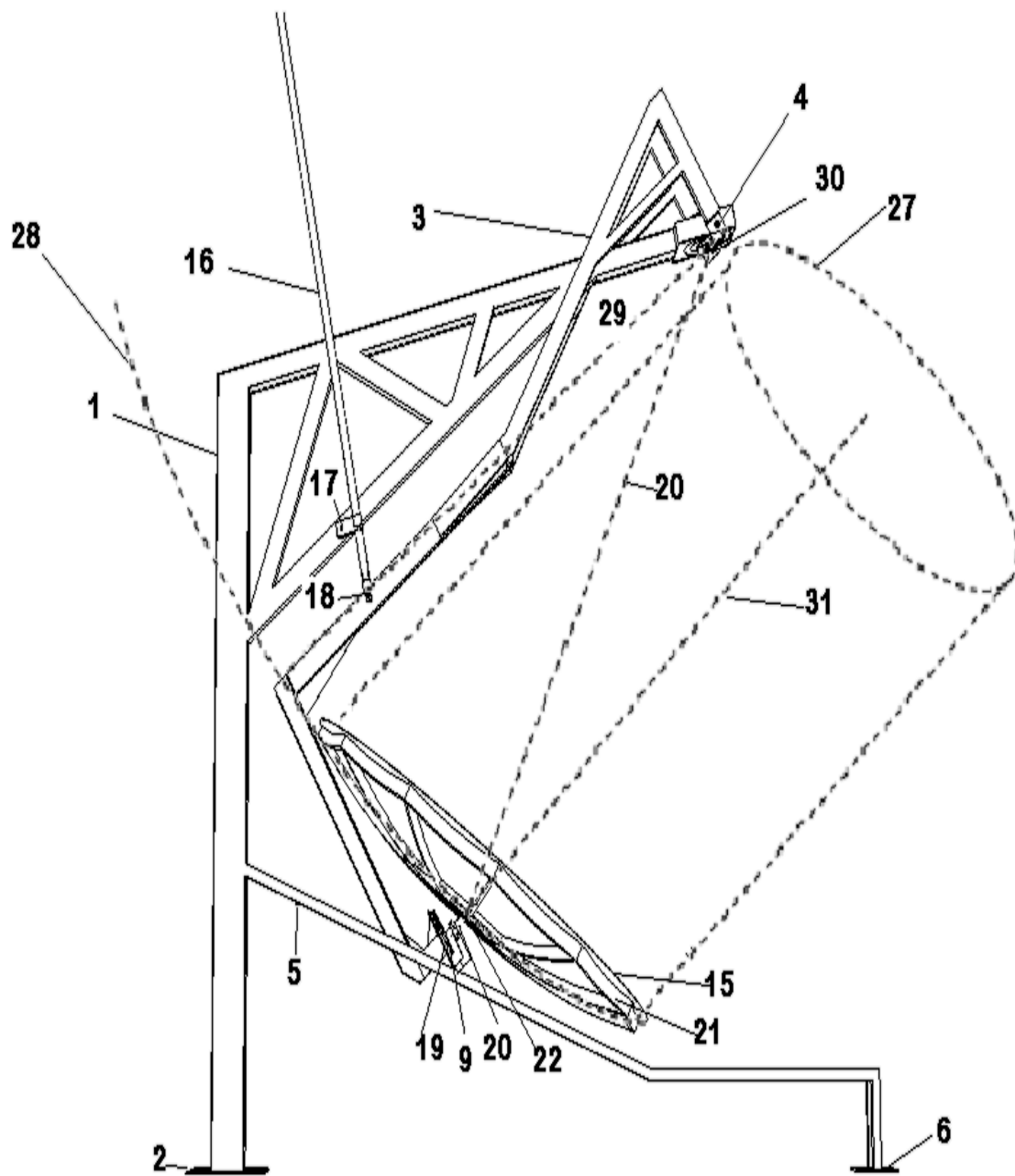


Figura 3.

