



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

DISEÑO Y ANÁLISIS TÉRMICO DE UN REACTOR SOLAR PARA ALTAS TEMPERATURAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

NIDIA ARACELY CISNEROS CÁRDENAS

DIRECTOR: DR. RAFAEL ENRIQUE CABANILLAS LÓPEZ

Hermosillo, Sonora

Septiembre 2022

UNIVERSIDAD DE SONORA

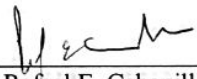
APROBACION DEL JURADO

de la tesis presentada por:

Nidia Aracely Cisneros Cárdenas

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

05/09/2022
Fecha


Dr. Rafael E. Cabanillas López
Presidente

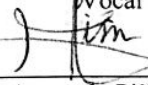
06/09/2022
Fecha


Dr. Ricardo A. Pérez Enciso
Secretario

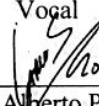
05/09/2022
Fecha


Dr. Rafael García Gutiérrez
Vocal

05/09/2022
Fecha


Dr. Armando Piña Ortiz
Vocal

02/09/2022
Fecha


Dr. Carlos Alberto Pérez Rabago
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

AUTORIZACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO

5 de Septiembre de 2022.

Por medio de la presente se hace constar que la estudiante **NIDIA ARACELY CISNEROS CARDENAS**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.

DR. ABRAHAM ROGELIO MARTÍN GARCÍA

COORDINADOR DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:
INGENIERÍA QUÍMICA



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

16 de Agosto de 2022

M.C. Nidia Aracely Cisneros Cárdenas

Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería

Presente.-

Por medio de la presente le comunico que en sesión extraordinaria de la Comisión Académica del Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química con fecha 12 de Agosto de 2022, se aprobó su solicitud de aplicación del Acuerdo de Colegio Académico 06-137/2015 para estudiantes del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química. Dicho acuerdo establece que para estudiantes que cuenten con al menos dos artículos publicados y/o aceptados dentro de los 8 semestres de duración del programa, podrán titularse mediante un esquema alternativo al tradicional, en donde el estudiante tendrá la opción de presentar los artículos como su documento escrito que deberá defenderse en la fase oral del examen de grado.

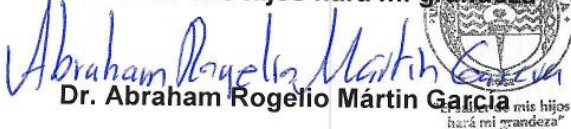
Lo anterior debido a que presentó ante la Comisión Académica del Posgrado evidencias de la publicación de los siguientes artículos en revistas indexadas con resultados relacionados con su Tesis Doctoral.

1. **Cisneros-Cárdenas, N.A.**, Cabanillas-López, R., Calleja-Valdez, R., Pérez-Enciso, R., PérezRábago, C., & Gutiérrez-García, R. (2020). Image and Ray Tracing Analysis of a Parabolic Dish Collector to Achieve High Flux on a Solar Volumetric Reactor. MRS Advances, 5(50), 2545-2553. DOI:10.1557/adv.2020.144

2. **Cisneros-Cárdenas, N. A.**, Cabanillas-López, R., Pérez-Enciso, R., Martínez-Rodríguez, G., García-Gutiérrez, R., Pérez-Rábago, C., Calleja-Valdez, R., & Riveros-Rosas, D. (2021). Study of the Radiation Flux Distribution in a Parabolic Dish Concentrator. Energies, 14(21), 7053. DOI:10.3390/en14217053

ATENTAMENTE

"El saber de mis hijos hará mi grandeza"


Dr. Abraham Rogelio Martín García



**POSGRADO EN
CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA:
INGENIERÍA QUÍMICA**

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

Rosales y Blvd. Luis Encinas Edif. 5 "C", Hermosillo, Sonora. C.P. 83000
Tel. 01 (662) 289 37 84, 259 21 05 ó 06

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presentan las evaluaciones ópticas de un sistema de alta concentración solar, así como la evaluación térmica de receptores volumétrico operando dentro de un reactor solar.

En el estudio óptico se estimó el error óptico global del sistema concentrador y se generaron las protosuperficies, que se refieren a superficies de igual intensidad, lo que ayudaría en el diseño de un receptor volumétrico especial para dicho sistema de concentración.

En el estudio térmico se presenta la evaluación de los receptores volumétricos de SiC en distintas configuraciones, así como condiciones de operación cuyo fin es producir aire a alta temperatura para el estudio posterior de reacciones que favorezcan la producción de combustibles solares.

DEDICATORIA

*Para mi Emilia y mi Ela,
que sin hablar y en poco tiempo me enseñaron muchas cosas.*

*Y para las generaciones futuras,
que este trabajo les encuentre viviendo en un mundo mejor.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad de Sonora por el apoyo brindado durante la realización de este trabajo, así como al departamento de ingeniería y metalurgia y al personal técnico y administrativo de la Plataforma Solar de Hermosillo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca nacional otorgada durante mis estudios de doctorado.

A mi director de tesis, Dr. Rafael E. Cabanillas López, por creer en mí desde el inicio e impulsarme a seguir mi propio camino.

A mis sinodales, Dr. Ricardo A. Pérez-Enciso, Dr. Carlos A. Pérez-Rábago, Dr. Armando Ortiz-Piña, Dr. Rafael García-Gutiérrez y Dr. J. Fernando Hinojosa-Palafox, por sus acertadas observaciones y valiosas aportaciones a este trabajo.

A mis profesores, por formarme en el aspecto académico, de investigación y el más importante, el aspecto humano.

A Víctor López, por el apoyo, el amor, la paciencia y los consejos durante mis estudios. No es fácil convivir con un estudiante de doctorado que vive procesos difíciles de transformación.

A mi madre, Socorro Cárdenas, por el amor infinito, la guía y los ánimos brindados durante toda esta vida.

A mi padre, Oscar Cisneros, por sus perdurables enseñanzas que han trascendido en el tiempo, sé que estaría muy orgulloso.

A mis hermanos, Oscar y Diana, por el cariño y la compañía.

A mi amigo, Ramiro Calleja, por haber convertido nuestra amistad un lugar seguro para mi alma.

A mi amigo, Ricardo Pérez, por decir las cosas que uno no quiere escuchar, por su guía y su amistad.

A mi amigo, Demetrio Sotelo, por hacer que la vida suceda más fácil.

A mi amigo Héctor González, por el candado de seguridad que mantendrá puesto para no perder el camino de los valores.

A mi amigo, Víctor Maytorena, por su hermandad y por sus consejos.

A mi amiga, Argentina Orozco, por acompañarme en este camino y convertirse en una guía en otros.

Y a todos los que me acompañaron durante este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTOS.....	VII
TABLA DE CONTENIDO.....	VIII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
1.1 Introducción	11
1.2 Justificación	20
1.3 Objetivo General	21
1.4 Objetivos Específicos	21
1.5 Metodología General.....	22
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	23
2.1 Hornos solares	23
2.2 Sistema de concentración solar.....	25
2.3 Reactores solares	26
2.3.1 Estado del arte de reactores solares en etapa experimental.....	29
2.3.2 Estado del arte del modelado computacional para reactores solares.....	37
CAPÍTULO 3 ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE FLUX RADIATIVO EN UN CONCENTRADOR DE DISCO PARABÓLICO	41
3.1 Introducción.....	42

3.2 Metodología	46
3.2.1 Descripción de los Experimentos.....	47
3.2.2 Determinación del Error Óptico del Sistemas	59
3.2.3 Generación de volúmenes efectivos	60
3.3 Resultados y Discusión	62
3.3.1. Error óptico global del sistema	62
3.3.2. Generación de volúmenes efectivos	63
3.3.3. Discusión.....	67
3.4 Conclusiones	67
 CAPÍTULO 4 ANÁLISIS TÉRMICO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN REACTOR SOLAR VOLUMÉTRICO	 69
4.1 Introducción.....	69
4.2 Configuración Experimental.....	72
4.2.1. Descripción del sistema	72
4.2.2. Mini Horno Solar	74
4.2.3. Descripción de los experimentos	78
4.3 Balance Termodinámico	80
4.4 Resultados y Discusión	81
4.4.1. Temperaturas de salida del aire máxima y promedio	81
4.4.2. Análisis de las eficiencias del sistema considerando el factor de sombra.....	83
4.4.3. Comparación de las eficiencias del sistema	88
4.4.4. Comparación de las eficiencias térmica y total del sistema	91
4.5 Conclusiones	94

CAPITULO 5 CONCLUSIONES GENERALES.....	96
REFERENCIAS	98
DIFUSIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	105
ANEXOS.....	107

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

*“La llama de la vela parpadea. Tiembla su pequeña fuente de luz.
Aumenta la oscuridad. Los demonios comienzan a agitarse”.*

*- Carl Sagan,
“El mundo y sus demonios.
La ciencia como una luz en la oscuridad”.*

1.1 Introducción

Los efectos globales de los gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas) están asociados al uso intensivo de combustibles fósiles y han provocado graves consecuencias ambientales; esta situación ha incrementado el número de investigadores en la académica y en la industria que buscan una solución, así como grandes esfuerzos globales para frenar este fenómeno. El Acuerdo de París ha sido un logro destacable para la protección al medio ambiente; afortunadamente, México participa comprometiéndose a lograr una reducción del 25% de los GEI para el año 2030 (México, Gobierno de la República, 2015).

Por otra parte, el aprovechamiento de los recursos renovables para corregir esta situación es una alternativa real y confiable. Sonora es uno de los territorios con mayor recurso solar en el mundo debido a su favorable posición geográfica, donde se estima que se recibe una radiación directa normal (DNI, por sus siglas en inglés) de 7.48 kWh/m² al día en promedio (Global Solar Atlas, 2018). Esta alta calidad de recurso solar disponible lo convierte en un territorio ideal para el desarrollo y la implementación de tecnologías de concentración solar CST (Concentrated Solar Technology, por sus siglas en inglés).

La energía solar concentrada CSP (Concentrated Solar Power, por sus siglas en inglés) puede ser utilizada para reemplazar el uso de combustibles fósiles para generar fluidos

de trabajo de alta temperatura, en otras palabras, puede ser utilizada como fuente de calor de proceso. Dicho calor es obtenido a través de sistemas ópticos que utilizan lentes y/o espejos que redireccionan los rayos solares a un área más pequeña que el área de captación, aumentando así su densidad energética varias veces. La razón de concentración de una tecnología de este tipo se refiere a la medida de las veces que un sistema de concentración aumenta la densidad de flujo radiativo natural al que se obtiene en el plano receptor. Una vez concentrada la radiación solar es posible ser utilizarla en diferentes procesos entre los que destacan: la generación de energía eléctrica, la síntesis de materiales especiales, la elaboración de combustibles solares, entre otros.

En la Figura 1 se muestran una serie de procesos que pueden realizarse usando concentración solar, por ejemplo, la disociación térmica del carbonato de calcio se lleva a cabo entre los 650 a 1,250 K, la producción de hidrógeno a partir de la disociación de metano se produce entre los 1,100 a 1,550 K, mientras que la disociación térmica del agua se efectúa entre los 2,000 a 2,600 K. Para alcanzar estas temperaturas se requieren reactores diseñados con las características apropiadas tanto para mantener las condiciones de operación (presión, temperatura), como la integridad del equipo para su funcionamiento continuo. En la Figura 2 se muestran el esquema de un reactor para la producción de hidrogeno a partir de $\text{ZnO} + \text{CH}_4$.

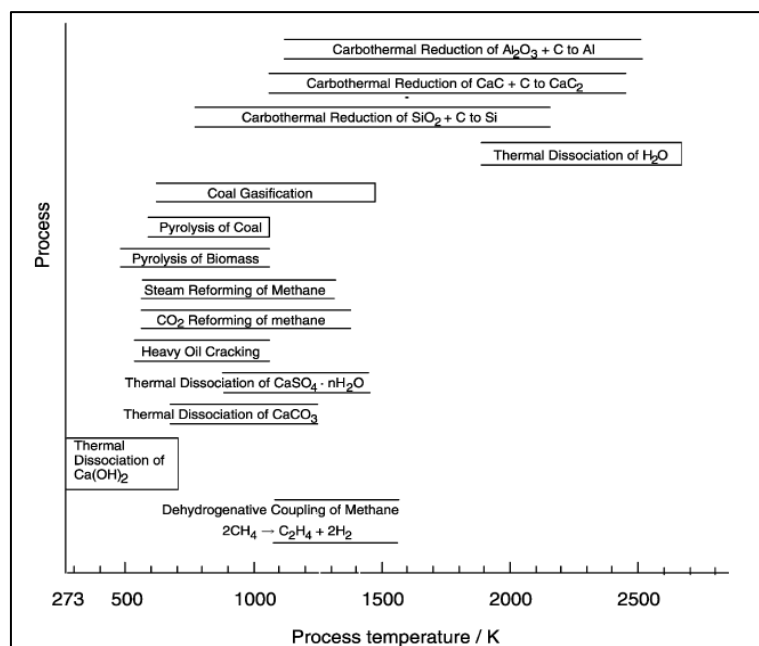


Figura 1. Algunos procesos industriales termoquímicos de alta temperatura. (Kodama, 2013).

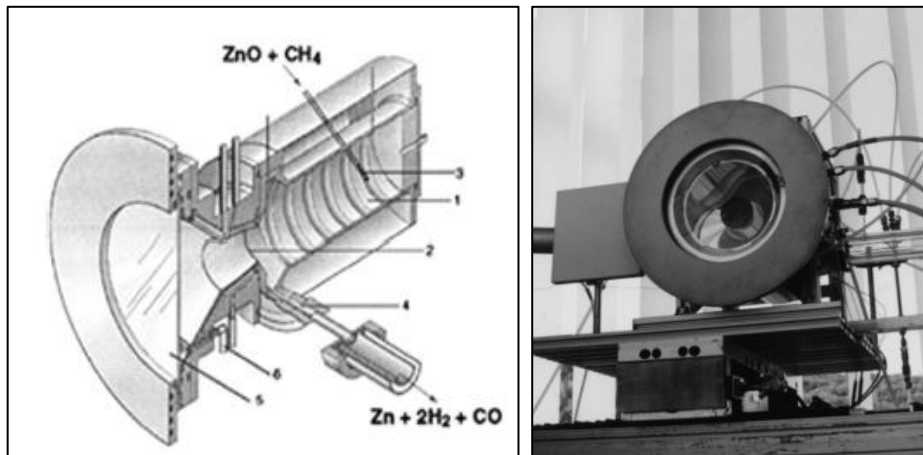


Figura 2. Prototipo diseñado para la reducción de ZnO (Steinfeld, y otros, 1997).

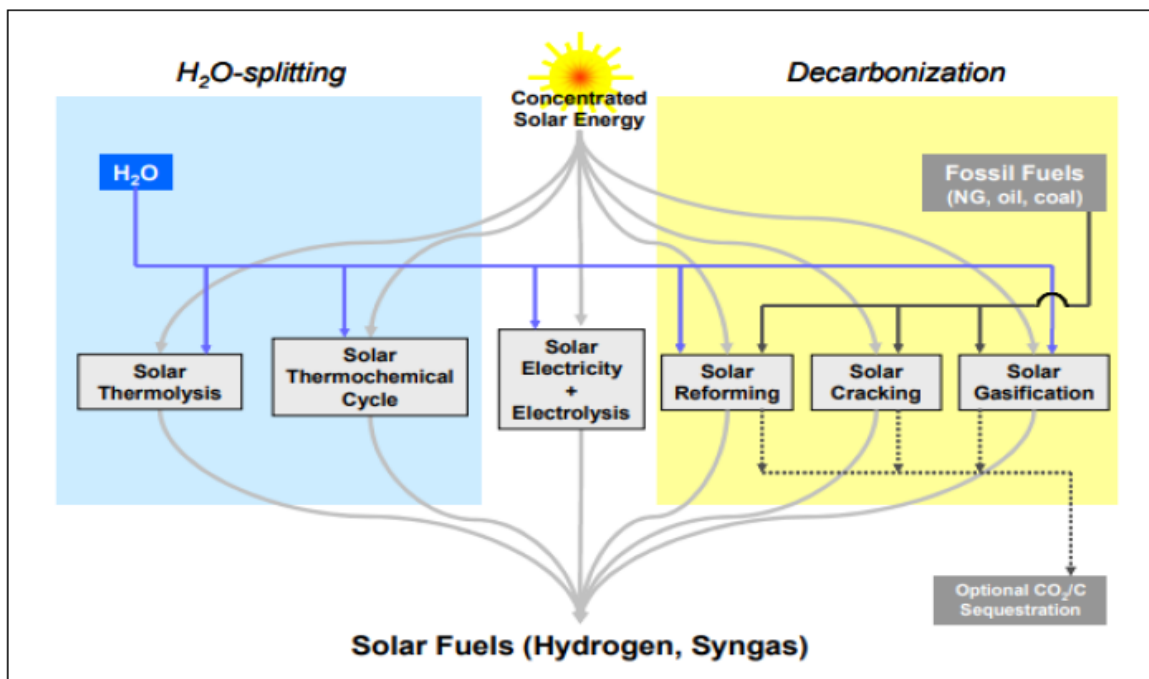


Figura 3. Rutas termoquímicas para la producción de combustibles solares. (Meier, y otros, 2010)

Una de las principales aplicaciones de los reactores solares es la producción de gas de síntesis (syngas), que está compuesto en diferentes proporciones por CO y H₂. La

obtención de syngas se puede realizar por diferentes métodos y partiendo de distintos reactivos como se muestra en la Figura 3, donde se observan diferentes rutas termoquímicas para la producción de hidrógeno y de syngas. Al hidrógeno y al syngas obtenidos por estos métodos se les conoce como combustibles solares ya que son compuestos químicos que reaccionan con el oxígeno para liberar energía y, han sido formados parcial o totalmente por radiación solar (SolarPaces, 2015). En la misma figura, se indica la fuente de H₂ para las reacciones de termólisis solar y ciclos termoquímicos solares; combustibles fósiles para el cracking solar y una combinación de combustibles fósiles y H₂O para la reformación y la gasificación solar. Para la descarbonización solar se considera el secuestro de CO₂ como un proceso opcional. Todas estas rutas involucran reacciones endotérmicas que utilizan la radiación solar concentrada como fuente de energía de calor de proceso a alta temperatura 1200 – 1300 °C (Meier, y otros, 2010). A partir de syngas, es posible llevar a cabo reacciones de petroquímica secundaria para obtener productos valiosos como amoníaco, tolueno, iso-butano, olefinas aromáticas, etanol, etileno, etc.

Los procesos termoquímicos solares ofrecen vías eficientes para la conversión de materias primas compuestas por carbón, minerales o agua pura y dióxido de carbono en combustibles y materiales de interés con emisiones de gases de efecto invernadero significativamente menores en comparación con los métodos convencionales. Los productos obtenidos de estos procesos dependen de la materia prima, pudiendo obtener metales y combustibles solares.

Los reactores solares usualmente son operados en hornos solares debido a que estos logran concentrar la cantidad de radiación solar necesaria para su funcionamiento. Un horno solar es un arreglo de varios componentes ópticos y mecánicos que tiene como fin producir altos flujos radiativos durante periodos suficientemente largos para permitir la operación de procesos a altas temperaturas.

En la Figura 4 se muestra los principales componentes de un horno solar; un heliostato de doble eje [1], una superficie especular parabólica [2], el foco donde se instala el reactor solar [3] y los atenuadores [4] para controlar el flujo radiativo.

El heliostato tiene un sistema de seguimiento solar de doble eje y su función es redireccionar la radiación en forma de plano perpendicular hacia la superficie parabólica (concentrador) durante un tiempo determinado; el concentrador, a su vez, aumenta la densidad de radiación solar concentrada en el punto focal de la parábola donde se encuentra el reactor solar pudiendo alcanzar temperaturas de $3,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (LACYQS, 2015), dependiendo del tamaño de los elementos ópticos y de las condiciones climatológicas a las que se opere el sistema. Entre la distancia del heliostato a la superficie parabólica se pueden encontrar instalados los atenuadores, que controlan el flujo radiativo como una función de la apertura de estos.