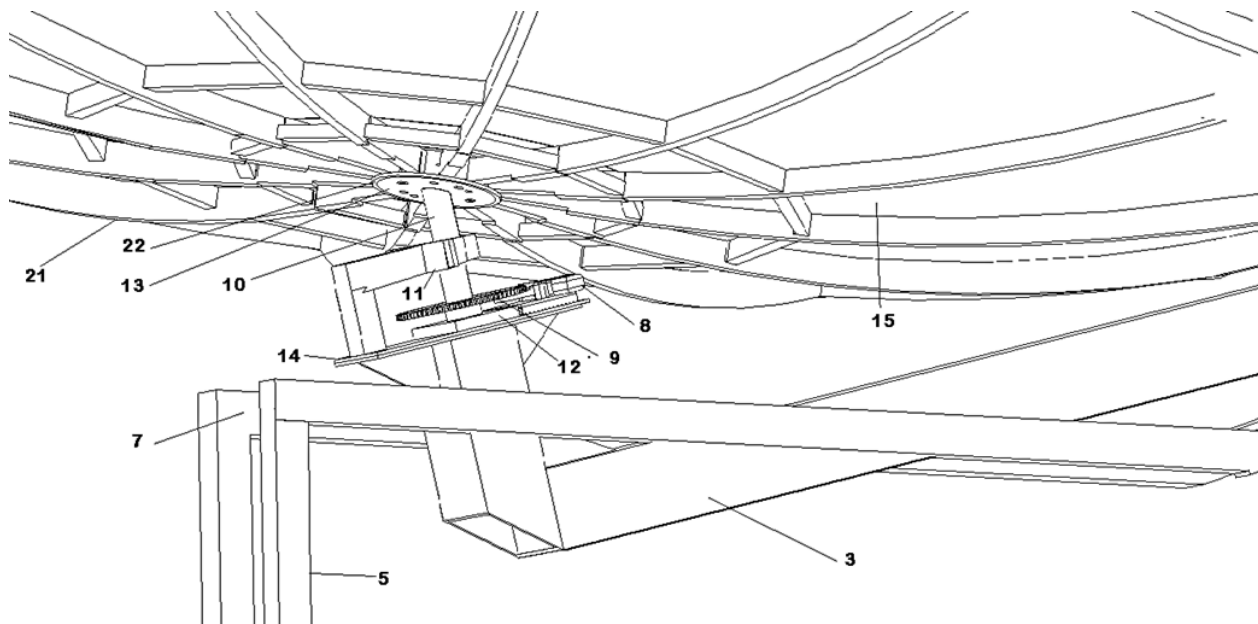


Figura 4.

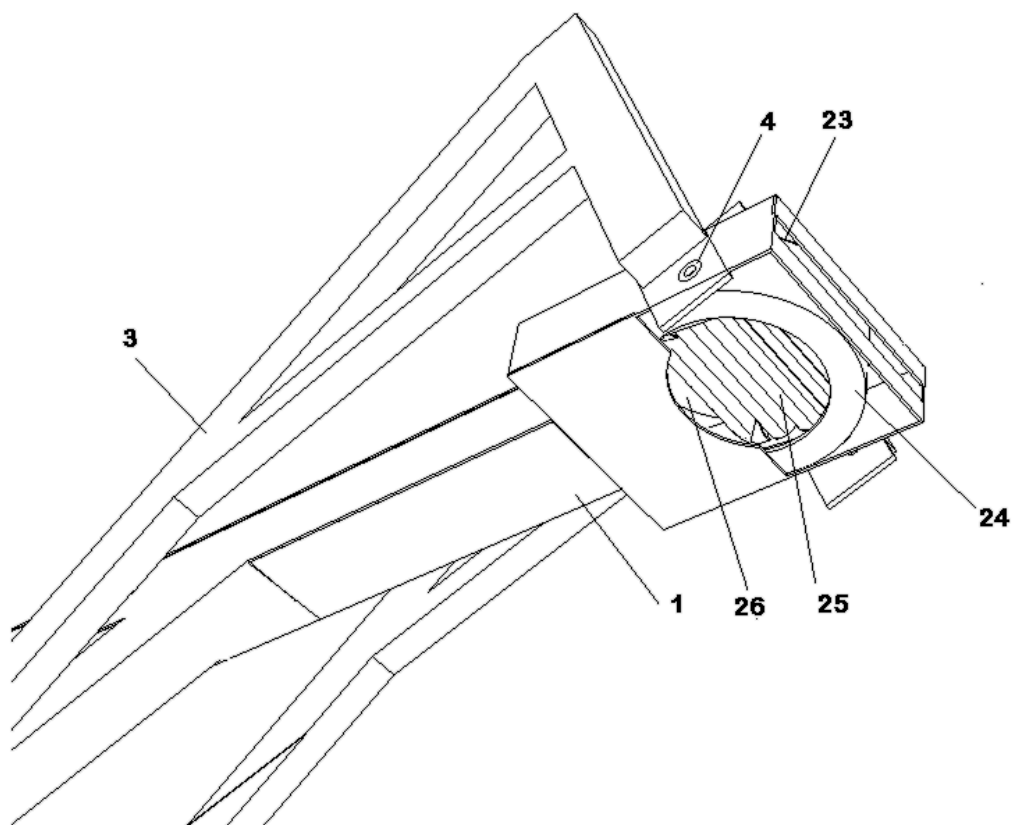


Figura 5.

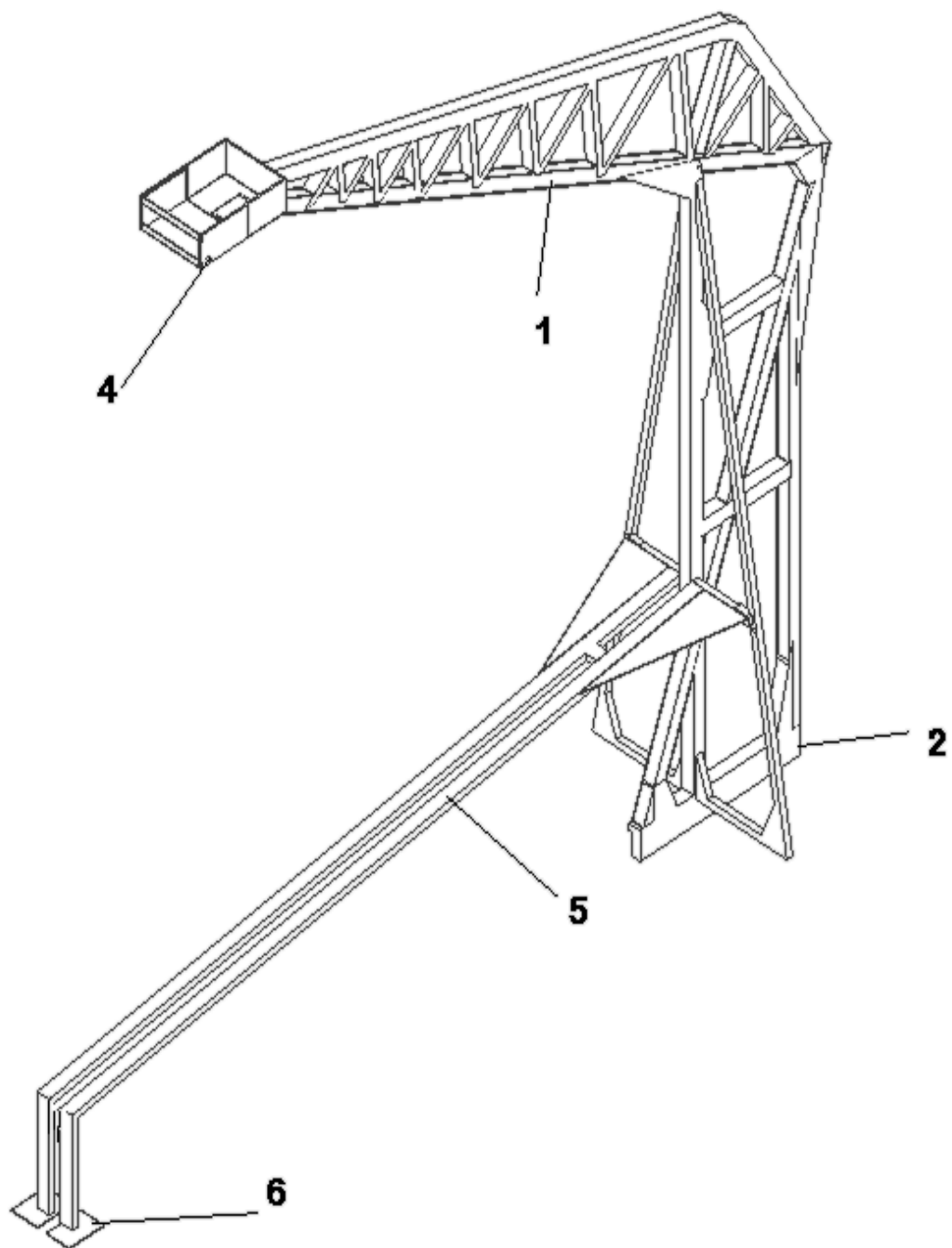


Figura 6.