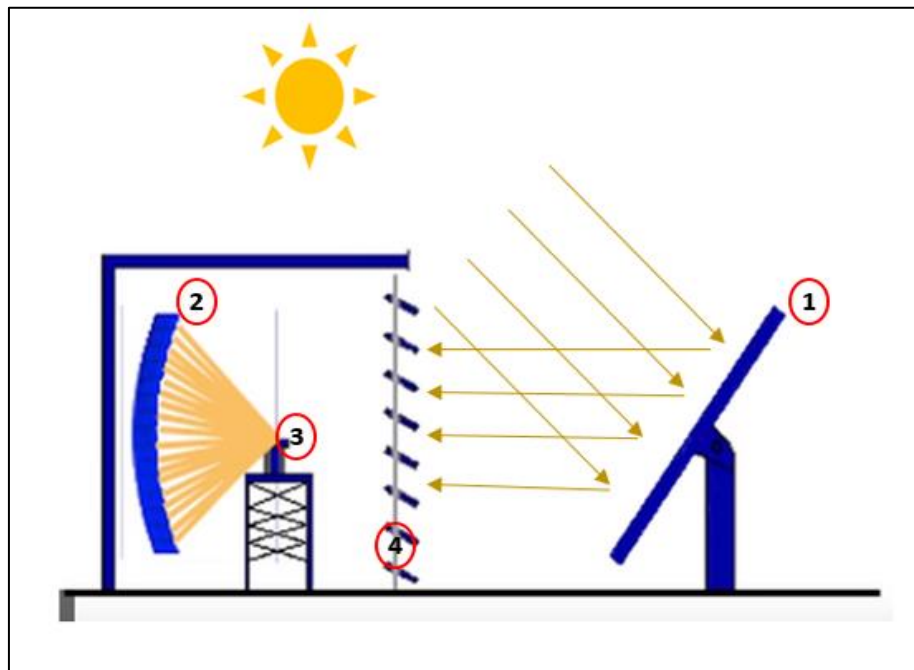


Figura 4. Principales componentes de un horno solar. (LACYQS, 2015)

La transformación de la CSP en potencia térmica es un reto considerable para el desarrollo de este tipo de tecnologías, sin embargo, la implementación de receptores es una alternativa factible. Existen distintos tipos de receptores: plano, cónicos, cavidad, volumétricos, etc. Los receptores planos, generalmente están en contacto con el medio ambiente, tienen la función de un intercambiador de calor; su principio de funcionamiento se basa en absorber la radiación solar concentrada para transformarla en calor que se

transfiere por conducción a través de la pared del material del que está formado, el otro lado de la pared está en contacto con el fluido de trabajo que es calentado por convección. Sin embargo, la temperatura más alta se tiene del lado donde se recibe la CSP, por lo que el gradiente de temperatura entre el absorbedor y el medio ambiente es mayor que el que se produce entre el fluido de trabajo y la pared interna, lo que termodinámicamente significa que la mayor pérdida de energía se produce de ese lado haciendo el proceso menos eficiente.

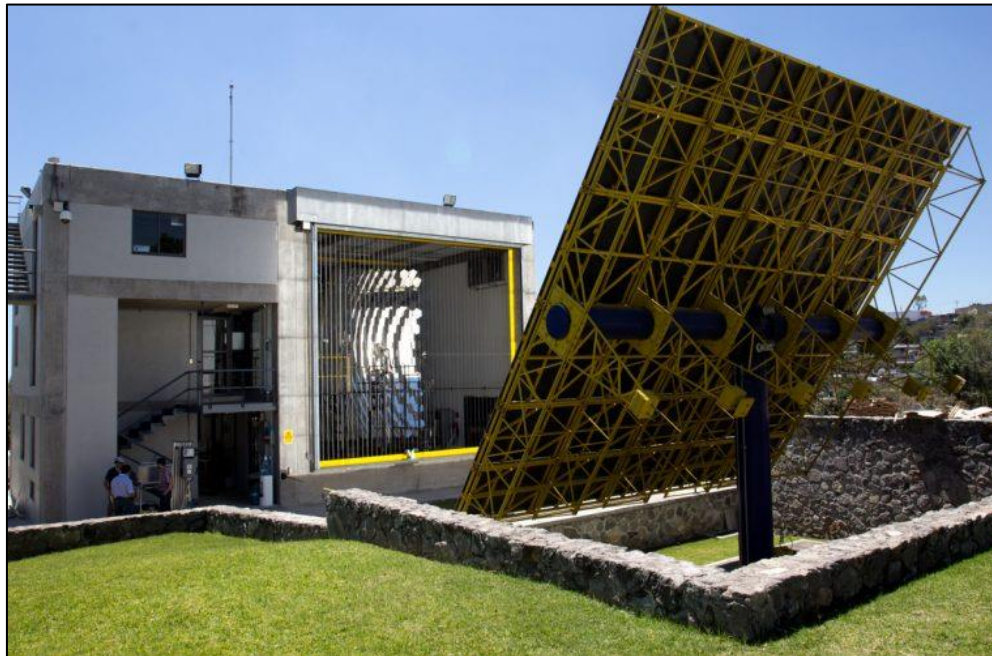


Figura 5. Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del Instituto de Energías Renovables – UNAM (LACYQS, 2015).

Por otra parte, los receptores volumétricos parecen haber resuelto la parte del problema de pérdida de energía. Este tipo de receptores están conformados por múltiples poros de diferentes formas y arreglos, hechos de metal, cerámica u otro material adecuado para su operación, con una porosidad específica. Su funcionamiento se basa en recibir la CSP en el volumen de su estructura para ser absorbida y al mismo tiempo, el fluido de trabajo pasa a través del volumen elevando su temperatura por convección forzada. El efecto volumétrico causa que la temperatura de la parte frontal sea más baja que la

temperatura en el interior del receptor, provocando menores pérdidas de calor por radiación haciendo el proceso termodinámicamente más eficiente (Figura 6).

El interés en los receptores volumétricos cerámicos surge de la limitación puesta en la temperatura máxima del fluido de trabajo alcanzada por receptores metálicos ($\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Los argumentos son que, con los cerámicos, la temperatura mayor se tiene en la salida del receptor, tienen una gran durabilidad y resistencia a altos flujos radiativos y a altos gradientes de temperatura. Este tipo de receptores tiene un gran potencial para producir energía térmica a alta temperatura y cubren una amplia gama de aplicaciones en el campo de la energía solar.

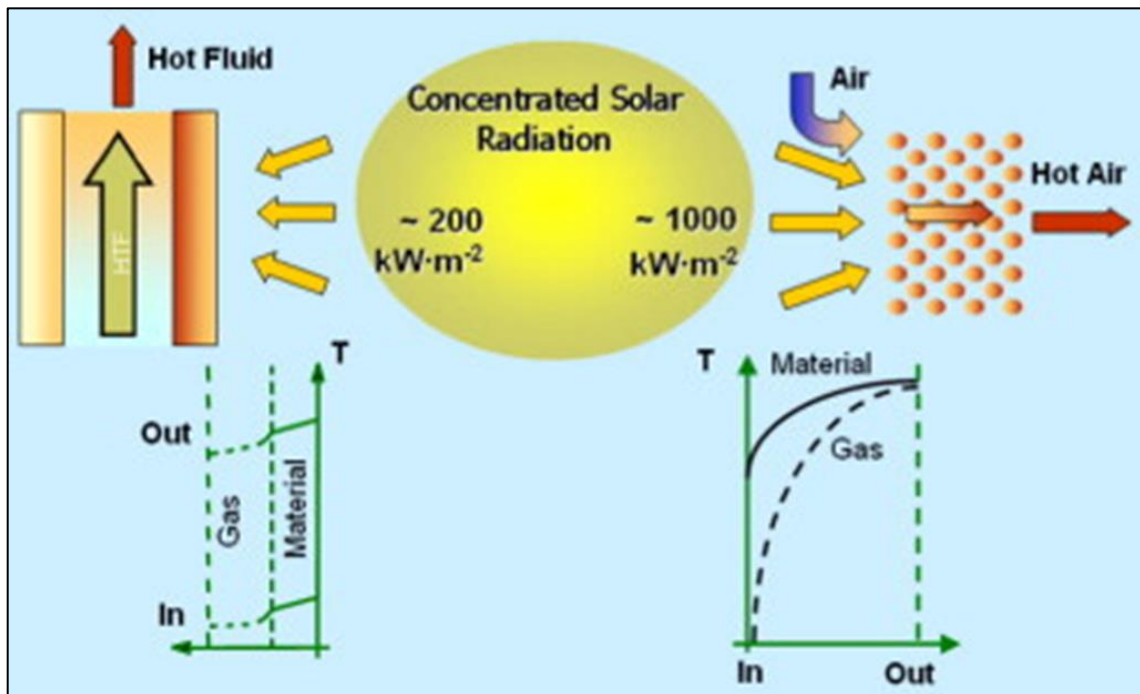


Figura 6. Esquema del funcionamiento de un receptor plano y uno volumétrico (Hoffschmidt, 1997).

En la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH) se han desarrollado proyectos de concentración solar con distintas tecnologías, a saber, tecnología de torre central, de canal parabólico, del tipo Fresnel y de disco parabólico, la experiencia acumulada permite ahora dar un paso hacia la construcción de un horno solar que junto con un

reactor volumétrico permita efectuar proyectos de química solar a una escala de laboratorio para posteriormente escalarla a aplicaciones piloto usando la infraestructura ya existente.

Este trabajo consiste en el análisis teórico para proponer el diseño de un reactor solar, que utiliza como medio calefactor un receptor volumétrico, con el fin de construirlo y caracterizarlo térmicamente. Se plantea utilizar un receptor volumétrico hecho de alúmina que aprovecha las características propias del material como la alta conductividad térmica lo que favorece la transferencia de calor. Las características del receptor de alúmina se describen a continuación: el punto de fusión se encuentra en el orden de los 2,000 °C lo que permite trabajar holgadamente a temperaturas por arriba de 1000°C y hasta 1700°C; además de tener un coeficiente de dilatación térmica bajo, no es inflamable, presenta una alta resistencia ácidos y bases fuertes y débiles, solventes orgánicos y a la radiación UV (AZO Materials, 2010). El receptor se encontrará confinado dentro de un recipiente presurizado – reactor solar-. De esta manera el elemento calefactor del reactor será el receptor volumétrico que tendrá la función de recibir y absorber la mayor cantidad de la radiación solar para, en un estudio posterior, cederla a los gases reaccionantes.

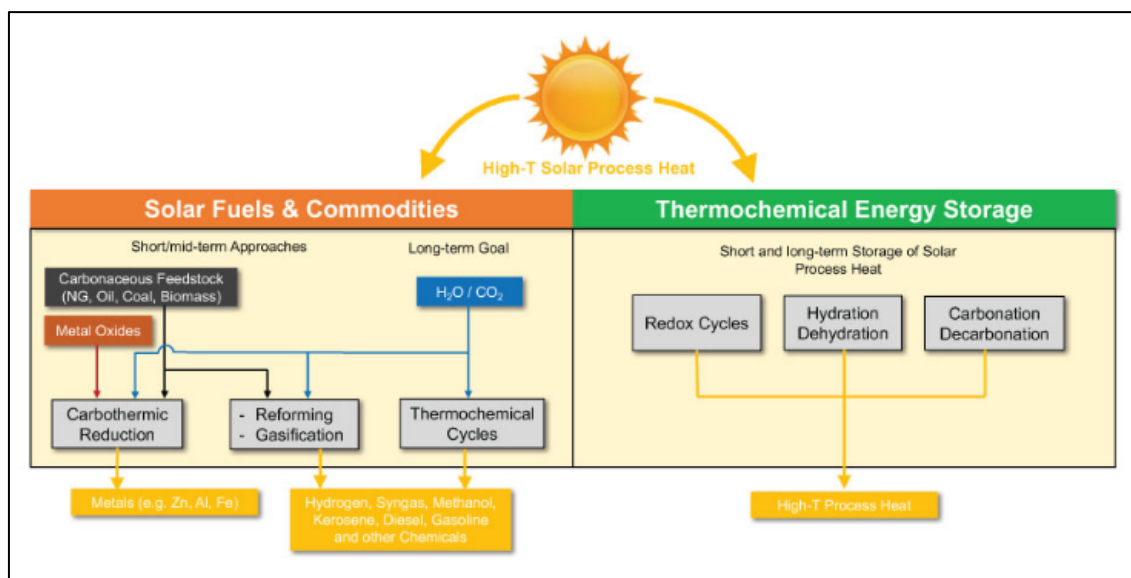


Figura 7. Procesos solares de alta temperatura (Solar Paces, 2017).

En la Figura 7 se observan algunos procesos solares termoquímicos de alta temperatura, actualmente, estos procesos se encuentran en investigación y desarrollo y no han sido implementados comercialmente. Si bien estas tecnologías híbridas solar-fósiles producen emisiones de gases de efecto invernadero, se pueden considerar como una plataforma para la transición al futuro a corto y a media plazo para las tecnologías libres de carbono a largo plazo, las cuales necesitarán más tiempo para ser más económicas debido a que la complejidad técnica es mayor porque se requieren temperaturas muy elevadas. Sin embargo, se han realizado avances sustanciales en los últimos años, por ejemplo, la planta piloto Hydrosol de 100 kWth se encuentra en construcción y se utilizará para la producción química-solar de hidrógeno (Sun to Liquid, 2015).

En resumen, se puede afirmar que los procesos termoquímicos solares de alta temperatura son una alternativa promisoría para la utilización de la energía solar, ya que pueden ser utilizados para obtener diferentes productos valiosos para la industria energética en la actualidad, y que la huella de carbono se ve fuertemente disminuida por utilizar esta fuente renovable de energía. En la figura 8 se muestra en forma esquemática los principales productos que pueden ser obtenidos a partir de las materias primas correspondientes, la radiación solar concentrada y los reactores solares específicos, destacando al hidrógeno, a otros combustibles solares y elementos metálicos.

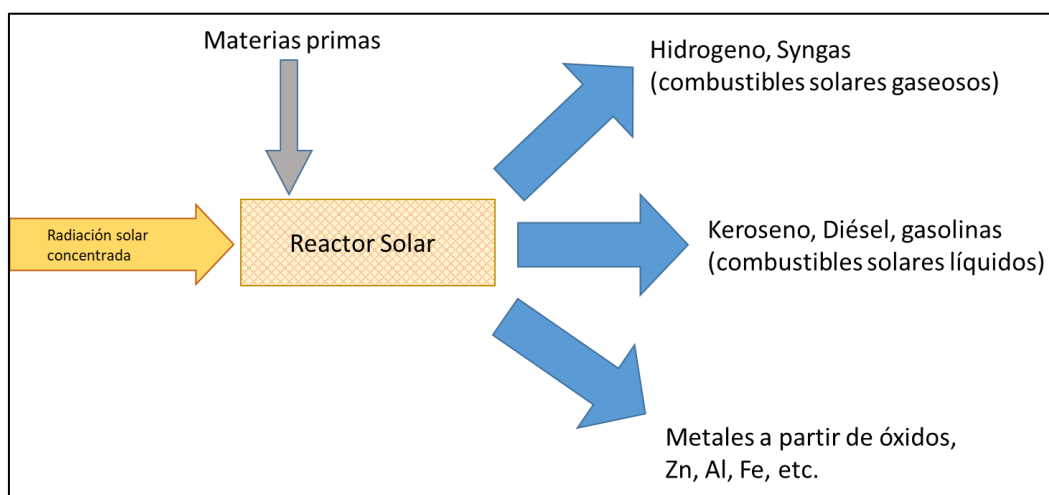


Figura 8. Esquema de productos potenciales a partir de la utilización de CSP.

1.2 Justificación

En el área de Investigación en Química Solar existen esfuerzos a nivel mundial por coordinar las investigaciones que se realizan por grupos de científicos y tecnológicos de diferentes países, una de las principales organizaciones es conocida como SolarPaces que cuenta con un grupo específico para Química solar (Solar Paces, 2017). Este grupo, en su informe del año 2015, manifiesta el potencial de penetración que puede tener estas tecnologías en corto y mediano plazo (SolarPaces, 2015).

En el ámbito nacional se tiene experiencia en la construcción hornos solares y de reactores solares, solo en el caso del Instituto de Energías Renovables (UNAM), donde se construyó el horno de alto flujo radiativo (HoSIER) con financiamiento de CONACYT en el proyecto de Laboratorios Nacionales de Química y Concentración Solar (2009-2014). El HoSIER es el único horno solar operativo en México donde se realizan investigaciones en química solar (LACYQS, 2015) (LACYQS, 2015) (Ceballos-Méndivil, y otros, 2015) (Rivero-Rosas, y otros, 2010).

Investigadores de la UniSon han utilizado el HoSIER para desarrollar investigaciones en síntesis de materiales cerámicos de alta temperatura como el SiC (Ceballos-Méndivil, y otros, 2015) y estudios de celdas termoiónicas de alta temperatura (García-Gutiérrez, y otros, 2017).

En la PSH se cuenta con infraestructura y experiencia en concentración solar, siendo estudiadas varias tecnologías entre las que destaca la de Torre Central. Se han desarrollado metodologías de evaluación de heliostatos (parte esencial de esta tecnología), tanto en la parte de comportamiento mecánico como óptico (LACYQS, 2015). Así mismo se han desarrollado proyectos usando técnicas de calorimetría en concentración media y alta (Maytorena, y otros, 2019) (Cisneros-Cardenas, y otros, 2018) . Estas técnicas calorimétricas se ven reforzadas por metodologías de simulación de trazado de rayos y estudios de imágenes para dar mayor certeza a los resultados. Sin embargo, hasta la fecha no se han construido reactores solares, por lo que se tendrán que desarrollar metodologías para el diseño óptico del concentrador, aplicando técnicas como el trazado de rayos y simulación de seguimiento solar para lograr una

operación suave sin oscilaciones importantes. Esto permitirá un mejor control del funcionamiento del reactor solar para lograr operar bajo las condiciones necesarias para llevar a cabo las reacciones correspondientes. Por otra parte, la caracterización térmica del reactor proporcionará el conocimiento necesario para determinar los procesos solares termoquímicos posibles de estudiar.

Actualmente en el departamento de Ingeniería Química y Metalurgia se cuenta con una activa línea de investigación en química solar por lo que se requiere de instrumentos para llevar a cabo las investigaciones planeadas, un horno solar de baja capacidad 2kWt, pero de alta razón de concentración (alrededor de 1000x), permitirá reforzar esta línea al realizar investigaciones con reactores de alta temperatura a escala mayor que laboratorio.

La construcción de este instrumento de investigación un concentrador-reactor solar volumétrico, será de gran apoyo a las investigaciones de química solar y al desarrollo de tecnología tanto en nuestra institución como a nivel nacional para el aprovechamiento de la radiación solar directa.

1.3 Objetivo General

Construcción y evaluación térmica de un reactor solar de alta temperatura utilizando un receptor volumétrico como medio calefactor, para el posterior estudio de reacciones termoquímicas en la producción de combustibles solares.

1.4 Objetivos Específicos

- 1 Realizar el estudio del estado de arte para reactores solares volumétricos de alta temperatura.
- 2 Estudio óptico de la radiación solar concentrada sobre el receptor volumétrico.
- 3 Diseño y construcción de un prototipo de reactor solar basado en el estudio óptico y estudio térmico – reportado en la literatura-.

-
- 4 Puesta a punto del reactor.
 - 5 Evaluación del desempeño térmico del prototipo bajo condiciones de operación deseadas.

1.5 Metodología General

Este es un estudio teórico-experimental en el que primero se realizará la caracterización óptica del sistema concentrado para determinar la cantidad y la forma en la que genera el flux solar concentrado dicho sistema; posteriormente, y considerando los resultados de la simulación térmica de un estudio externo, se procederá a la construcción, instrumentación y puesta a punto del reactor-receptor solar para realizar su evaluación térmica.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

“No dejes nada a la suerte. Contrólalo todo.

Combina observaciones contradictorias.

Concédete el tiempo suficiente”.

- Hipócrates

En esta revisión bibliográfica se establece el estado del arte sobre reactores solares, receptores volumétricos, así como hornos solares en los que suelen operar este tipo de reactores; esto último con el fin de comprender su funcionamiento, las potencias que logran concentrar y para qué se utilizan.

2.1 Hornos solares

En la literatura, se han encontrado hornos solares usados para distintos fines lo que, claramente, está relacionado con su tamaño y su configuración óptica, así como las temperaturas que puede alcanzar a través de la razón de concentración de radiación solar.

La descripción del horno solar, así como sus componentes fueron descritos en la sección 1.1.

El horno solar de Odeillo, Francia (Figura 9) es uno de los más grandes del mundo, el cual logra una potencia térmica mayor a 1000 kW (Le Phat, y otros, 1973). El Instituto Paul Scherrer desarrolló un horno solar de alto flujo radiativo capaz de producir 40 kW de potencia térmica y alcanzar una temperatura de 2200°C con una razón de concentración de 5000x (Schubnell, y otros, 1991). En la Plataforma Solar de Almería se han desarrollado tres hornos con diferentes potencias térmicas que van desde 5 kW a 69 kW (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2018). En el Instituto de Energías Renovables de la UNAM se construyó un horno solar

(Figura 10) capaz de alcanzar temperaturas de 3680°C a una razón de concentración de $18000\times$ (Alonso, y otros, 2014). El horno desarrollado por NREL produce una potencia térmica de 10kW (NREL, 2018) mientras que el “Big Solar Furnace” (Figura 11) desarrollado por el Institute of Material Science SPA puede producir 1000 kW de potencia térmica (Academic of Science of the Republic of Uzbekistan, 2018). El instituto de investigación solar en Alemania construyó un horno solar que permite concentrar 5 MW/m^2 y alcanza temperaturas de 2500°C (Institute of Solar Research, 2018).



Figura 9. Horno solar en Odeillo, Francia (Le Phat, y otros, 1973) .



Figura 10. Horno Solar del Instituto de Energías Renovables – UNAM (Rivero-Rosas, y otros, 2010).



Figura 11. Horno solar del Institute of Material Science SPA (Academic of Science of the Republic of Uzbekistan, 2018).