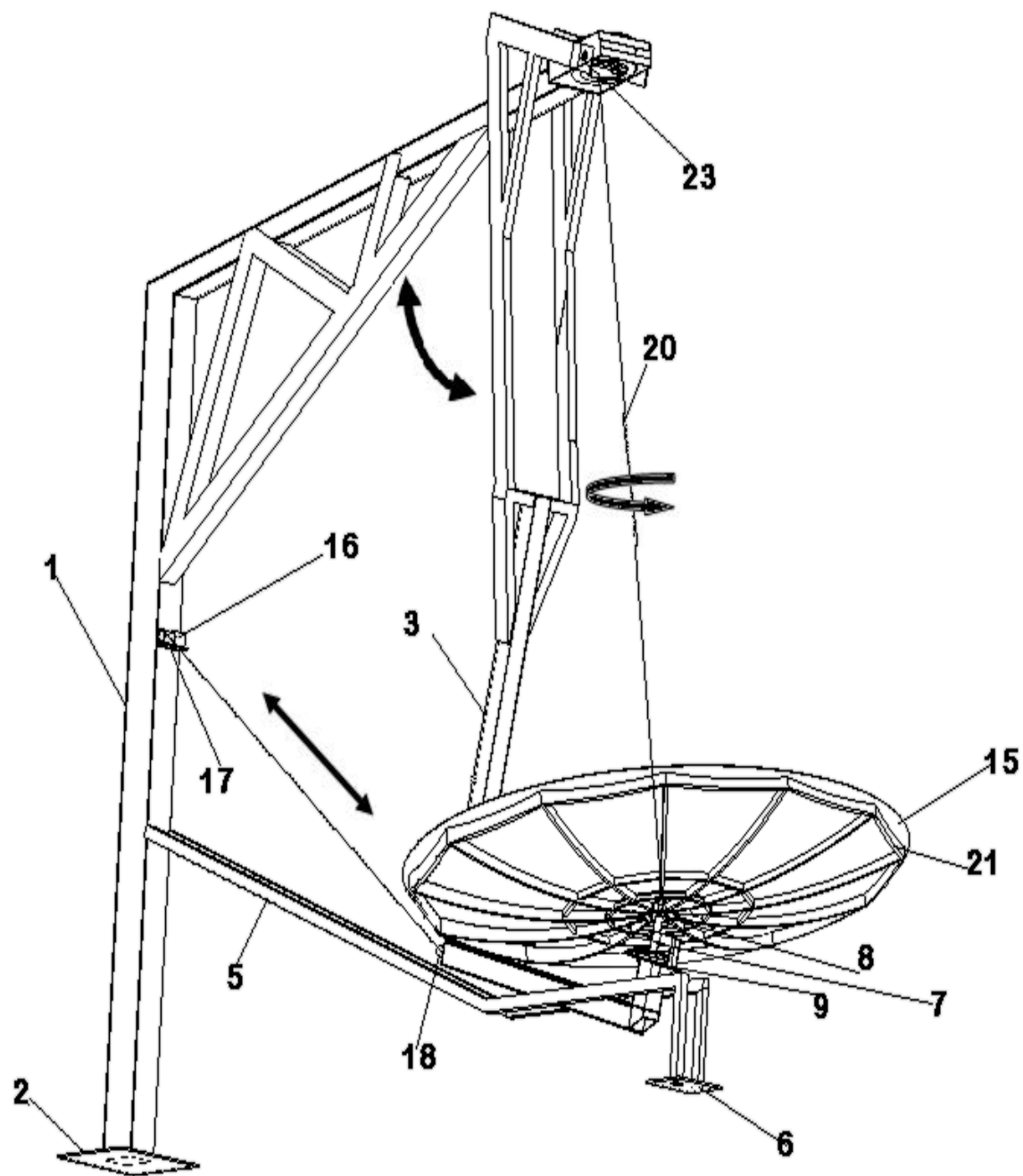


Figura 7.