2.2 Sistema de concentración solar

El sistema de concentración solar que se utiliza para proporcionar el calor de proceso necesario es un horno solar que cuenta con un sistema óptico en particular, llamado XRX-Köhler. Este sistema fue una adaptación hecha por investigadores del Colegio de Ciencias Ópticas de la Universidad de Arizona (Coughenour, y otros, 2014) de la óptica

Köhler desarrollada por August Köhler en 1893, que fue un nuevo sistema de iluminación en microfotografía para iluminar uniformemente un espécimen desde una fuente de iluminación no uniforme (Umbría-Jiménez, y otros, 2017).

La óptica XRX-Köhler consta de un espejo parabólico (X) que recibe la radiación solar para reflejarla en su punto focal correspondiente, que se encuentra a 1.5 m, en donde se posiciona una esfera (R) que refracta los rayos solares sobre un arreglo de espejos en forma de poliedro truncado (X) que redireccionan la radiación sobre una superficie curva logrando una distribución homogénea de los rayos solares (Figura 12). Las ventajas de este sistema son que presenta una tolerancia al error de seguimiento de $\pm 0.7^\circ$, lo que abarata el sistema de seguimiento, es una faceta de solo una pieza, simplicidad de enfoque y manufactura simplificada (Coughenour, y otros, 2014).

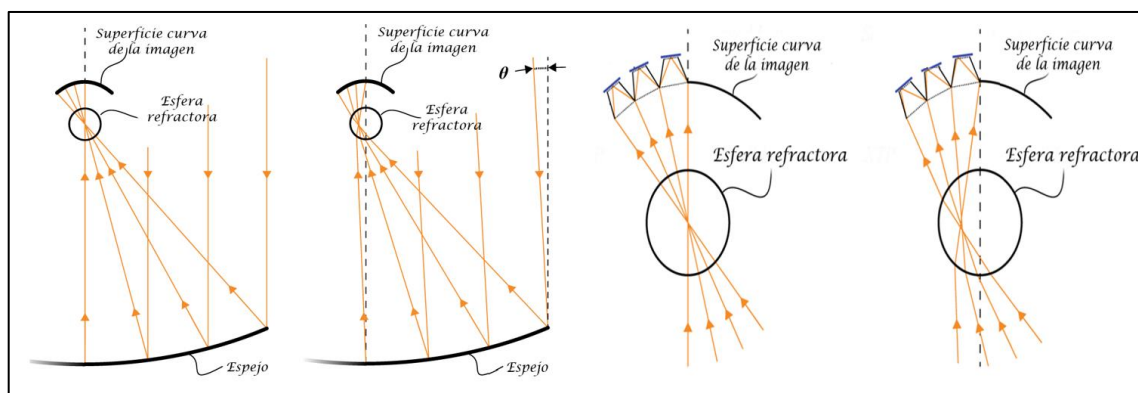


Figura 12. Sistema óptico XRX-Köhler (Coughenour, y otros, 2014).

2.3 Reactores solares

La revisión bibliográfica sobre reactores solares muestra diferentes diseños y dimensiones. A continuación, se citan algunos de los trabajos que contribuyen a la evaluación del estado del arte.

Un reactor solar es un recipiente diseñado con las características apropiadas para mantener las condiciones de operación deseadas como presión y temperatura que favorecerán la reacción que se lleve a cabo dentro de éste, además, en su diseño deben

considerarse las medidas de seguridad necesarias para mantener la integridad del equipo y su funcionamiento continuo.

Los reactores pueden clasificarse convencionalmente por el tipo de flujo, por el sistema de reacción (homogéneo o heterogéneo), isotérmico o no isotérmico. Por otra parte, los reactores solares se dividen en las siguientes categorías: principales mecanismos de intercambio de calor, diseño geométrico, por naturaleza del tipo de fluido térmico utilizado y método de calentamiento. De acuerdo con este último, se pueden subclasificar en directos e indirectos. Los reactores solares de radiación directa reciben la radiación solar concentrada directamente sobre los reactantes o la zona de reacción química, en este caso es común que los reactantes posean una alta capacidad de absorción de la radiación. Por otra parte, los reactores indirectos usan un medio calefactor que tiene la función de absorber la radiación solar concentrada para transferirla al fluido de trabajo (Tapia Martín, 2012).

Los reactores solares de radiación directa, que generalmente utilizan ventana, presentan pérdidas de calor mínimas; por lo que es posible alcanzar y mantener altas temperaturas (Kodama, y otros, 2017). Sin embargo, las ventanas transparentes son un componente crítico y problemático debido a su posible descomposición, a los límites de presión y a los problemas por la implementación a gran escala. Según Karni y sus colaboradores, una ventana efectiva debe satisfacer los siguientes criterios a lo largo del periodo de operación:

1. Buenas propiedades ópticas: con las cuales se busca minimizar la reflexión y la absorción de la radiación entrante.
2. Fuerza mecánica: capacidad para soportar el estrés causado por las condiciones de operación (presión y temperatura)
3. Alta variabilidad de las temperaturas de trabajo: operar a una temperatura continua de la ventana mayor a 800 °C, con máximos de 1 000 °C, y gradientes térmicos mayores a 25 °C/mm.
4. Instalación y sellados confiables y libres de estrés: evitar tensiones y/o fugas por el estrés inducido por la presión del gas.
5. Capacidad de enfriamiento: las temperaturas internas del receptor podrían alcanzar entre 1 500 a 1 700 °C, que serían unos cientos de grados más que el

-
- máximo permitido para la temperatura de la ventana es por eso, que la ventana debe ser enfriada.
6. Prevenir acumulación de polvo: el asentamiento del polvo podría reducir el desempeño óptico de la ventana y causa sobrecalentamiento.
 7. Producción simple de bajo costo: la ventana deberá ser fabricada por un método relativamente simple, utilizando material de bajo costo. (Karni, y otros, 1998)

Los reactores solares de intercambio directo se clasifican en volumétricos o de partículas. Los reactores volumétricos surgen como alternativa a los intercambios directos asumiendo que por su configuración son capaces de alcanzar temperaturas más elevadas debido a que el proceso de transferencia de calor se realiza sobre la superficie; estos reactores pueden o no utilizar ventanas; el estado del arte de este tipo de reactores se presenta en la sección 2.2.1. Por otra parte, los reactores que utilizan partículas como medio de calentamiento presentan alta eficiencia y elevadas temperaturas de operación, generalmente utilizan un fluido que arrastre o mantenga las partículas suspendidas para favorecer el intercambio de calor (Tapia Martín, 2012).

Alternativamente, los reactores solares irradiados indirectamente presentan una pared opaca de transferencia de calor para absorber la radiación solar concentrada para luego transferir el calor al sitio de reacción, eliminando así la necesidad de una ventana transparente. Sin embargo, la selección de materiales para el absorbedor está limitada por la temperatura máxima de funcionamiento, la conductividad térmica, la absorbancia radiante, la inercia química, la resistencia a los choques térmicos y la idoneidad para la operación transitoria (Romero, y otros, 2012). Estos reactores se dividen a su vez, en tubulares y de doble cámara. Los reactores tubulares se basan en una cavidad opaca en la cual se introduce la energía solar a través de una apertura sobre una serie de tubos por cuyo interior circula un fluido que aumenta su energía térmica mientras que los de doble cámara se basan en dos cámaras colocadas una encima de otra de forma que a cámara superior se comporta como el agente absorbedor y la cámara inferior como el lugar donde se produce la reacción química (Tapia Martín, 2012).

2.3.1 Estado del arte de reactores solares en etapa experimental

La información más confiable sobre procesos físicos es, con frecuencia, dada por medidas reales. Una investigación experimental implica equipo a gran escala que puede ser usado para predecir cómo copias idénticas de dicho equipo podría desempeñarse bajo las mismas condiciones. Estas pruebas a gran escala, en la mayoría de los casos, tiene precios muy elevados y son casi imposibles. La alternativa, entonces, es desarrollar experimentos en modelos de escala pequeña. (Patankar, 1980).

A continuación, se presenta una amplia revisión del estado del arte sobre reactores solares que han sido construidos y de los cuales se tiene registro. Iniciando brevemente, con reactores solares de partículas, tubulares y de doble cámara para extender la revisión bibliográfica en la sección de reactores volumétricos.

Investigadores del Instituto Paul Scherrer diseñaron un reactor solar que utiliza radiación solar concentrada tridimensional sin imágenes en una orientación de haz hacia abajo, en el punto focal se encuentra el reactor y alcanza temperaturas de 3 000 a 5 000 °C. La radiación ingresa al reactor a través de una ventana circular de cuarzo de 240 mm de diámetro y 3 mm de espesor y pasar a través de una apertura de 60 mm enfriada por agua. La superficie de reacción está compuesta por quince placas trapezoidales de 300 mm de longitud con un ancho promedio de 50 mm y 12 mm de espesor, soportadas por tres capas de aislamiento cerámico poroso, con forma de cono inverso con una inclinación de 30°. La geometría simétrica entrelazada permite que la gravedad por sí sola mantenga la cavidad en su lugar sin el uso de adhesivos. Se espera que el reactor opere en el rango de 10-20 kW (Koepf, y otros, 2012). Este reactor fue probado en una planta piloto para la disociación térmica de ZnO a partir de una reacción de dos pasos de separación de agua y CO₂ en un horno solar de 1 MW. El experimento se realizó durante 97 horas continuas y se lograron temperaturas por arriba de los 2 000 K, mientras que se obtuvieron tasas de disociación de ZnO tan altos como 28 g/min produciendo un total de 28 kg de reactante procesado durante 13 días completos de operación alcanzando una concentración solar máxima de 4 671 kW/m² (Koepf, y otros, 2016).

Se han desarrollado investigaciones para el diseño y la construcción de reactores solares de partículas para diferentes tipos de procesos obteniendo resultados muy diversos.

SYNPET es un reactor de tipo de lecho arrastrado desarrollado para gasificación con una potencia de entre 5 a 300 kW probado en la Plataforma Solar de Almería obteniendo una conversión del 87% y un rendimiento del 24%, alcanzando temperaturas entre los 1 300 y 1 800 K (SolarPACES, 2009).

Bertocchi y sus colaboradores construyeron y caracterizaron un reactor solar de partículas que opera a presión atmosférica, aunque utiliza una ventana para mantener las condiciones de operación controladas; este reactor opera dentro de un sistema óptico constituido por un heliostato que redirige la radiación solar hacia un elemento óptico secundario, un disco parabólico con un diámetro de 1.55 m (Figura 12); la caracterización térmica del reactor constó de calentar 4 diferentes fluidos de trabajo (aire, nitrógeno, argón y bióxido de carbono) excediendo los 2 100 K en la temperatura de salida del gas nitrógeno (Bertocchi, y otros, 2004).

Kruesi y sus colaboradores diseñaron un reactor solar del tipo tubular para la gasificación de bagazo de caña de azúcar; el concepto desarrollado está basado en un reactor tubular vertical situado en una cavidad (Figura 13) siendo evaluado en un simulador de radiación solar (Kruesi, y otros, 2014).

El reactor tubular diseñado por investigadores del Laboratorio de Materiales, Procesos y Energía Solar en Odeillo, Francia está compuesto por una cavidad considerada como cuerpo negro que recibe la radiación solar concentrada – que entra por una apertura de 9 cm de diámetro- y de cuatro zonas de reacción tubulares por donde fluye el gas reactivo, por otra parte, este reactor cuenta con una ventana de cuarzo enfriada por una corriente de nitrógeno, que permite la entrada de la radiación y que a su vez, separa la cavidad de la atmósfera (Figura 14); este reactor es utilizado para la disociación de gas natural y fue probado bajo diferentes condiciones de operación (Rodat, y otros, 2009).

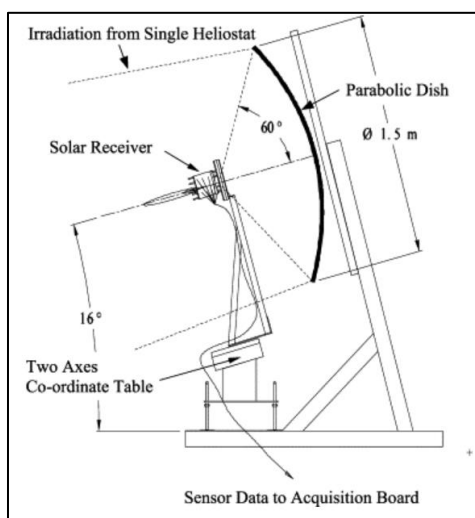


Figura 13. Configuración óptica del reactor solar de partículas (Bertocchi, et al., 2004).

En cuanto a los reactores solares de doble cámara, un grupo de investigadores suizo diseñó un reactor para la gasificación de carbón y biomasa para la producción de syngas utilizando energía solar concentrada como fuente de calor de proceso de alta temperatura. Este reactor consiste en dos cavidades separadas por una superficie de SiC cubierta de grafito, la parte superior tiene la función de absorber la radiación y la parte inferior contiene el lecho empacado de reactante que se encoje a medida que avanza la reacción. El reactor solar es un prototipo que produce 5 kW, sometido a un flujo de radiación concentrada mayor a 2953 soles y opera a temperaturas mayores a 1490 K (Piatkowski, y otros, 2009).

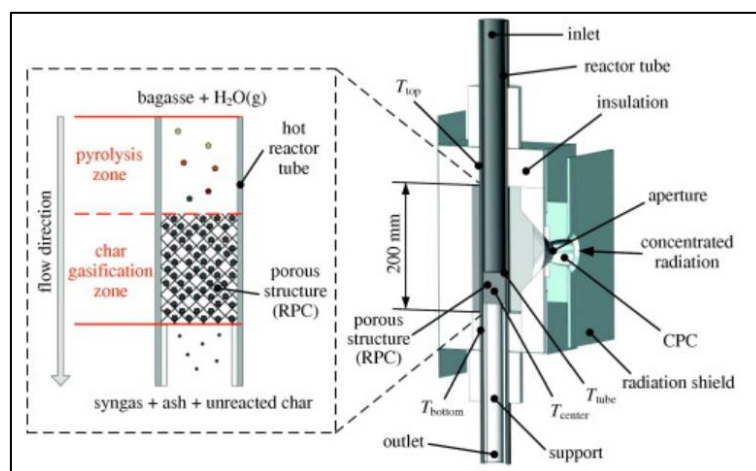


Figura 14. Esquema de reactor solar tubular de dos zonas (Kruesi, et al., 2014).

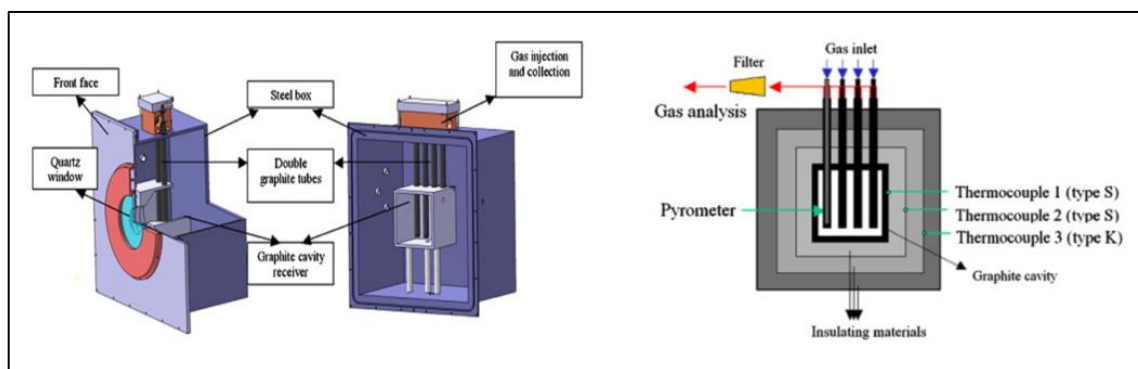


Figura 15. Esquema de reactor solar tubular construido de Odeillo, Francia (Rodat, et al., 2009).

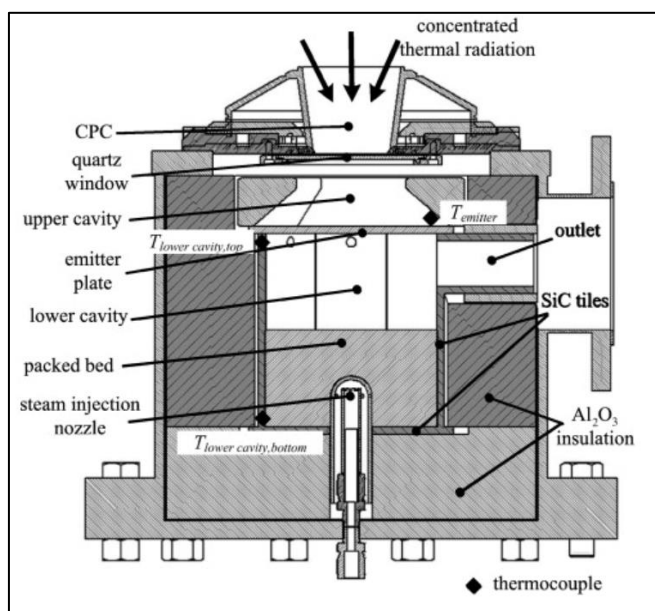


Figura 16. Esquema de un reactor solar de doble cámara (Piatkowski, et al., 2009).

Reactores solares volumétricos

Un grupo de científicos de la Universidad de Minnesota diseñaron un reactor solar con una potencia térmica nominal de 3kW para llevar a cabo una reacción de gasificación de una sal de carbonato fundido a una temperatura de 1200 K y con una presión cercana a la atmosférica; la alimentación de este reactor se prueba en forma continuación y en lote. El reactor es arreglo de cilindros concéntricos que, en su cilindro interno presenta un receptor de cavidad con una longitud de 150 mm y un diámetro interno de 100 mm logrando una absorción aparente del 98% a 1200 K (Hathaway, y otros, 2016).

Investigadores del DRL en Alemania desarrollaron un receptor solar volumétrico monolítico con dos conjuntos de canales separados entre sí. Un conjunto de canales se utiliza para el procesamiento termoquímico. La superficie interna de los canales proporciona una superficie adecuada para contener un catalizador, según sea necesario para el reformado de metano o una variedad de otros procesos termoquímicos. El otro conjunto de canales se usa para calentar el aire. Una gran superficie de los canales y paredes delgadas proporcionan una buena transferencia de calor entre las dos corrientes de gas. El receptor fue montado sobre una carcasa de acero inoxidable con un diámetro

de 46 cm; un extremo del monolito fue expuesto a la radiación solar y cubierto por una ventana de cuarzo con un diámetro de 30 cm y está sujeta por una brida refrigerada por agua. Este reactor está diseñado para producir una potencia térmica de 3kW y se alcanzó una temperatura de 830 °C (Figura 9) (Lapp, y otros, 2017).

En el Instituto de Energía IMDEA de España se construyó un reactor solar, para evaluar analizar la reducción de óxidos metálicos, que consiste en un receptor de cavidad de alúmina rodeado por un revestimiento que funciona como aislante para reducir las pérdidas de calor por conducción. La radiación solar concentrada ingresa al receptor de la cavidad a través de una ventada de vidrio de cuarzo transparente refrigerado por agua y tiene una abertura de 30 mm de diámetro. El tubo principal de gas portador del cilindro se divide en cuatro partes iguales y se conecta radialmente al reactor cerca de la ventana de cuarzo en perpendicular entre sí. El gas argón se usa como gas portador para transportar los productos gaseosos (principalmente O₂) y se alimenta continuamente a la salida del reactor. El reactor está rodeado por una carcasa de acero inoxidable y equipado con termopares, medidores de flujo y sensores de presión para monitorear los experimentos. Las temperaturas alcanzadas dentro del reactor están en función de la reducción del óxido metálico en cuestión; para la reducción térmica MnO₃ se logra entre los 900 a 1000 °C, mientras que para MnO₄ se lleva a cabo entre los 1200 a 1300 °C y para Ce₂O₃ a 1500°C aproximadamente (Alonso, y otros, 2013).

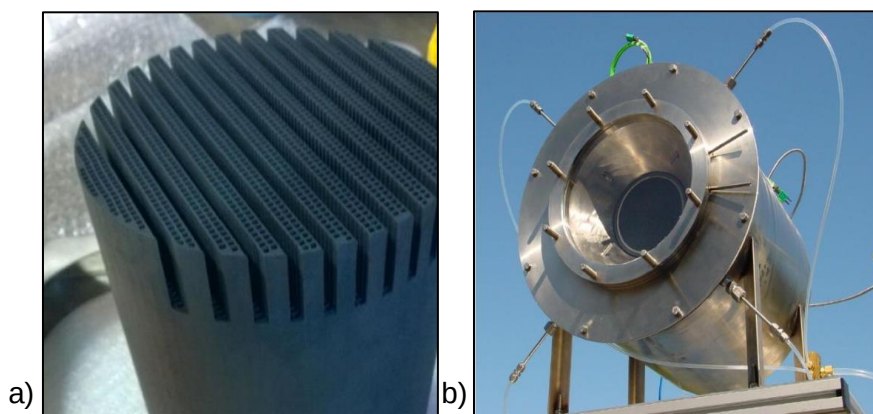


Figura 17 a) Receptor volumétrico b) Reactor solar (Lapp, y otros, 2017).

Receptores volumétricos

Los receptores volumétricos parecen ser la mejor alternativa para resolver el problema de transferencia de calor debido a su funcionalidad, geometría y configuración. El principio básico de funcionamiento consiste en absorber la radiación solar concentrada dentro del volumen de la estructura de un material, generalmente metal, cerámica u otro que sea adecuado con una porosidad específica; posteriormente, el calor absorbido es transferido al fluido de trabajo que pasa a través de la estructura del receptor. Finalmente, el efecto volumétrico causa que la temperatura en la parte irradiada del absorbedor sea más baja que la temperatura de salida, por lo que se generan menos pérdidas de calor por radiación y consecuentemente, una mayor eficiencia del proceso en general (Ávila-Marín, 2011).

Las propiedades deseadas en un material usado como receptores solares de altas temperaturas son alta absorbancia, alta porosidad, transferencia de calor superficial (alta densidad celular), resistencia a altos flujos radiativos (resistencia a la temperatura), transporte de calor radial (conductividad térmica), alta permeabilidad (estructura 3-D) (Fend, 2010).

La estructura altamente porosa de los receptores volumétricos se debe a materiales metálicos o cerámicos. Estos últimos son los más apropiados para alcanzar temperaturas mayores a 800 °C. Los receptores volumétricos son capaces de producir altas temperaturas de salida: con metales, las temperaturas se encuentran entre los 800 a 1, 200 °C, con SiSiC se alcanza 1,200 °C y 1,500 °C con SiC. Otros cerámicos con intervalos altos de temperatura, como la alúmina, con un punto de fusión alrededor de 2, 000 °C, pueden ser utilizados, aunque la desventaja principal es que este material es de color blanco lo que podría ser resuelto dopándolo con SiC para incrementar su absortividad y mantener sus propiedades mecánicas (Ávila-Marín, 2011).

Mientras que, el trabajo de Ceballos-Méndivil refiere la síntesis y caracterización de SiC con la finalidad de ser utilizado para aplicaciones en receptores solares volumétricos, establece dos métodos de obtención de este compuesto (de alta y de baja temperatura) y evalúa sus propiedades ópticas, de textura y térmicas mostrando buenos resultados

que lo convierten en un material ideal para aplicaciones en receptores solares (Ceballos-Méndivil, y otros, 2015).

Ávila-Marín hizo una clasificación de receptores volumétricos para aplicaciones térmicas que se diferencia de las que normalmente se reportan en artículos por geometría, material, tipo de aplicación, etc. Esta nueva clasificación está basada en la combinación de dos factores importantes: la presurización y el material, resultando en cuatro subgrupos con un receptor representativo para definir cada tipo, que básicamente se divide en receptores volumétricos de circuito abierto con/sin absorbedor metálico y en receptores volumétricos de circuito cerrado con/sin absorbedor cerámico (Ávila-Marín, 2011).

La estabilidad del flujo es un factor determinante para el buen desempeño de un receptor. La inestabilidad sucede cuando la caída de presión causa diferentes densidades de flujo de masa, y por lo tanto existen diferentes temperaturas de salida. Kribus describe que un flujo de gas inestable a través del receptor produce un sobrecalentamiento local y, por lo tanto, un rendimiento deficiente y fallas locales, como la fusión y el agrietamiento (Kribus, y otros, 1996).

El modelo que establece Kribus para el flujo estable en un receptor volumétrico indica que se tiene una capacidad limitada para sostener la radiación, y el límite superior de flujo de calor permitido depende de la diferencia de las presiones al cuadrado divididas por la longitud y la relación temperatura-viscosidad. Además, realiza algunas sugerencias para extraer el calor de manera segura del receptor volumétrico que opera a altas concentraciones como utilizar un flujo presurizado en un sistema cerrado para lograr un parámetro de soplado suficientemente alto y controlar la densidad del flujo másico o la temperatura de salida en lugar de la diferencia de presiones (Kribus, y otros, 1996).

La revisión del estado del arte mostró que existen reactores solares que incluyen receptores volumétricos confinados, sin embargo, en esta propuesta se plantea el desarrollo de un reactor solar para fines de investigación y de menor tamaño que los presentados anteriormente.

2.3.2 Estado del arte del modelado computacional para reactores solares

La predicción teórica surge a partir de modelos matemáticos que describen fenómenos físicos. Para los procesos físicos de interés, los modelos matemáticos consisten en una serie de ecuaciones diferenciales que, mediante métodos matemáticos clásicos, puede ser resueltos. Las principales ventajas de cálculos teóricos frente a la investigación experimental son el bajo costo de computación requerido, suministros de información completa y detallada, capacidad de simular condiciones ideales – de modo que en el estudio del fenómeno puedan evaluarse únicamente los parámetros que se consideren esenciales-, capacidad de simular condiciones reales distintas, extremas e inviables en el experimento – debido a los riesgos de seguridad que implican-. Con respecto a las desventajas del cálculo computacional es importante resaltar que la utilidad de dicho análisis depende de la validez de los modelos matemáticos y de la selección de los métodos numéricos (Patankar, 1980).

La selección de la geometría más adecuada para un reactor bajo ciertas condiciones de operación es una de las aplicaciones más frecuentes del modelado computacional de reactores solares. Un grupo de investigadores de la Plataforma Solar de Almería propuso tres geometrías diferentes – tubular, tubular cuadrada y tubular con placa deflectora-. Para esto, se realizó un estudio preliminar en el cual se analizaron las imágenes tomadas por una cámara de infrarrojo para evaluar el perfil de temperatura que se recibe en el punto focal de la parábola del horno – donde se encontraría el reactor solar- con el fin de obtener las condiciones límites que sirven como información para el análisis teórico hecho en el software CFD (FLUENT 6.2.16); posteriormente, se seleccionó el mallado más adecuado de acuerdo a los criterios establecidos (Fluent-Inc, 2004). De acuerdo a los resultados, el perfil de temperatura más homogéneo se logró con la geometría tubular con placa deflectora, la cual retiene el flujo de aire previamente calentado por la radiación solar concentrada (Roldán, y otros, 2013).

En el Instituto de Energía IMDEA de España se diseñó un reactor solar, para analizar la reducción de óxidos metálicos, que consiste en un receptor de cavidad de alúmina rodeado por un revestimiento que funciona como aislante para reducir las pérdidas de calor por conducción; la simulación se realizó en un software con las características que

se describen a continuación: la radiación solar concentrada ingresa al receptor de la cavidad a través de una ventada de vidrio de cuarzo transparente refrigerado por agua y tiene una abertura de 30 mm de diámetro. El tubo principal de gas portador del cilindro se divide en cuatro partes iguales y se conecta radialmente al reactor cerca de la ventana de cuarzo en perpendicular entre sí. El gas argón se usa como gas portador para transportar los productos gaseosos (principalmente O₂) y se alimenta continuamente a la salida del reactor. La temperatura más elevada registrada fue de 2106 K y se logró con un flujo de gas de 3 Lpm (Bellan, y otros, 2013).

Por otra parte, una colaboración de investigadores de México y España diseñó un reactor consiste en una campana horizontal cilíndrica (0.035 m de diámetro interna y 0.044 m de longitud) que contiene una estructura cerámica. La parte frontal de este dispositivo es irradiado directamente con energía solar concentrada suministrada por un horno solar que consiste en un heliostato que sigue al sol y un concentrador parabólico de 2 metros de diámetro (85 cm de distancia focal, con una potencia máxima de 1.4 kW en el punto focal y una distribución gaussiana de la densidad de flujo. Las paredes laterales están rodeadas por un aislante; cuenta con una ventana de vidrio que separa el sistema del medio ambiente para proveer una atmosfera controlada dentro de la campana. Un flujo de gas inerte (nitrógeno) entra por la parte frontal del recibidor, flujo dentro de la estructura porosa. La modelación matemática de este sistema fue realizada en ANSYS FLUENT CFD, primero se realizaron simulaciones sin reacción química con el fin de determinar el comportamiento térmico del reactor para diferentes condiciones de operación y posteriormente, se incluyó la reacción química para estudiar el impacto en la distribución de la temperatura. La radiación solar concentrada recibida en el reactor se consideró como una distribución gaussiana y se resolvieron las ecuaciones gobernantes de conservación de masa, de momentum y de energía – de esta última, una para cada fase del sistema (sólido y gas)- en 2D en estado estable. Como resultado se obtuvo que, para el caso sin reacción química, se necesita un flujo menor a 20 L/min de gas para alcanzar las temperaturas requeridas para la reacción de termo-reducción, que generalmente se dan a 1400 K; sin embargo, un mínimo de 1 L/min es requerido para evitar la máxima temperatura dentro del receptor (1743 K), lo que podría dañarlo irreversiblemente. Un estudio paramétrico realizado, señaló que la longitud del receptor cerámico no afecta significativamente la distribución de la temperatura tanto del sólido

como de la fase fluida; del mismo modo, el cambio de tamaño medio de los poros conduce a cambios despreciables en la distribución de la temperatura del fluido (Villafán-Vidales, y otros, 2011).

El estudio teórico de la transferencia de calor en receptores volumétricos que funcionan con concentración solar es un reto considerable debido a que no es sencillo establecer el problema en los softwares normalmente utilizados, por lo que la combinación de herramientas como el trazado de rayos y la simulación de la transferencia de calor aparentemente han resuelto este inconveniente. Algunos autores proponen realizar el trazado de rayos por el Método de Monte Carlo (MCTR, por sus siglas en inglés) para obtener la distribución del flujo de radiación a partir de la óptica utilizada en el sistema; una vez obtenida, la distribución es tratada como una pared de flujo de calor (uniforme o no uniforme) y considerada como condición frontera, posteriormente, se establecen los parámetros como la porosidad del receptor, emisividad, el coeficiente de transferencia de calor del receptor, la conductividad del fluido y del sólido, flujo másico, etc para realizar el estudio numérico de la transferencia de calor dentro del receptor además de establecer las ecuaciones que describirán el sistema (ecuación de la conservación de masa, ecuación de la conservación de momento y la ecuación de la conservación de energía) (Chen, y otros, 2017) (Wang, y otros, 2013) (Qiu, y otros, 2015) (Soltani, y otros, 2019) (Cagnoli, y otros, 2017). Considerar la radiación solar concentrada como pared de flujo de calor y condición de frontera es posible ya que, en teoría, la radiación solar concentrada puede penetrar el receptor, aunque por el espesor óptico de éste, la radiación solo viaja una distancia corta antes de ser dispersa o absorbida por el propio receptor (Wang, y otros, 2013).

El análisis anterior utilizó aire como fluido de trabajo estableciendo que, por las altas temperaturas de operación, sus propiedades debían considerarse como variables. Sin embargo, Wang y sus colaboradores demostraron que las propiedades del aire tienen influencia poco significativa en la distribución de la temperatura sobre el receptor (Wang, y otros, 2013).

Por otra parte, la necesidad de lograr una distribución uniforme de flux solar en el área fotovoltaica, térmica o de otro tipo de receptores en dispositivos de concentración solar es una problemática común (Pérez-Enciso, Gallo, Rivero-Rosas, Fuentealba-Vidal, &

Pérez-Rábago, 2016). Se han encontrado en la literatura estudios relacionados con el método de trazado de rayos para la caracterización de concentradores solares (Yang, Wang, Lund, Jiang, & Liu, 2018) (Soltani, Bonyadi, & Avargani, 2019) (Qiu, y otros, 2015) (Pérez-Enciso R. A., 2015) (Xia, Dai, & Shuai, 2012) (Shuai, Xia, & Tan, 2010) (Johnston, 1998) (Jaramillo, Pérez-Rábago, Arancibia-Bulnes, & Estrada-Gasca, 2008) (Dahler, y otros, 2018) (Yu, Yuan, Lu, Ding, & Lu, 2017) que consideran el análisis de trazados de rayos de un sistema óptico – cuya metodología se describe en la siguiente sección -.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE FLUX RADIATIVO EN UN CONCENTRADOR DE DISCO PARABÓLICO

*“Cada vez que un estudio científico presenta algunos datos,
va acompañado de un margen de error: un recordatorio discreto
pero insistente de que ningún conocimiento es completo o perfecto”.*

*- Carl Sagan, “El mundo y sus demonios.
La ciencia como una luz en la oscuridad”.*

En este capítulo se presentan las traducciones al español de los artículos publicados resultados de este trabajo de tesis referentes a la evaluación óptica del concentrador parabólico. En la sección de anexos, se incluyen los artículos enlistados a continuación.

1. **Cisneros-Cárdenas, N.A.**, Cabanillas-López, R., Calleja-Valdez, R., Pérez-Enciso, R., Pérez-Rábago, C., & Gutiérrez-García, R. (2020). Image and Ray Tracing Analysis of a Parabolic Dish Collector to Achieve High Flux on a Solar Volumetric Reactor. *MRS Advances*, 5(50), 2545-2553. DOI:10.1557/adv.2020.144
2. **Cisneros-Cárdenas, N. A.**, Cabanillas-López, R., Pérez-Enciso, R., Martínez-Rodríguez, G., García-Gutiérrez, R., Pérez-Rábago, C., Calleja-Valdez, R., & Riveros-Rosas, D. (2021). Study of the Radiation Flux Distribution in a Parabolic Dish Concentrator. *Energies*, 14(21), 7053. DOI:10.3390/en14217053

De igual manera, la información de los artículos es complementada con el fin de profundizar en los conceptos o temas que ayudan a entender el panorama completo del estudio óptico.

3.1 Introducción

La energía solar concentrada puede ser utilizada como una fuente renovable de energía para diferentes procesos como la producción de combustibles solares, electricidad, y calor de proceso. Estos son algunos de los más importantes en la energía solar debido al desarrollo de tecnologías y generación de electricidad utilizada en varias aplicaciones como en edificaciones, movilidad y manufactura [1]. La radiación solar concentrada permite lograr una alta densidad energética utilizable para llevar a cabo los procesos mencionados. Las tecnologías de concentración utilizan lentes y/o espejos que redireccionan los rayos solares a un área más pequeña que la reciba. La diferencia entre estas tecnologías es su proceso de concentración, por ejemplo, el disco parabólico, el canal parabólico, reflector lineal tipo fresnel, torre central, y horno solar [2]. De cualquier forma, la transformación de radiación solar concentrada en potencia térmica es un reto considerable que ha sido resuelto utilizando receptores solares [1].

La distribución de radiación solar producida por un sistema concentrador es usualmente no uniforme lo que produce una distribución no uniforme de temperaturas en el receptor causando daños en el material y afectando el proceso de transferencia de calor, así como el desempeño del sistema en general [3]. La distribución de la radiación solar concentrada depende de la tecnología y, por lo tanto, de la configuración óptica utilizada para producir radiación solar concentrada. De este modo, el estudio de la distribución de radiación permite una mejor comprensión del problema al determinar un volumen alrededor de la zona focal donde la densidad de radiación es uniforme; este volumen es conocido como protosuperficie [4] aunque es importante mencionar que no provee una solución completa para lograr un flujo homogéneo. La superposición de la serie de volúmenes efectivos obtenidos en diferentes direcciones alrededor del eje focal se utiliza para la construcción de una isosuperficie. El flux radiativo depende de la posición y la dirección del plano utilizado para el cálculo, así que el volumen efectivo no presenta una

distribución uniforme así como la radiación a lo largo de los planos horizontal y tangencial tendrán diferentes valores [4,5].

El volumen efectivo se refiere a la superficie creada a partir de intensidades iguales de flujo radiativo obtenidas de las distribuciones de flujo radiativo que se presentan sobre superficies planas paralelas y a lo largo de un mismo eje. Es la generación de imágenes tridimensionales a partir de planos bidimensionales escaneados en una dirección [4–6]

Los métodos experimentales, tanto directos como indirectos, y los métodos teóricos – soportados por simulación- reportados en la literatura han sido utilizados para revelar la distribución de flux radiativo producido por un sistema concentrado con resultados aceptables.

Los métodos teóricos se basan en técnicas de simulación que provee información detallada sobre la distribución de flux solar, aunque solo funcionan para validar los resultados; estas técnicas utilizan procedimientos matemáticos para predecir el resultado del proceso de radiación realizado por un sistema de concentración, dichos procedimientos matemáticos (simulación por trazado de rayos) se basan en diferentes métodos como Método por Trazado de Rayos Simple, Método de Trazado de Rayos por Convolución y Método de Monte Carlo [4,7], dichos métodos han sido combinados con simuladores solares mostrando resultados satisfactorios. El método de trazado de rayos considera que la luz se desplaza desde una fuente luminosa describiendo una trayectoria en forma de línea hasta impactar con una superficie que, dependiendo de sus propiedades físicas asignadas, pueden modificar su dirección por reflexión o refracción. Para realizar el trazado de rayos existen tres diferentes técnicas: Método de Trazado de Rayos Simple, Método de Trazado de Rayos por Convolución y Método de Monte Carlo. El método de trazado de rayos simple se refiere a una distribución de rayos sistemática de rayos por malla y proyección de rayos del cono solar de forma individual; mientras que el trazado de rayos por convolución se trata de una distribución de rayos por malla y cálculo del cono solar degradado por la técnica matemática de convolución, sólo se proyecta el rayo central y el cono es reconstruido en el receptor. Por otra parte, el Método de Monte Carlo, que es un método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias, se trata de una simulación

estadística del fenómeno de transferencia radiativa basada en el comportamiento de la emisión, la reflexión y la absorción de las superficies del sistema óptico [8].

Por otra parte, los métodos experimentales directos utilizan un sensor de flux que provee información sobre el flux incidente mientras que los métodos experimentales indirectos utilizan cámaras digitales para revelar el flux solar reflejado por una superficie difusa [9]. Dichos métodos serán descritos detalladamente en la siguiente sección de este capítulo. Estos métodos han sido utilizados en proyectos en etapa de I&D de sistemas de concentración solar para revelar la distribución de flux en planos bidimensionales. Algunos estudios publicados anteriormente revelan la distribución de flux radiativo sobre receptores volumétricos pero no generan una distribución de flux radiativo uniforme mediante la aplicación del método de trazado de rayos de Monte Carlo, donde la fuente de irradiación solar concentrada es un concentrador de foco puntual [3,10–12].

Du et al. [13] reportaron la combinación de una técnica computarizada de tomografía de rayos X para reconstruir un modelo realista de un receptor poroso y el método de trazado de rayos de Monte Carlo para obtener la distribución de flux solar lo más parecido a la realidad. Por otra parte, Ali et al. [1] propusieron consideraciones teóricas para simular las condiciones de operación del receptor. Eccher et al. [14] comparó el spot de radiación solar concentrado experimental y teórico sin realizar ninguna variación en el error óptico global; el sistema de concentrador para este estudio fue un disco parabólico; la diferencia entre los spots de radiación solar concentrada se atribuye a las imperfecciones y desviaciones del diseño del concentrador debido al proceso de manufactura. Wang et al. [15] asumiendo valores teóricos para la irradiancia directa normal, la reflectividad y el número de rayos para sus simulaciones. Por último, el trazado de rayos ha sido validado con la reproducción de sus resultados a partir de datos experimentales en concentradores y han sido ampliamente aceptados [7,16,17].

Riveros-Rosas et al. [4] reportaron la generación de isosuperficie producidas por diferentes sistemas de concentración solar como disco parabólico, plato rectangular con curvatura parabólica y un concentrador de facetas esféricas con perfil parabólico mediante la aplicación de un modelo número variando el error óptico de los espejos. Por otra parte, Pérez-Enciso et al. [7] reportaron la validación de los volúmenes efectivos

generados por un horno solar y los obtenidos experimentalmente con un error óptico establecido previamente, obteniendo resultados consistentes.

En resumen, los métodos teóricos y experimentales se han descrito en la literatura para revelar la distribución de flux solar producido por sistemas de concentración solar y para obtener la distribución de radiación en receptores volumétricos. Sin embargo, las metodologías teórico-experimentales para la generación de volúmenes efectivos para concentradores de disco parabólico a partir de la determinación del error óptico global no se han reportado. Este estudio pretende revelar la distribución de flux radiativo producido por un sistema concentrador de disco parabólico de segunda superficie (Figura 9), desarrollado y construido por investigadores de la Universidad de Arizona [18], para la producción de electricidad a partir de celdas fotovoltaicas de alta eficiencia. De acuerdo con la literatura, este tipo de tecnología de concentración presenta una distribución en extremo no uniforme [16,17,19], es por ello la importancia de su estudio.

En este estudio, se presenta la validación del estudio numérico para la construcción de volúmenes efectivos y su comparación con los generados a partir de datos experimentales. La generación de volúmenes efectivos en dirección perpendicular al eje focal del sistema concentrador es el primer paso. Una isosuperficie puede ayudar a reducir los picos de flux y asistir en el diseño del receptor para este sistema de concentración solar en especial. El sistema concentrador evaluado es el sistema fotovoltaico de alta concentrado o “2M”, que integra un sistema de seguimiento solar de dos ejes, un sistema de enfriamiento para las unidades de conversión de potencia y un sistema de control; este concentrador es de óptica de imagen.

Como resultado de este estudio, se espera que los volúmenes efectivos presenten formas de cilindros con esquinas regulares debido a la geometría del espejo concentrador. Sin embargo, y de acuerdo a la literatura, los errores ópticos de la superficie pudieran generar un tipo de anomalía óptica que, a su vez, pudiera ser agravada por otros factores como los esfuerzos mecánicos producidos por la gravedad y el soporte del espejo, esfuerzos térmicos debido a la temperatura ambiente, a la inclinación del sistema óptico y a la dirección y velocidad del viento [20].



Figura 8. Sistema Fotovoltaico de Alta Concentración, también llamado "2M", localizado en la Plataforma Solar de Hermosillo en Hermosillo, Sonora, México.

3.2 Metodología

La metodología seguida para este estudio teórico-experimental considera las siguientes secciones: la descripción de los experimentos, determinación del error óptico y la generación de los volúmenes efectivos.

3.2.1 Descripción de los Experimentos

El método de cámara objetivo – que se describe en la siguiente sección- se realizó mientras el concentrador se encontraba en operación – debido a que este tipo de tecnología solo funciona con irradiancia directa normal-. A causa de la alta temperatura que produce la alta concentración sobre la superficie difusa es necesario que el sistema de enfriamiento funcione al mismo tiempo que se lleva a cabo la captura de imágenes.

Los experimentos para la determinación del error óptico y para la generación de volúmenes efectivos se realizaron alrededor del mediodía solar con el fin de que los valores de irradiancia directa normal no presentaran variaciones significativas con respecto al tiempo de ejecución de los experimentos.

En la Figura 9 se muestra el Sistema de Alta Concentración o “2M” instrumentado para la captura de las imágenes de distribución de flux solar. En dicha figura, se aprecia que el sistema se encuentra en modo de seguimiento. Por otra parte, la cámara ccd y la superficie difusa montadas sobre el actuador lineal que se mueve sobre el eje óptico del disco parabólico, alejándose o acercándose según los comandos utilizados. La superficie difusa está conectada al sistema de refrigeración.



Figura 9. Sistema de Alta Concentración Solar intervenido para la captura de imágenes de la distribución de radiación solar en la zona focal.

Método de Cámara-Objetivo y Sensor de Flux

Para la caracterización del concentrador de disco parabólico “2M” se siguió el método de cámara objetivo (MCO) (Figura 10) que consiste en concentrar la radiación solar sobre una superficie difusa montada sobre un actuador lineal que facilita el movimiento sobre el eje óptico de la parábola y una cámara CCD que registra la distribución de brillo de flux radiativo sobre la superficie, la intensidad de la radiación concentrada reflejada por el espejo concentrador se calibró utilizando un radiómetro circular; es decir que para medir y revelar la distribución de flux radiativo se siguieron dos métodos: uno directo y otro indirecto.

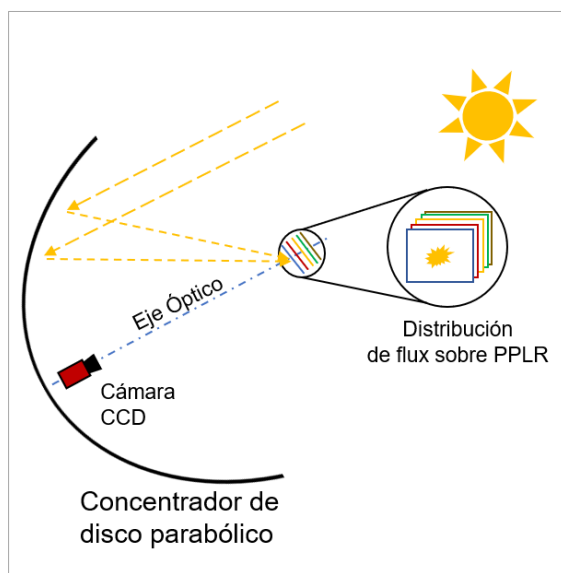


Figura 10. Esquema del set experimental del Método Cámara-Objetivo para la evaluación de un concentrador de disco parabólico.

Las ventajas del MCO son tiempo de medición corto, resolución espacial alta y alta confiabilidad [9], por lo que se ha utilizado en distintos proyectos para la evaluación de sistema óptico [5,7,17,19,21–25].

La cámara de dispositivo de carga acoplada (CCD, por sus siglas en inglés) utilizada durante los experimentos (Figura 11) se le adaptó un filtro con respuesta lineal a la intensidad de la luz; es importante decir que el rango dinámico de la cámara debe mantenerse a lo largo del experimento. Dicha cámara tiene una matriz de 1920x1080 píxeles, y es capaz de mostrar una resolución de 256 niveles en la escala de grises.

Por otra parte, la superficie difusa tiene la característica de ofrecer reflexión difusa, es decir, que independientemente del ángulo de incidencia de la radiación, este tipo de superficie refleja en todas las direcciones; para este trabajo se utilizó una Placa Plana Lambertiana Refrigerada (PPLR, por sus siglas) (Figura 12) compuesta de una lámina de aluminio -sometida a un proceso de arenado para eliminar cualquier residuo de pintura, grasa u óxido y lograr una superficie uniforme- unida a una de nylamid con entradas y salidas para el flujo del refrigerante; la PPLR se montó sobre un actuador

lineal (Figura 13) que se movía automáticamente mediante un programa de control a lo largo del eje óptico para facilitar el experimento. Para enfriar la placa se necesitaron dos equipos de intercambiadores de calor conectados en paralelo con una capacidad de remoción total de 800 W de la marca ThermoCube (Figura 14) con flujo másico de 1 Lpm.

La PPLR posee una apertura donde se colocó el radiómetro circular (Figura 15) (también conocido como Gardon), que basa su funcionamiento en recibir la radiación solar concentrada sobre una superficie circular delgada de constantán que está unida a un bloque circular de cobre; la energía absorbida por la superficie de constantán fluye radialmente hacia el bloque de cobre que actúa como un reservorio de calor a temperatura constante – debido a que está siendo enfriado-, como resultado de esta distribución radial de flujo de calor, la temperatura de la superficie de constantán es superior a la del bloque de cobre, esta diferencia de temperaturas es medida con un termopar y puede relacionarse a través de una constante con la intensidad de radiación [26].



Figura 11. Cámara CCD utilizada fue de 8 bits de la marca Pike Technologies versión 210B.

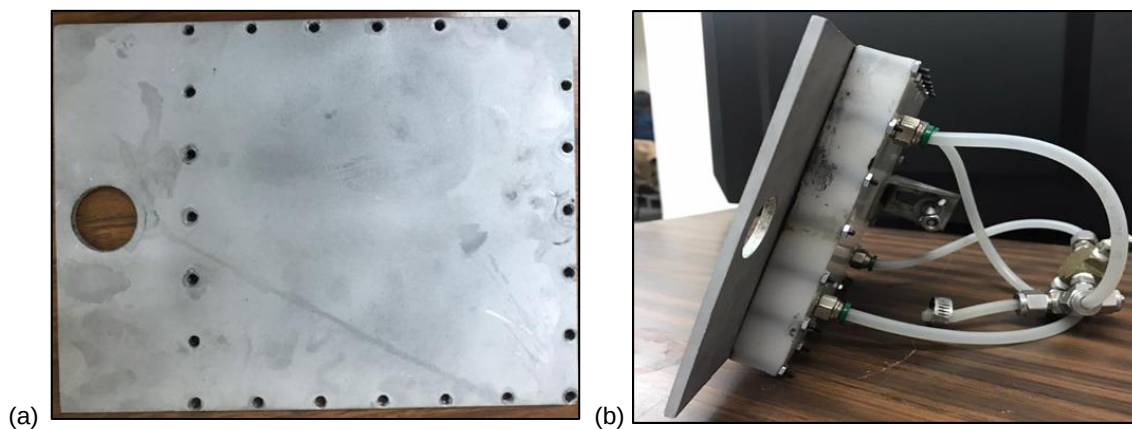


Figura 12. (a) Placa Plana Lambertiana Refrigerada (PPLR) con dimensiones de $0.15 \times 0.25 \text{ m}^2$ (b) PPLR con conexiones para el sistema de enfriamiento.

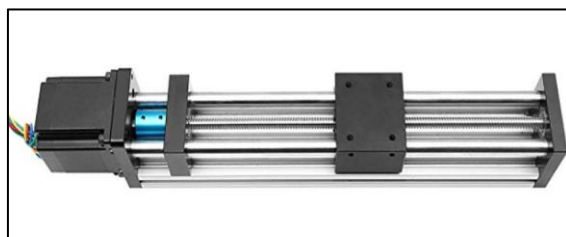


Figura 13. Actuador lineal.



Figura 14. Intercambiador de calor.



Figura 15. Radiómetro circular, también conocido como Gardon.

Validación de la Cámara CCD

Las cámaras CCD (dispositivos de carga acoplada) han sido utilizadas debido a la respuesta lineal que presentan a un amplio intervalo de intensidades de luz. Consisten en un sensor de celdas diminutas que basa su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico que libera electrones cuando incide radiación sobre éste. En todas las CCDs, el ruido electrónico está relacionado directamente con la temperatura, por lo que el fabricante especifica un intervalo de temperaturas en el que garantice que funcione idealmente.

Para validar la relación lineal que caracteriza a las cámaras CCD entre la escala de grises y la intensidad de la luz, se desarrolló una metodología experimental en la que se seleccionó una escala de grises digital (Figura 16 (a)) – tomada como referencia- para imprimirla; a dicha escala impresa (Figura 16 (b)) se le tomó una fotografía con la cámara CCD para darle el tratamiento adecuado utilizando el software de licencia libre ImageJ que permite extraer información sobre la distribución de la intensidad de la luz en relación con la escala de grises; posteriormente, se le da el mismo tratamiento a la imagen digital tomada como referencia y se comparan entre sí para determinar la desviación que presenta la imagen impresa de la referencia (Figura 17). El set experimental (Figura 18) se instaló al aire libre a la sombra durante un día soleado. La escala de grises se colocó en una pared vertical a 1.5 m de distancia de la cámara CCD.

Es importante señalar que, aunque en el proceso de impresión se pierde calidad en la escala de grises debido a varios factores como la calidad del papel, de la tinta y de la impresora, se espera que presente un comportamiento similar a la escala de grises de referencia.

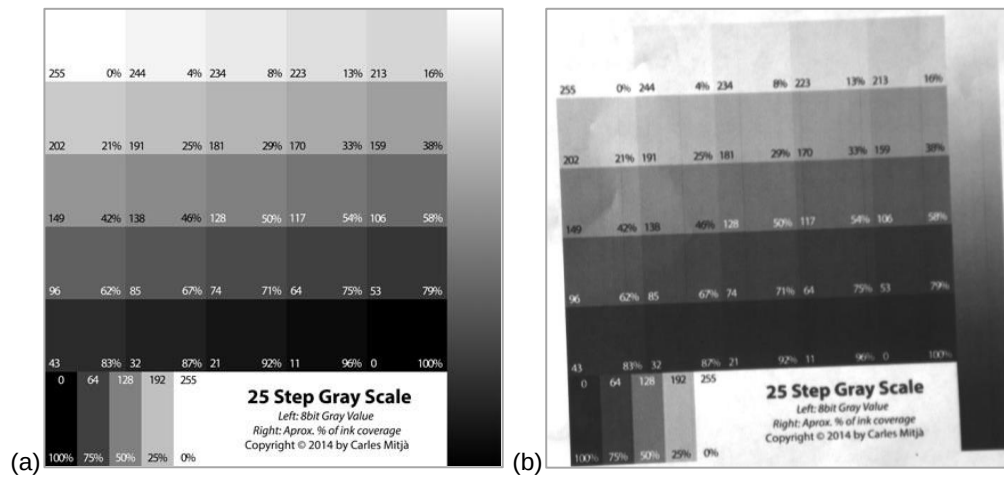


Figura 16. Escala de grises: (a) referencia digital; (b) impresa.

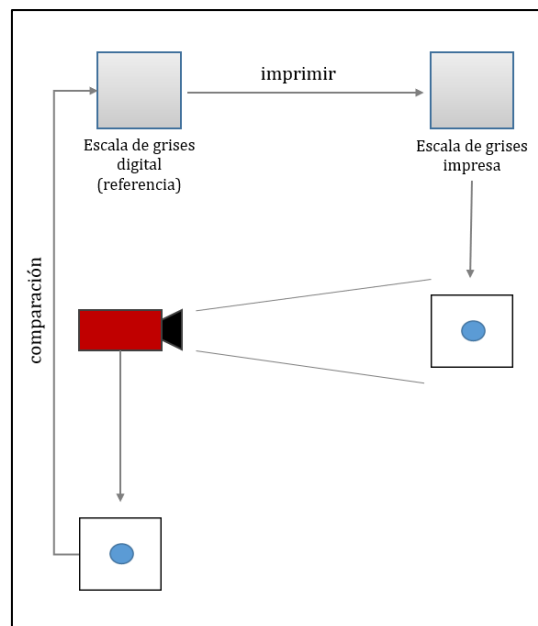


Figura 17. Esquema de la metodología seguida para la validación de la cámara.

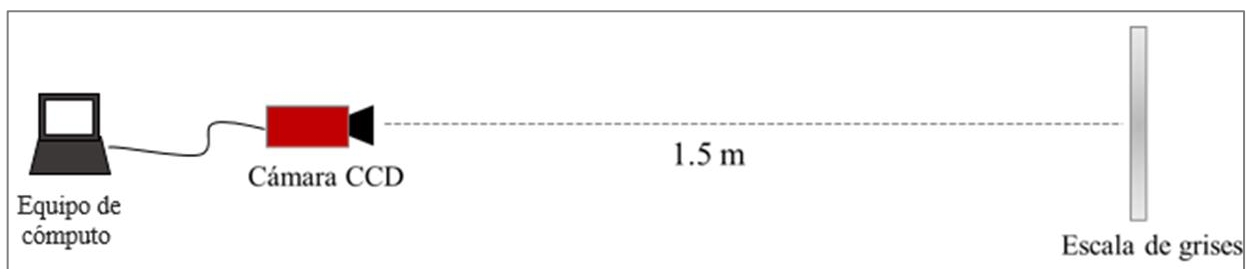


Figura 18. Esquema del set experimental.

A continuación, se presentan los resultados de la validación de la cámara. En la Figura 19 se presentan dos líneas: una de color azul – que corresponde al patrón de referencia de la escala de grises- y otra de color anaranjado – que se hace referencia al análisis de la fotografía de la imagen impresa-. En el eje horizontal se presenta la distancia adimensional y en el eje vertical la escala de grises. En esta gráfica se aprecia que los resultados de la referencia de la escala de grises presentan una relación lineal en la escala de grises mientras que en la de la imagen impresa se tienen algunas variaciones, en particular en el intervalo de 0 a 45 en la escala de grises.

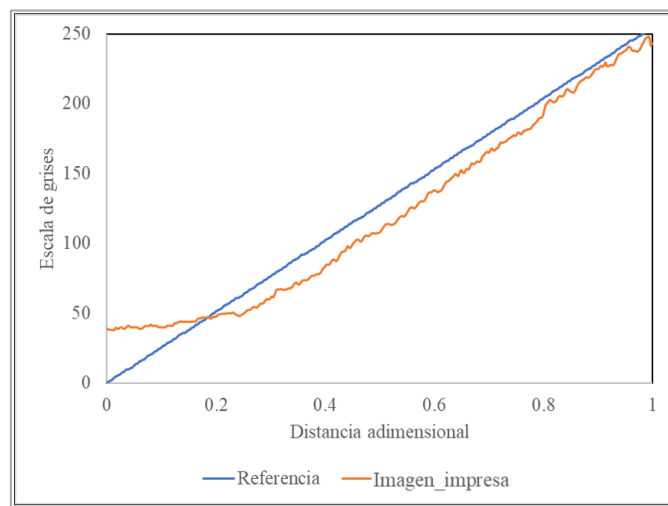


Figura 19. Relación de escala de grises y distancia adimensional para la validación de cámara CCD.

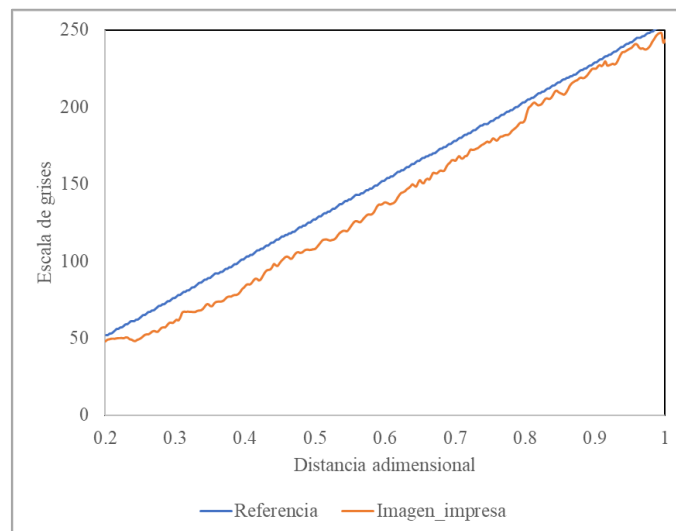


Figura 20. Relación de escala de grises y distancia adimensional para la validación de cámara CCD.

En contraste con la gráfica anterior, en la Figura 20 se elimina la sección de la distancia adimensional de 0 a 0.2 que corresponde a la sección de 0 a 50 en la escala de grises - que contribuirían a un error considerable- debido a que no es una sección de interés, sino la parte más elevada de la escala que corresponde a valor de 200 a 250, en la que se presenta una variación menor en relación con la referencia de la escala de grises.

El análisis de los resultados de la validación de la cámara CCD señala una desviación estándar de ± 2.95 entre los valores de referencia y los de la imagen impresa, lo que puede considerarse como un error pequeño si se toma en cuenta que en el proceso de impresión se pierde calidad en la escala de grises debido a varios factores como la calidad del papel, de la tinta y de la impresora. Dicho esto, se estima que la cámara CCD utilizada para la captura de imágenes de la radiación solar concentrada produce resultados confiables.

Simulación por Trazado de Rayos

En este estudio, se realizó la simulación por trazado de rayos para la caracterización óptica del sistema, tratando de simular la respuesta del sistema bajo condiciones de operación reales [27].

Tabla 1. Parámetros físicos para la Simulación por Trazado de Rayos

	Concentrador de Disco Parabólico	PPLR
Dimensiones	1.65 x 1.65 m ²	0.15 x 0.25 m ²
Punto Focal	1.5 m	-
Reflectividad	0.9 ⁱ	0
Error óptico global del sistema	Por definir	-
Distancia desde el vértice	-	1.5 m

ⁱ Este valor fue proporcionado por la hoja de datos técnicos del concentrador de disco parabólico.

El enfoque de esta caracterización se basó en el Método de Trazado de Rayos por Monte Carlo para lo que se consideraron las propiedades físicas del sistema óptico y las condiciones ambientales.

Para llevar a cabo la simulación por trazado de rayos se utilizó el software Tonatiuh v.2.2.4, que es un paquete computacional de modelado óptico para sistemas solares. Este software de licencia libre fue desarrollado por el Centro Nacional de Energías Renovables de España (CENER, por sus siglas) en Sarriguren, Navarra, España en colaboración con la Universidad de Texas en Brownsville (BTU) con el apoyo del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) [28]. El número de rayos utilizado se estableció a partir de los resultados del estudio de independencia de rayos que considera los parámetros descritos en la Tabla 1, así como un valor de irradiancia directa normal de 1000 W/m^2 , la forma solar estándar y la razón circunsolar de 0.02 cuyo valor fue determinado experimentalmente mediante el análisis de la imagen del disco solar (Figura 21). El estudio de independencia de rayos es esencial para eliminar el efecto del número de rayos en la solución numérica [29]. Es por lo anterior que se analizó la relación entre la potencia máxima y el número de rayos. El tamaño de malla de las imágenes obtenidas experimentalmente fue de 500×500 , mientras que para las imágenes simuladas se fijó en 250×250 . La simulación para este estudio consideró un receptor plano ubicado a 1.5 m del vértice de la parábola, y el número de rayos se varió de 0.01 a 40 millones. Se estableció un valor de incertidumbre del 4.0%. La Tabla 2 muestra que para 5 millones de rayos, la incertidumbre permanece por debajo del valor establecido presentando variaciones insignificantes. Por lo anterior, se seleccionó 20 millones de rayos para las simulaciones.

La razón circunsolar, CSR, representa la porción de radiación incidente desde la región circunsolar con respecto al total de irradiancia directa. Esta razón resulta de la dispersión de la luz solar directa a través de pequeños ángulos debido a las moléculas y los aerosoles presentes en la atmósfera. Aunque es una práctica común utiliza un valor aproximado [30], si se pretende reproducir las condiciones experimentales en el proceso de simulación, este valor debe ser determinado experimentalmente. Se capturó la imagen del disco solar (Figura 21) con la cámara CCD descrita previamente y equipada con filtros lineales que permitieron obtener

una imagen no saturada justo después de la aplicación del método de Cámara-Objetivo. Después de esto, se analizaron los perfiles de distribución solar en la parte central de la imagen obtenida y se compararon con los diferentes perfiles de formas solares producidas por el software variando el valor de csr . La razón circunsolar se determinó mediante el empate de los perfiles teóricos con el experimental (Figura 22) [31].

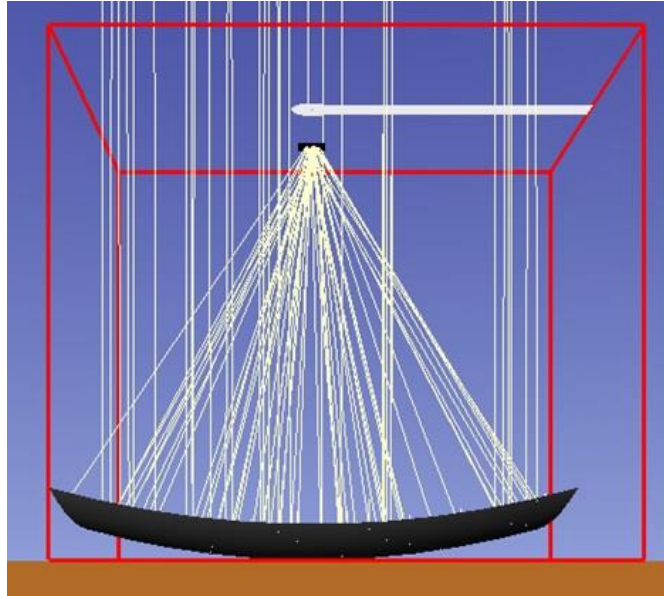


Figura 21. Simulación por Trazado de Rayos en Software Tonatiuh.



Figura 21. Imagen del disco solar.

Tabla 2. Resultados del estudio de independencia de rayos

Número de Rayos (Millones)	Potencia Máxima (W)	Incertidumbre (%)
0.01	3.36×10^7	48.6
0.05	1.73×10^7	37.5
1	1.08×10^7	6.5
5	1.01×10^7	1.5
10	9.94×10^6	-0.5
15	9.99×10^6	0.2
20	9.96×10^6	2.2
25	9.75×10^6	-1.1
30	9.85×10^6	1.1
35	9.75×10^6	0.5
40	9.70×10^6	-0.5
45	9.75×10^6	

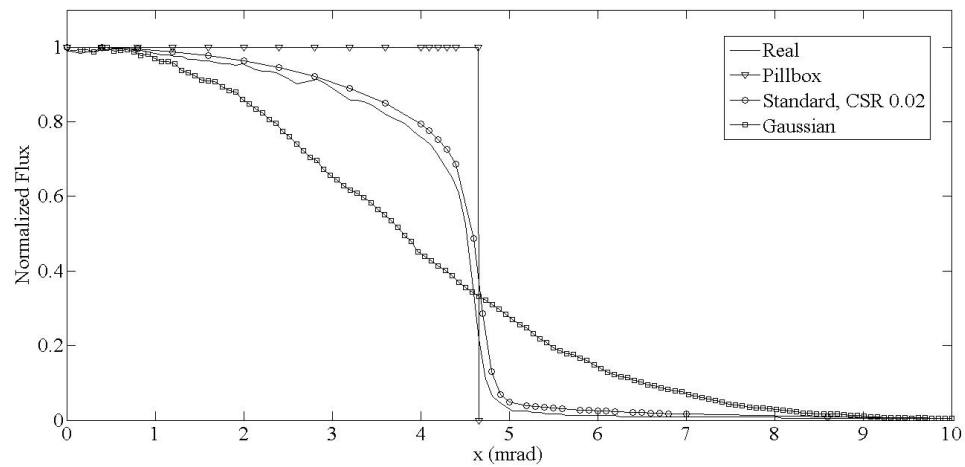


Figura 22. Perfiles normalizados de la distribución del disco solar.

3.2.2 Determinación del Error Óptico del Sistemas

Por la naturaleza del sistema concentrador a evaluar, el error óptico del espejo se describe por la diferencia entre el diámetro del sol real y el diámetro del sol degradado producido por el espejo concentrado, que puede ser aproximado con una distribución normal o gaussiana.

Los errores microscópicos o de rugosidad producen un ensanchamiento en el cono solar y modifican la forma solar tendiendo a convertirse en una distribución gaussiana. Estos errores están asociados con la estructura cristalina del sustrato y del metal depositado, así como el pulido de la superficie una vez maquinada. Los errores macroscópicos o de ondulación producen una desviación en la dirección del cono reflejado debido al error de la pendiente de la superficie, es por ello, que en este caso el ángulo de error se duplica. Este tipo de errores se relacionan con la maquinaria que da la curvatura al espejo. En resumen, el error óptico de una superficie reflectiva es el conjunto de estos errores macroscópicos y microscópicos y se calcula como se muestra en la ecuación 1 [23]:

$$\sigma_g = (\sigma_r^2 + 4\sigma_o^2)^{1/2} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde σ_g es el error global óptico, σ_r se refiere al error por rugosidad y σ_o es considerado como el error por ondulación.

Adicionalmente a los errores previamente descritos, la desviación causada por el sistema de seguimiento (σ_{track}), el desplazamiento, los errores causados por los sistemas de control y adquisidor de datos, así como la forma solar (σ_{sun}) deben ser considerados deben formar parte del cálculo para la determinación del error óptico global del sistema. Por lo anterior, dichos parámetros se agregan a la ecuación previa y se muestra el resultado en la ecuación 2 [20]. Si estos parámetros se omiten en la formula, el error óptico global del sistema pudiera subestimarse. Algunos de estos parámetros son afectados por condiciones de operación no controlables como la irradiancia solar, la temperatura ambiente y la dirección y velocidad del viento.

$$\sigma_g = (\sigma_r^2 + 4\sigma_o^2 + \sigma_{track} + \sigma_{sun})^{1/2} \quad \text{Ec. (2)}$$

El error óptico global del sistema se determinó mediante la comparación de los perfiles de distribución de flux solar concentrado obtenidos de forma experimental y teórica a partir de las imágenes escaneadas en la zona focal del sistema concentrador, evaluándolos en el eje vertical y horizontal del centroide de flux solar concentrado. Primero, se realiza una aproximación cualitativa generando perfiles de distribución teóricos con diferentes valores de error óptico y comparándolos con el perfil real para determinar el intervalo en donde se encuentra este último. Una vez establecido el intervalo de error donde se encuentra el perfil de distribución real, se realiza una aproximación cuantitativa, variando el error en intervalos más pequeños y se selecciona el que presenta una menor desviación estándar en comparación con el perfil real. Este método solo revela el error óptico global del sistema, pero no describe cada uno de los términos descritos en la Ecuación 2.

3.2.3 Generación de volúmenes efectivos

Para generar los volúmenes efectivos, se capturaron de forma experimental las imágenes de la distribución de flux solar producidas por el sistema concentrador sobre la PPLR. Una vez determinado el error óptico global del sistema, las imágenes de la distribución de flux solar teóricas fueron generadas por simulación.

El sistema concentrador debe estar en operación durante el escaneo de las imágenes. Las imágenes fueron escaneadas desde 1.4 a 1.6 m del vértice del espejo parabólico, con una separación de 0.002 m entre ellas (Figura 23). Un total de 31 planos bidimensionales y paralelos al eje óptico del concentrador fueron escaneados. Posteriormente, la información entre los planos bidimensionales fue generada por interpolación a través de comandos en el software MATLAB v.2014a, y se construyeron imágenes tridimensionales de diferentes niveles de irradiancia.

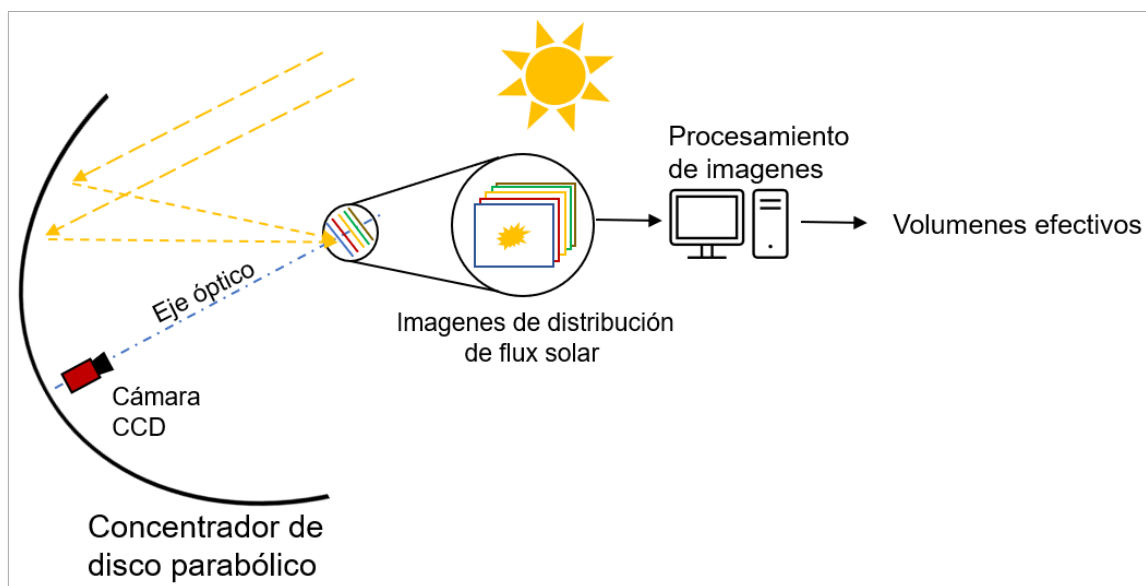


Figura 23. Esquema del proceso de generación de volúmenes efectivos.

3.3 Resultados y Discusión

3.3.1. Error óptico global del sistema

La imagen capturada en la zona focal del sistema concentrador se muestra en la Figura 24(a). De esta imagen, se obtuvieron los perfiles de distribución de irradiancia como se señala con las líneas rojas en la figura mencionada. Estos perfiles muestran una distribución gaussiana. Se realizó una aproximación cualitativa variando el error desde 0 a 4 mrad con incrementos de 1 mrad, determinando que el error óptico global del sistema se encontraba entre 2.0 y 3.0 mrad; dichos perfiles aproximados son reproducidos de forma teórica (Figura 25). Una vez establecidos los límites del error óptico global del sistema, se realizó una aproximación cualitativa variando el error desde 2.0 a 3.0 mrad (Figura 26). El error óptico global del sistema se reveló a 2.8 mrad, debido a que este valor representa la menor desviación estándar (del real con respecto al teórico). Finalmente, el valor máximo registrado del radiómetro fue de 10 MW/m^2 .

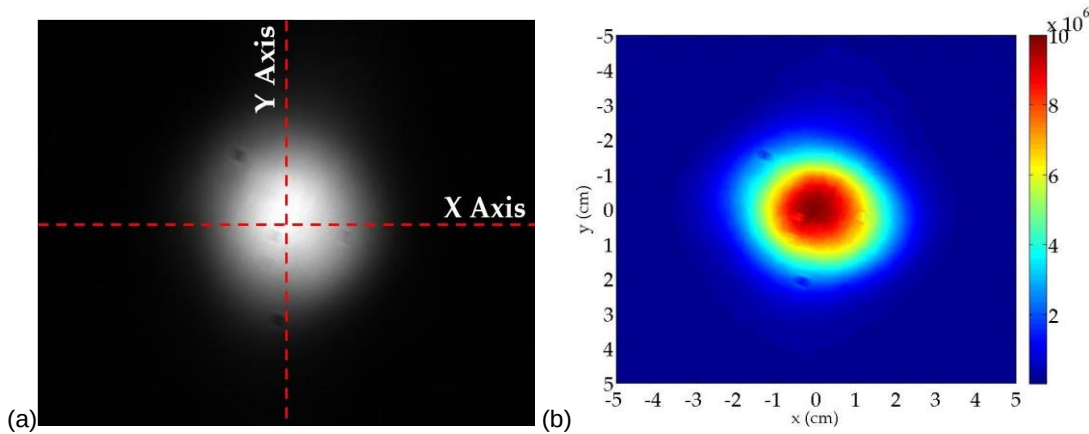


Figura 24. Imagen real de la radiación solar concentrada en la zona focal: (a) Escala de grises y (b) Valores reales de flux (MW/m^2).

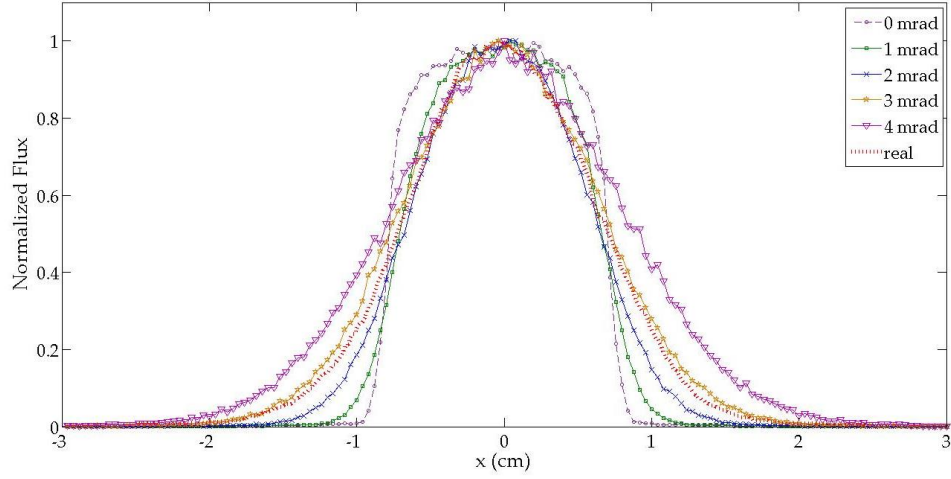


Figura 25. Aproximación cualitativa del perfil de distribución de radiación solar con respecto a los perfiles teóricas, en $x=0$, $y=[-3,3]$, variando el error óptico global del sistema desde 0 a 4 mrad con incrementos de 1 mrad.

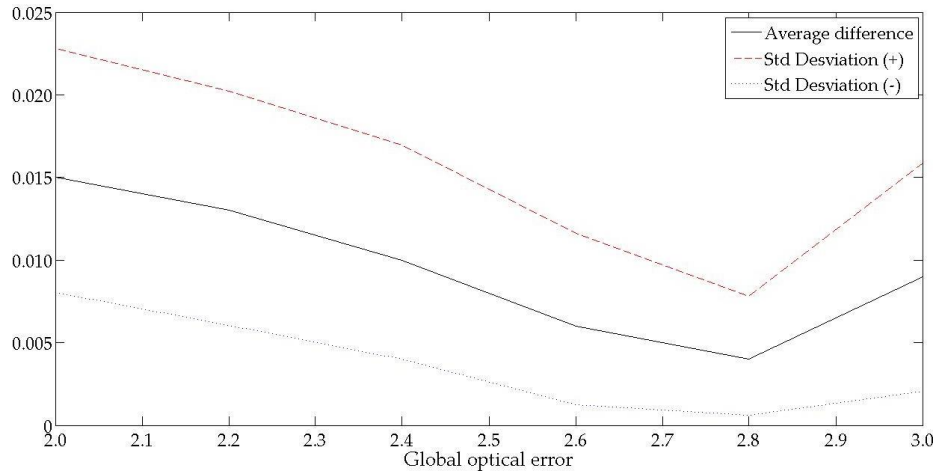


Figura 26. Aproximación cuantitativa del perfil de distribución solar real variando el error desde 2.0 a 3.0 mrad.

3.3.2. Generación de volúmenes efectivos

Los volúmenes efectivos tanto reales como teóricos se presentan en las Figuras 27 y 28, respectivamente. Los niveles de irradiancia uniforme se presentan desde 10 a 4 MW/m^2 . Como se puede apreciar, se presentan diferentes niveles de irradiancia uniforme. Es evidente que, a mayor flux, menor será el volumen efectivo. Para un valor de flux de 10 MW/m^2 , el teórico presenta una longitud en el eje z de ~ 2 cm y ~ 1 cm en los ejes x y y,

mientras que los experimentales presentan una longitud ligeramente menor a 2 cm en el eje z y de 1 cm en los ejes x y y.

Comparando las formas de los volúmenes efectivos teóricos y reales, se aprecian algunas diferencias y tendencias. Con respecto a los teóricos, los niveles de más alta irradiancia presentan formas ovaladas transitando a una forma cilíndrica al disminuir su nivel. Para los experimentales, los niveles de baja irradiancia presentan un giro en los extremos de los volúmenes.

Las isolíneas experimentales y teóricas localizadas en la zona focal en los planos xv, xz y yz se muestran en las Figuras 29 y 30, respectivamente. Ambos planos xy, experimental y teóricos, presentan una distribución circular y muy similar entre ellos debido a que las imágenes fueron capturadas en este plano, mientras que los planos xz y yz difieren uno del otro. Adicionalmente, en las Figuras 29(b) y 29(c), el giro en los volúmenes efectivos experimentales mencionado en el párrafo anterior puede apreciarse para los niveles de irradiancia más bajos, mientras que este fenómeno no se presenta en los planos xz y yz teóricos (Figuras 30(b) y 30 (c), respectivamente).

La Tabla 3 presenta la comparación cualitativa de las isolíneas presentadas en las figuras anteriores. Se compararon las áreas de cada nivel de irradiancia, tomando como referencia el área real para calcular la diferencia entre ellas. Los resultados muestran que las áreas de los niveles de irradiancia teórica están sobreestimadas, presentan la menor diferencia en el plano xy en 10 MW/m² con 7.6%, y el mayor en el plano xz en 4 MW/m² con 174%.

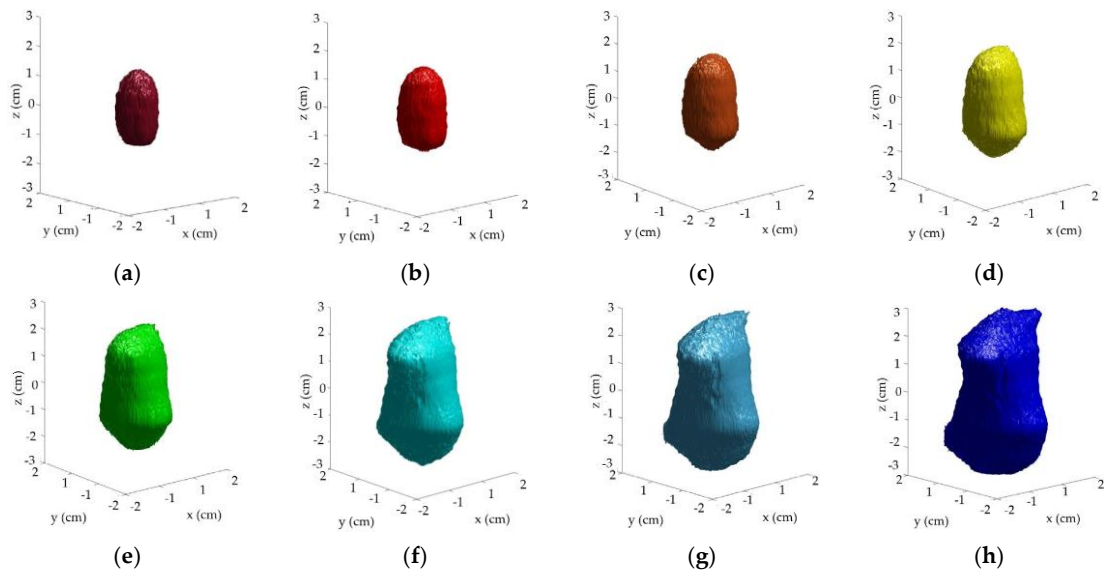


Figura 27. Volúmenes efectivos experimentales de diferentes niveles de flux:

(a) 10, (b) 9, (c) 8, (d) 7, (e) 6, (f) 5, (g) 4.5 y (h) 4 MW/m^2 .

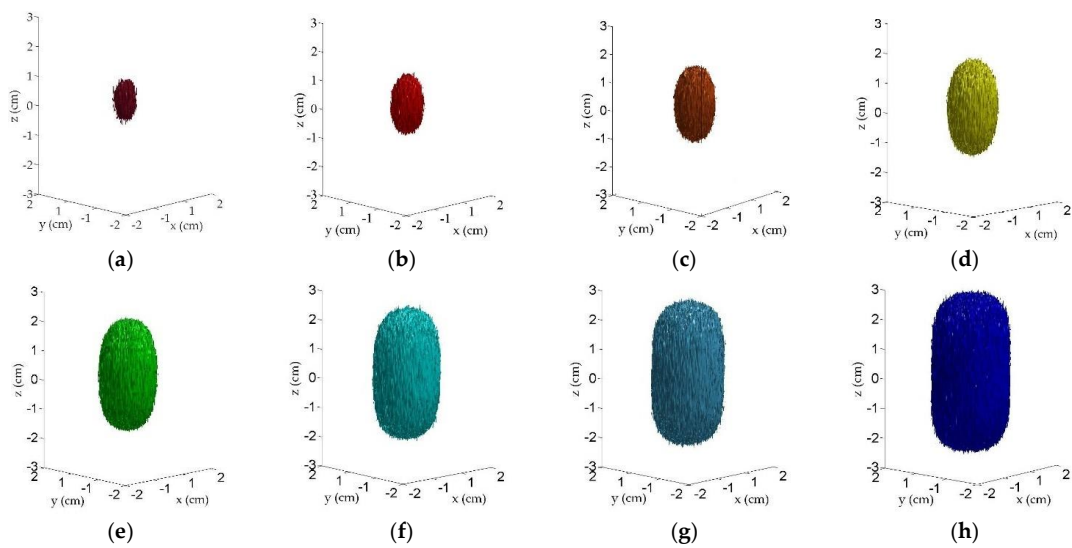


Figura 28. Volúmenes efectivos teóricos de diferentes niveles de flux:

(a) 10, (b) 9, (c) 8, (d) 7, (e) 6, (f) 5, (g) 4.5 y (h) 4 MW/m^2 .

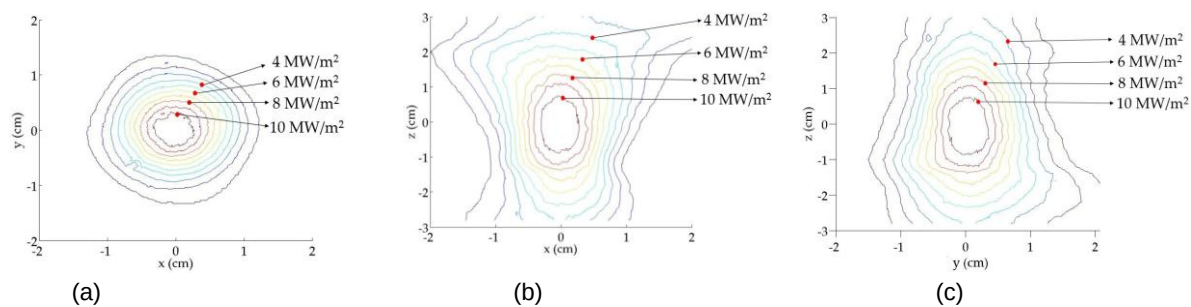


Figura 29. Isolíneas experimentales en los planos (a) xy, (b) xz y (c) yz.

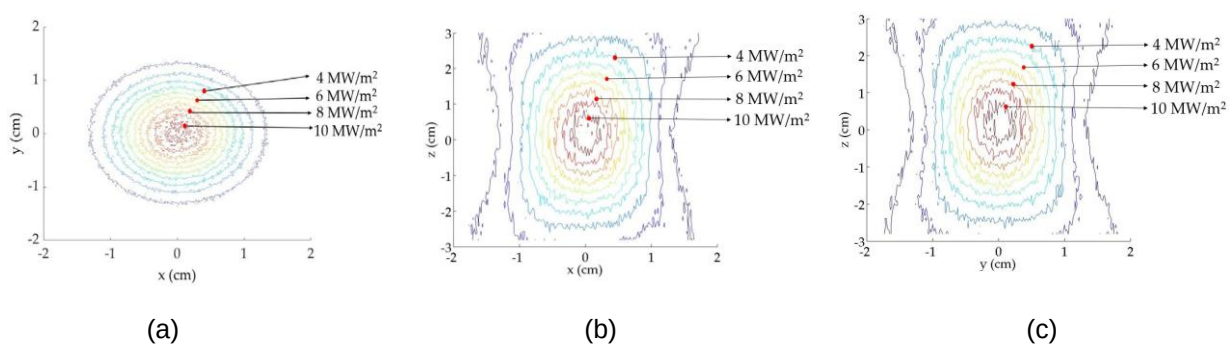


Figura 30. Isolíneas teóricas en los planos (a) xy, (b) xz y (c) yz.

Tabla 3. Comparación cuantitativa de las isolíneas teóricas y reales.

Flux (MW/m ²)	Plano XY			Plano XZ			Plano YZ		
	Real (cm ²)	Teórico (cm ²)	Diferencia (%)	Real (cm ²)	Teórico (cm ²)	Diferencia (%)	Real (cm ²)	Teórico (cm ²)	Diferencia (%)
10	0.21	0.28	7.6	0.31	0.5	18.5	0.32	0.55	22.7
9	0.41	0.53	12.2	0.9	0.28	28.4	0.64	0.94	29.8
8	0.64	0.79	14.3	0.95	1.43	48.6	0.99	1.42	43.5
7	0.89	1.13	24.9	1.3	1.89	58.6	1.33	2.21	88.3
6	1.17	1.44	27	1.8	2.68	88.1	1.9	2.71	80.7
4	1.88	2.4	52.1	3.4	5.07	167	3.37	5.11	174

3.3.3. Discusión

Siguiendo la metodología seguida para revelar el error óptico global del sistema se obtuvieron resultados aceptables. El sistema de óptica de imagen evaluado reproduce la imagen del disco solar incluyendo los errores ópticos que degradan dicha imagen. Este error fue revelado en 2.8 mrad, esto señala la diferencia entre los diámetros entre la imagen del sol real y la imagen de sol degradado reproducido por el sistema.

El error óptico global del sistema se determinó en el plano xy, esto explica que se presente una diferencia pequeña en la comparación de las isolíneas teóricas y reales.

Los volúmenes efectivos teóricos no pueden ser considerados como ideales debido al error óptico global del sistema introducido en las simulaciones. Para generar volúmenes efectivos teóricos que reproduzcan con precisión los experimentales, se considera que algunos parámetros deben ser reajustado en la simulación, por ejemplo, la variación de la longitud del eje óptico (en x y y) podría ayudar a reproducir el giro observado en los extremos de los volúmenes efectivos experimentales. Este giro pudiera deberse a los esfuerzos mecánicos y/o térmicos, o a la velocidad y dirección del viento. Sin embargo, determinar el origen de este descubrimiento va más allá del objetivo de este estudio.

Los volúmenes efectivos de alto flux resultado difíciles de modelar debido a diferentes fuentes de error, dichas fuentes de error son no homogéneas y se alejan de la distribución gaussiana de los errores.

3.4 Conclusiones

Se estableció un método teórico-experimental para revelar el error óptico global del sistema y para generar superficies de diferente nivel de irradiancia producidas por un concentrador solar de disco parabólico en su zona focal. Estas superficies o volúmenes efectivos obtenidos en dirección perpendicular al eje óptico son el primer paso en la construcción de superficies de distribución de irradiancia uniforme. Esto ayuda a reducir los picos de flux en los receptores solar que a su vez mejor el desempeño del sistema en general. Para generar las isosuperficies propias del sistema de concentración

evaluado, se deben recolectar datos experimentales en planos paralelos sucesivos a lo largo de diferentes direcciones, la superposición de los planos creará una isosuperficie.

Por otra parte, se experimentaron diferentes dificultades durante el desarrollo de la metodología experimental causados por el propio sistema de seguimiento del sistema concentrador; debido a que el sistema fue evaluado mientras se encontraba en modo de operación, el sistema de enfriamiento utilizado debía moverse en conjunto.

En contraste con estudio anteriores, los volúmenes efectivos generados consideraron el error óptico global del sistema, que se reveló en 2.8 mrad bajo condiciones reales de operación; esto considerar los errores propios del espejo concentrador, el sistema de seguimiento, el sistema de control, la forma solar, y la razón circunsolar. Adicionalmente, los volúmenes efectivos teóricos fueron generados a partir del error revelado, y se realizaron comparaciones cualitativas y cuantitativas con las isolíneas de los diferentes niveles de irradiancia.

Se encontraron diferencias en los volúmenes efectivos teóricos y reales, ambos en tamaño y forma. El flux más alto revelado fue de 10 MW/m^2 y el más bajo fue de 4 MW/m^2 . Los volúmenes efectivos teóricos de mayor flux presentan una forma ovalada que al disminuir el valor de flux, se transforma en un elipsoide. Los volúmenes efectivos experimentales de mayor flux también presentan una forma ovalada, aunque en este caso, al disminuir el flux se aprecia el giro en los extremos. Esto puede deberse a esfuerzos térmicos o mecánicos o a la dirección y velocidad del viento; sin embargo, determinar el origen de esta aberración óptica sobrepasa los límites de este estudio debido a que la determinación del error óptico global del sistema es realizó en la zona focal – que es una región de alta densidad energética – mientras que el error en regiones de baja densidad no puede ser revelado.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS TÉRMICO Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN REACTOR SOLAR VOLUMÉTRICO

*“La ciencia exige coraje; como mínimo imprescindible
para poner entredicho la sabiduría tradicional”.*

- Carl Sagan. “El cerebro de Broca”.

En este capítulo se presenta la traducción al español, así como información complementaria, del artículo enviado a publicación que a la fecha de la defensa de este trabajo de tesis se encuentra en revisión. En la sección de anexos, se adjunta el artículo que en el momento de la defensa de este trabajo se encuentra en revisión.

4.1 Introducción

La energía solar concentrada puede ser utilizada para producir fluidos de trabajo de alta temperatura o proveer calor para reacción endotérmicas por lo que es una fuente de energía confiable para reemplazar el uso intensivo de fuentes de combustible fósiles. Las tecnologías que producen energía solar concentrada han sido mencionadas en las secciones anteriores de este documento. El elevado flux solar permite una alta temperatura por periodos prolongados que sirven para diferentes reacciones endotérmicas como lo describe Kodama [32] y que son utilizadas para el beneficio del desarrollo humano. Considerando el proceso de transferencia de energía, los receptores son el elemento que convierte la radiación en energía térmica por lo tanto su estudio se considera importante, además que el malfuncionamiento afecta el desempeño del sistema en general [1].

Los receptores están contruidos de diferentes materiales y formas. De acuerdo con Hischier et al. [33] y Roldán et al. [34], las propiedades del material como la conducción,

la absorptividad, la reflectividad y la emisividad de los receptores afectan significativa la temperatura de salida del fluido de trabajo mientras que Pitz-Paal et al., Fend et al. y Chen et al. [10,35,36] están de acuerdo en que las características geométricas de los receptores generan un gran impacto en la penetración de la irradiancia, la distribución de temperaturas y el transporte de energía en la superficie del receptor. Los receptores volumétricos cerámicos presentan una ventaja importante sobre los que están contruidos en otros materiales debido a su límite máximo de temperatura de operación. La base de funcionamiento de estos receptores ha sido descrita en el capítulo 1. Dichos receptores poseen un gran potencial para producir alta temperatura en fluidos de transferencia de calor, energía térmica y son utilizados en una amplia gama de aplicaciones. Por otra parte, Zhu et al. [37] han reportado que la tasa de flujo másico tiene un efecto importante en la eficiencia del receptor además de que incrementar la temperatura de un fluido de trabajo es una tarea retardadora debido a los límites impuestos en la temperatura de operación de los materiales [38].

En la literatura se han reportado varios estudios teóricos y experimentales con resultados aceptables en la evaluación térmica de reactor solares volumétricos abiertos al medio ambiente. Zhu et al. [37] reportaron una temperatura de salida de aire de 430 °C utilizando un receptor volumétrico poroso bajo una irradiancia directa normal de 600 W/m² y una tasa de flujo másico de aire de 0.02 a 0.04 kg/s. Un receptor volumétrico fue térmicamente evaluado por Pritzkow et al. [39] logrando 1050 °C para la temperatura de salida bajo 2 MW/m² de irradiancia solar concentrada. Kami et al. [40] registraron 1300-1400 °C en la temperatura de salida del aire de un receptor volumétrico utilizando el Horno Solar del Instituto Weizmann como fuente de flux solar concentrado. La temperatura de salida del aire de un receptor cerámico volumétrico reportada por Wang et al. [41] fue de 729.8 °C mientras que Pabst et al. [42] reportaron 700-800 °C para la temperatura de salida del aire de un receptor volumétrico metálico. Aichmayer et al. [43] evaluaron experimentalmente un receptor volumétrico utilizando un simulador de flux solar alcanzando 749 °C para la temperatura de salida del aire. Por otra parte, Hoffschmidt et al. [44] evaluación un receptor de SiC usando un simulador solar logrando 700 °C en la temperatura de salida del aire con una tasa de flujo másico de 0.0307-0.0950 kg/s mientras que Tellez et al. [45] reportaron la evaluación térmica del receptor “SolAir” de reSiC/SiSiC usando tecnología de torre central con lo que lograron alcanzar

815 °C. Por otra parte, Ávila-Marín et al. [46] reportaron 640°C en la temperatura de salida del aire de la evaluación térmica de un receptor volumétrico de re-SiC usando un simulador solar como fuente de flux solar concentrado. Roldán et al. [34] publicaron que la temperatura máxima de salida del aire para la evaluación experimental de un receptor de canales cuadrados de SiC fue de 556 °C. Zaversky et al. [47] reportaron la evaluación experimental de varios receptores porosos de SiC bajo condiciones de irradiancia directa normal que variaban entre 900 y 1000 W/m², el receptor de 30 ppi logró 900°C y fue la temperatura más alta registrada durante sus experimentos. Du et al. [48] evaluaron el receptor poroso Iconel 718 usando un simulador de flux solar y una tasa de flujo másico de aire de 21.1 g/s, la temperatura más alta registrada fue de 660°C. Patil et al. [49] evaluaron tres receptores de distinta porosidad construido con SiC y analizaron su respuesta a la variación del flujo másico (2.5 a 10 kg/s) usando un simulador solar y lograron 800 °C para la temperatura más elevada utilizando el receptor de 10 ppi.

En resumen, se encontraron en la literatura varios experimentos usando distintas tecnologías de concentración solar para elevar la temperatura del aire por un tiempo prolongado a través de la aplicación de receptores de diferentes formas y materiales. En este capítulo se presenta la evaluación térmica de un reactor solar volumétrico que puede cumplir dicho objetivo utilizando receptores volumétricos de bajo costo y de fácil acceso usando aire atmosférico como fluido de trabajo y el Mini-Horno de la Plataforma Solar de Hermosillo como fuente de radiación solar concentrada.

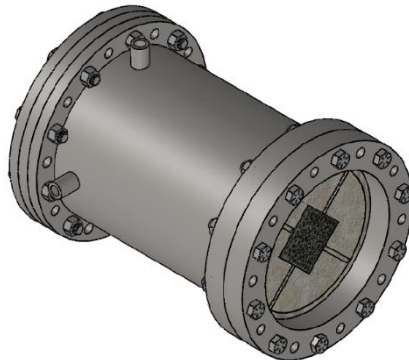
En este documento se presentan los resultados experimentales y el análisis térmico de seis sistemas compuestos por receptores porosos de 10 y 20 ppi de SiC confinados en un reactor abierto, adicionalmente, se varió la concentración de flux solar mientras la tasa de flujo másico se fijó en 0.0033 kg/s.

4.2 Configuración Experimental

4.2.1. Descripción del sistema

El reactor abierto evaluado utiliza aire como fluido encargado de la transferencia de calor, está construido en acero al carbón e instrumentado con sensores de flujo volumétrico y de temperatura para monitorear el experimento. Se utilizó fibra de alumina como un revestimiento interior aislante, después de eso, se encuentra una pieza de alumina que funciona como aislante y soporte para los receptores; 3 mm después del receptor, se encuentran tres sensores de temperatura en diferentes puntos como se muestra en la Figura 31. La parte posterior del reactor posee cuatro salidas, tres de ellas son utilizadas para la salida del flujo másico de aire y la cuarta salida es utilizada para colocar un sensor de temperatura.

Los receptores volumétricos de SiC son esponjas de 10 y 20 ppi, (cuyas dimensiones son $0.05 \times 0.05 \times 0.25 \text{ m}^3$) (Figura 32). Estos receptores tienen un precio de 2.96 dólares americanos cada uno (referencia del año 2021) lo que facilita el proceso de investigación por su bajo costo y fácil acceso. Para determinar cual de las configuraciones logra una mayor temperatura en la salida del receptor, se probaron seis sistemas: 10, 20, 1020, 2010, 1010 y 2020. Estas configuraciones han sido seleccionadas considerando las referencias en la literatura y analizando su respuesta cuando se extiende la superficie de contacto para la transferencia de calor (sistemas 1010 y 2020) y detectando si existen alguno otro tipo de comportamiento cuando se combinan (1020 y 2010). De igual manera, se evaluó su respuesta a la variación de flux solar concentrado.



(a)

(b)

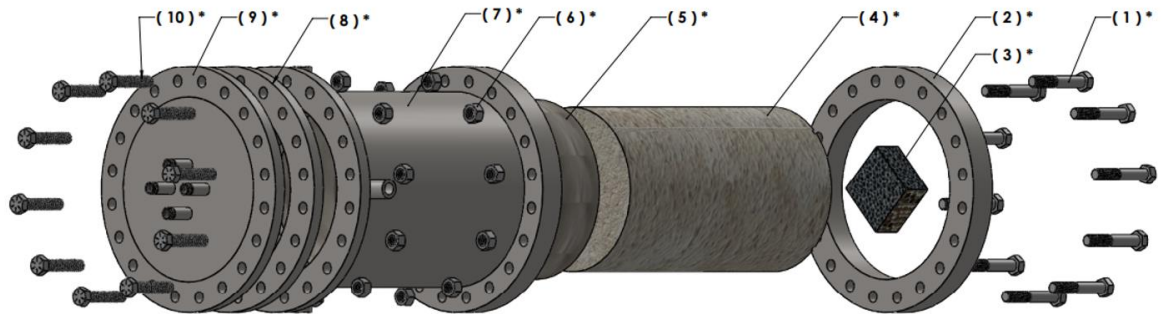


Figura 31. Reactor-receptor volumétrico: (a) vista isométrica; (b) vista explotada: (1) and (10) tornillos, (2) anillo de soporte frontal, (3) receptor, (4) ladrillo de alúmina, (5) fibra de alúmina, (6) tuercas, (7) cuerpo de acero al carbón, (8) anillo de soporte posterior y (9) tapa posterior.

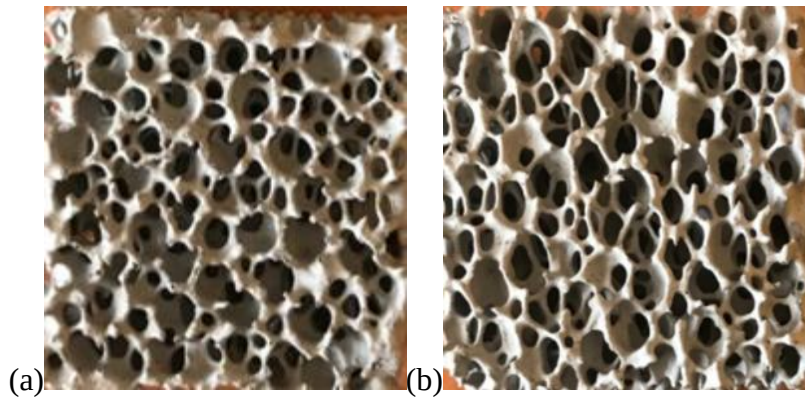


Figura 32. Receptores volumétricos de SiC: (a) 10 ppi y (b) 20 ppi.

Tabla 4. Descripción de los experimentos.

Sistemas	(1-S) ⁱⁱ	Tasa promedio de flujo másico ^{iii,iv} (kg/s)
10	0.00	0.0019
	0.65	0.0021
	0.35	0.0025
20	0.00	0.0012
	0.65	0.0016
	0.35	0.0023
1010	0.00	0.0013
	0.65	0.0015
	0.35	0.0018
2020	0.00	0.0013
	0.65	0.0015
	0.35	0.0019
1020	0.00	0.0014
	0.65	0.0016
	0.35	0.0020
2010	0.00	0.0020
	0.65	0.0023
	0.35	0.0027

4.2.2. Mini Horno Solar

El flux solar concentrado fue generado por el Mini Horno de la Plataforma Solar de Hermosillo en Hermosillo, Sonora, México. Esta tecnología de concentración solar está compuesta por un heliostato de 5.93 m² ubicado a 7 metros del espejo concentrador de disco parabólico cuya área es de 2.722 m² y su zona focal se encuentra a 1.5 del vértice de la parábola, donde se encuentran la mesa de trabajo y el reactor-receptor.

ⁱⁱ (1-S) se refiere al complemento del factor de sombra descritos en las siguientes secciones.

ⁱⁱⁱ La tasa de flujo volumétrico se mantuvo constante durante los experimentos.

^{iv} La desviación máxima de la tasa de flujo másico fue de 0.0001 para el experimento 1010, (1-S)=0

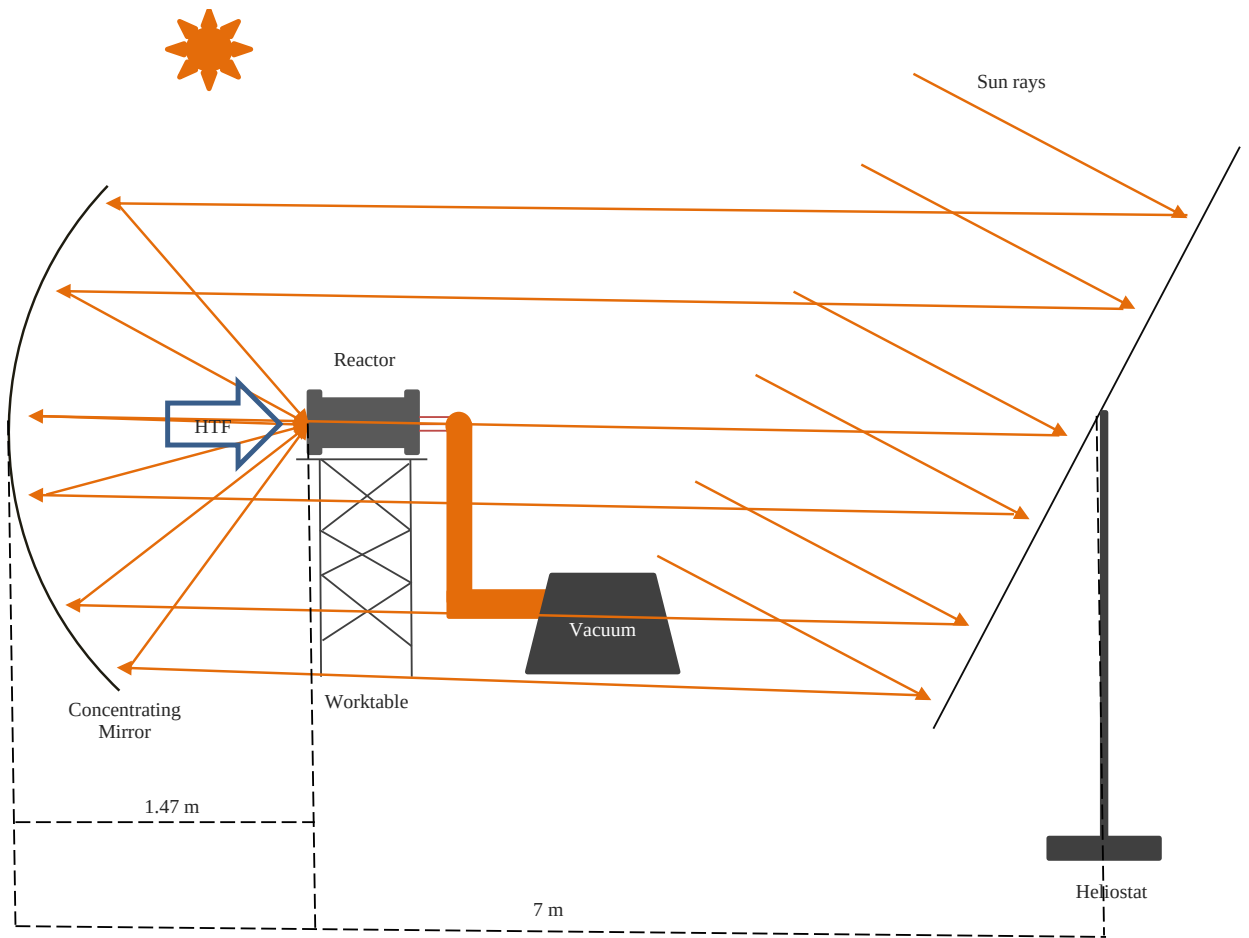


Figura 32. Esquema del proceso de concentración de flux solar en el Mini Horno.

El proceso de transferencia de energía comienza con el proceso de concentración de flux solar y continúa con la convección. El proceso de concentración se ilustra esquemáticamente en la Figura 32 y se describe a continuación. La irradiancia directa normal es recibida en la superficie del heliostato siendo redireccionada como un plano paralelo al espejo concentrador incrementando su densidad energética en su zona focal donde se encuentra el receptor volumétrico localizado en el interior del reactor; el receptor volumétrico se encuentra a 1.47 m del vértice, es decir que está fuera de foco. El proceso de convección se muestra en la Figura 33(a). El flux solar concentrado penetra el volumen del receptor y es absorbido en su interior. El fluido de trabajo (aire atmosférico) pasa a través del volumen removiendo la energía absorbida mediante convección e incrementando así la temperatura del aire. El fluido deja el reactor por la parte posterior del reactor debido a la bomba de succión conectada. La temperatura del monitoreada justo después de que sale del receptor en los puntos señalados en la Figura 33(b).

El factor de horno, F , describe la diferencia entre la razón de concentración de un horno real paraboloide y uno ideal. Es evidente que el real presentará una razón más baja que el ideal. El factor de horno es un producto de una serie de factores de transmisividad que generan pérdidas en el sistema, dichos factores se muestran en la Tabla 5 [50]. El factor de horno puede calcularse a partir de la Ecuación 3.

$$F = 0.76 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde la razón de concentración teórica ($C_{theoretical}$) es una cantidad geométrica fundamental relacionada con el área de entrada (A) (área del concentrador) y el área de salida (área del spot concentrado, 0.0009 m^2) del sistema como se muestra en la ecuación 4 [18]. Por lo anterior, la razón de concentración teórica es de 3025x. C se determinó de forma experimental siguiendo la metodología descrita por Pérez-Enciso [51] cuyo valor es 2284x.

$$C_{theoretical} = \frac{A}{A'} \quad \text{Ec. (4)}$$

Por lo tanto, el factor de horno de la tecnología descrita es de 0.76.

El factor de horno permite considerar una nueva base de cálculo al sancionar las pérdidas generadas por el propio concentrador (errores ópticos, errores de seguimiento, errores de medición, etc). En este trabajo, se calcularon dos eficiencias para el sistema: una que considera el factor de horno por lo que se considera la eficiencia térmica, y otra que no, que se considera como la eficiencia global del sistema y es útil para compararla con otro tipo de tecnologías utilizadas para el mismo fin.

Tabla 5. Descripción del factor de horno.

Símbolo	Descripción
$\eta_{t,H}$	Transmisividad del helióstato
$\eta_{r,H}$	Reflectividad del helióstato
$\eta_{r,C}$	Reflectividad del Espejo concentrador
$\eta_{s,F}$	Sombra estructural del horno
$\eta_{s,ET}$	Sombra de la mesa de trabajo
$\eta_{s,A}$	Sombra del atenuador
$\eta_{s,CD}$	Factor de suciedad del concentrador
$\eta_{s,HD}$	Factor de suciedad del helióstato

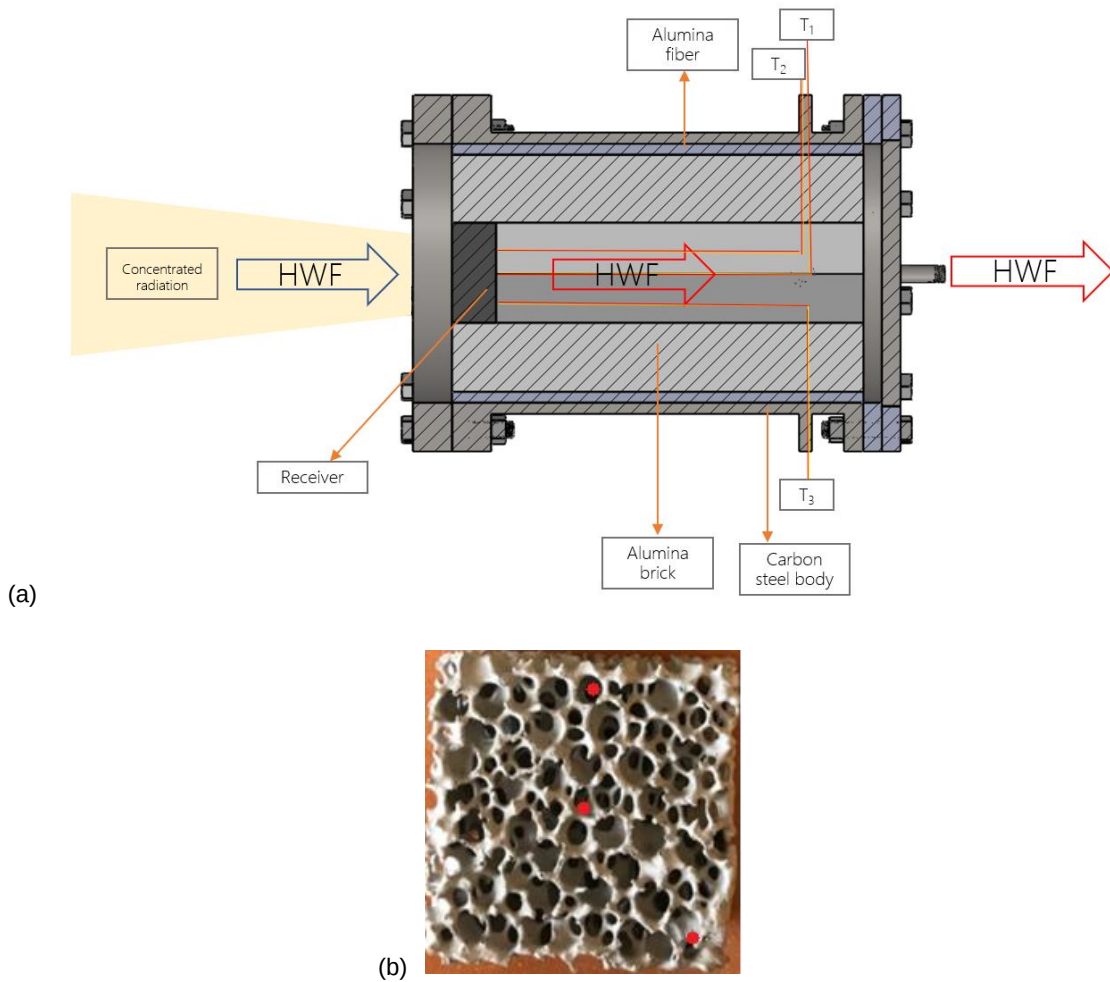


Figura 33. (a) Esquema del proceso de transferencia de calor; (b) Puntos de monitoreo de temperatura, coordenadas: $T_1=(0.025,0.025)$, $T_2=(0.025,0.044)$ and $T_3=(0.044,0.005)$.

4.2.3. Descripción de los experimentos

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo alrededor del mediodía solar en días consecutivos (del 8 al 17 de marzo del año 2022) en la Plataforma Solar de Hermosillo, con expectativas de que sucedieran bajo condiciones meteorológicas similares para asumir condiciones similares de operación del sistema. El Mini Horno Solar trabaja con irradiancia directa normal, el valor promedio durante las pruebas fue de 1000 W/m^2 [52], y la temperatura de entrada del aire fue de 25°C en promedio. De acuerdo con el análisis de los datos meteorológicos, las condiciones atmosféricas no presentaron una variación significativa durante la evaluación experimental por esto el análisis termodinámico

consideró que los experimentos se llevaron a cabo bajo condiciones iguales de operación.

El flujometro de aire (Omega Digital AirFlow Meter HHF11A) se utilizó para medir la tasa de flujo volumétrico de aire cuando el Mini Horno Solar se encontraba fuera de operación debido a la temperatura del límite superior de operación del dispositivo (60°C, precisión $\pm 5\%$). Se realizaron ajustes en los cálculos mediante la evaluación de la densidad del aire y el calor específico a presión constante a la temperatura promedio (temperatura del aire atmosférico y la temperatura de salida del receptor) para cada configuración. El aire se consideró como un gas ideal como resultado de la comparación de los valores de densidad calculados a partir de la ley de los gases ideales y del factor de compresibilidad z (Ecuación 5) [53] considerando 39% para la humedad relativa de acuerdo a los datos del Año Típico Meteorológico para la ciudad de Hermosillo, Sonora [54]. La diferencia máxima fue de $\pm 3.6\%$. Por lo anterior, el aire además de consideró como aire seco y no como una mezcla de aire y vapor de agua.

$$\rho_a = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde ρ_a es la densidad del aire [kg/m^3], p es la presión atmosférica [Pa], T es la temperatura del aire [K], M_a es la masa molar de aire seco [kg/mol], M_v es la masa molar de agua [kg/mol], R es la constante molar de los gases [J/mol-K], Z es el factor de compresibilidad y x_v es la fracción mol de vapor de agua.

Los sensores utilizados para medir la temperatura fueron termopares recubiertos tipo K (precisión $\pm 2.2^\circ\text{C}$). Para verificar la existencia de una variación en la temperatura de salida del aire durante los experimentos, se instalaron tres termopares en diferentes puntos a la salida del receptor – como se menciona anteriormente-. Esto ayudará a deducir la existencia de un gradiente de temperatura importante que pudiera afectar el desempeño del sistema.

La entrada de flux solar concentrado se varió durante los experimentos para analizar su efecto sobre la temperatura de salida. Se probaron los siguientes porcentajes de sombra: 0%, 35% y 65%.

4.3 Balance Termodinámico

El estado cuasi-estable para el análisis termodinámico se refiere a que la irradiancia directa normal, la tasa de flujo de aire, y las temperaturas permanece sin variaciones significativas en el periodo evaluado.

El balance de energía global del sistema se hizo considerando la primera ley de la termodinámica, eliminando los términos de acumulación y considerando que no hay cambios en la energía cinética y la energía potencial del sistema (Ecuación 6).

$$\dot{P}_{in} - \dot{P}_{out} = 0 \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde $\dot{P}_{in}$ es la potencia solar concentrada considerando la irradiancia directa normal (I_b), el área del espejo concentrador (A_c) y el complemento del factor de sombra ($1 - S$) (Ecuación 7). Dicha ecuación fue utilizada como parte del cálculo de la eficiencia global del Sistema mientras que la ecuación 8 fue considerada para el cálculo de la eficiencia térmica, que incluye el factor de horno (F).

$$\dot{P}_{in} = I_b \cdot A_c \cdot (1 - S) \quad \text{Ec. (7)}$$

$$\dot{P}_{in} = F \cdot I_b \cdot A_c \cdot (1 - S) \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde $\dot{P}_{out}$ es la potencia térmica de salida y se calcula a partir de la ecuación 9. Para fines prácticos, se establece que $G = I_b \cdot (1 - S)$.

$$\dot{P}_{out} = \dot{m}C_p\Delta T \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde $\dot{m}$ es la tasa de flujo másico de aire y C_p se refiere al calor específico y ΔT a la diferencia de temperaturas entre T_∞ (temperatura ambiente) y la temperatura del termopar central. El flujo másico de aire fue calculado considerando la velocidad del aire ($\vec{v}$) en la entrada del receptor y el área transversal (A_t), así como la densidad del aire en función de la temperatura de salida del receptor (ρ) (Ecuación 10).

$$\dot{m} = \vec{v} \cdot \rho \quad \text{Ec. (10)}$$

La eficiencia térmica es calculada como la relación entre la potencia de salida y la de entrada, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\eta_{térmica} = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{F \cdot G \cdot A_c} \quad \text{Ec. (11)}$$

Por otra parte, la eficiencia total del sistema se calculó como se muestra en la ecuación 12. Evidentemente, la eficiencia del receptor será mayor que la eficiencia total del sistema debido a que las pérdidas son sancionadas en el cálculo de la primera. La eficiencia total del sistema fue utilizada para la comparación con otras tecnologías de concentración solar.

$$\eta_{sistema} = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{G \cdot A_c} \quad \text{Ec. (12)}$$

4.4 Resultados y Discusión

4.4.1. Temperaturas de salida del aire máxima y promedio

La temperatura de salida promedio (promediada en el tiempo del experimento, $t = 11$ minutos por sistema) para los sistemas estudiados con respecto a los factores de sombra se presentan en la Figura 34. La temperatura considerada corresponde a la temperatura censada por el termopar central. En términos generales, las temperaturas más altas se registraron bajo 0% de factor de sombra y las más bajas bajo 65% de factor de sombra. Particularmente, la temperatura promedio más elevada es de 647 °C para el sistema 20 bajo 0% de factor de sombra seguidos por los sistemas 1010, 2020, 1020, 10 y 2010. Por otra parte, la temperatura promedio más baja es 151 °C para el sistema 2010 bajo 65% de factor de sombra.

La Figura 35 muestra las temperaturas de salida máximas cuyo comportamiento es similar al descrito para la figura anterior: cuanto más bajo sea el factor de sombra, mayor es la temperatura de salida. La temperatura máxima registrada es 660°C para el Sistema 20 bajo 0% de factor de sombra y la temperatura más baja es de 162 °C para el sistema 2010 bajo 65% de factor de sombra.

De las Figuras 36 y 37, se presenta el siguiente análisis. El sistema 20 parece presentar una transferencia de energía más efectiva comparado con el sistema 10, esto puede deberse a que el sistema 20 tiene una mayor superficie de contacto – lo que favorece la transferencia de calor- en comparación con el sistema 10. Adicionalmente, extender al doble la superficie de contacto no tiene un efecto significativo de acuerdo con los resultados presentados por el sistema 2020. Sin embargo, el sistema 1010 presenta una mejora considerable. Los sistemas 1020 y 2010 presentan una diferencia de temperaturas de $\sim 280^{\circ}\text{C}$, que pudiera deberse a que el sistema 2010 causa una estrangulación del flujo de aire produciendo un bloqueo por el tamaño reducido de poro en el inicio del recorrido y poros más grandes después mientras que en el sistema 1020 sucede lo contrario, incrementando la transferencia de energía.

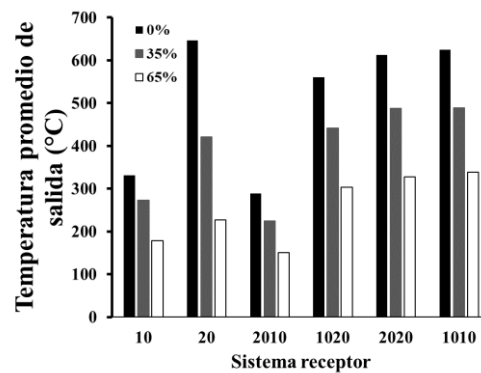


Figura 34. Temperatura de salida promedio para los sistemas de receptores.

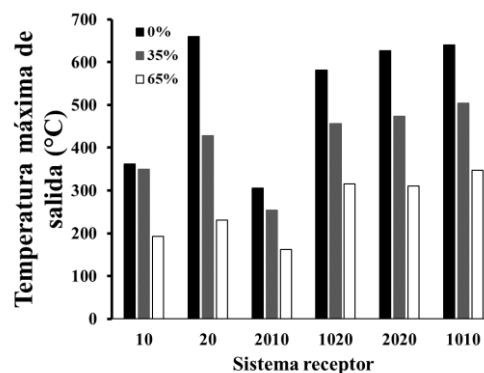


Figura 35. Temperatura de salida máxima para los sistemas de receptores.

4.4.2. Análisis de las eficiencias del sistema considerando el factor de sombra

Efecto en la eficiencia del sistema con $S = 0\%$

En la Figura 36 se compara la eficiencia del sistema (η_T) con respecto a la ganancia de temperatura concerniente al flux solar concentrado suministrado ($\frac{\Delta T}{G}$) para los seis sistemas estudiados. Estos sistemas fueron evaluados con el total de flux solar concentrado disponible, es decir $S=0\%$, ($\bar{I}_b = G = 1000 \text{ W/m}^2$). En términos generales, se observa un comportamiento lineal en las variables de estudio, resaltando que mientras mayor sea la eficiencia del sistema, mayor será el incremento de temperatura por unidad de flux suministrado. Por otra parte, los sistemas 20, 1010 y 2020 presentan las eficiencias más elevadas $\eta_{s,max} = 0.34$, seguido de los sistemas 1020, 10 y 2010 con $\eta_{s,max}$ equivalente a 0.32, 0.25 y 0.22, respectivamente.

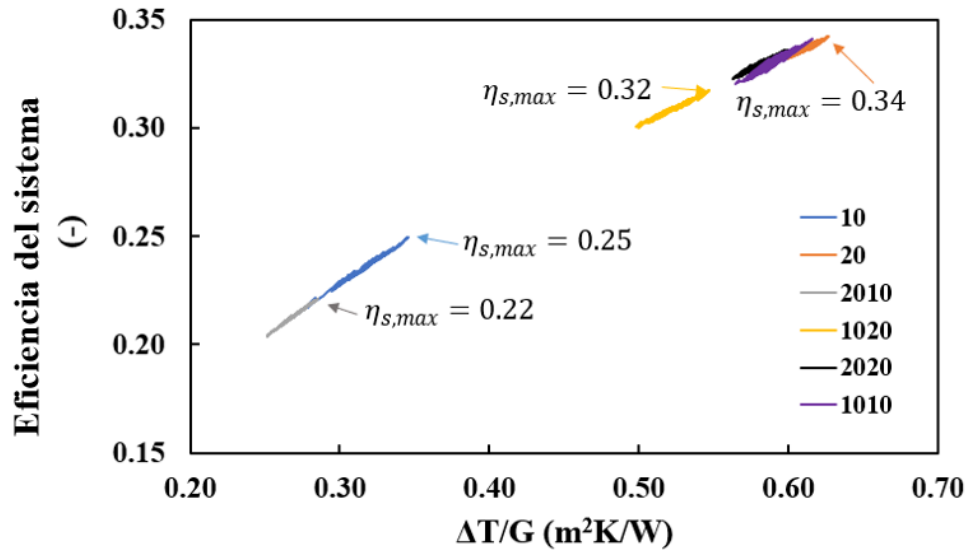


Figura 36. Eficiencia del sistema en función de $\Delta T/G$, para todos los sistemas bajo $S=0\%$.

Los sistemas evaluados como función de la eficiencia promedio de los sistemas (promediadas en el tiempo y en estado cuasi-estable) se presentan en la Figura 37. Estos resultados presentan un comportamiento similar al descrito en las eficiencias máximas del sistema.

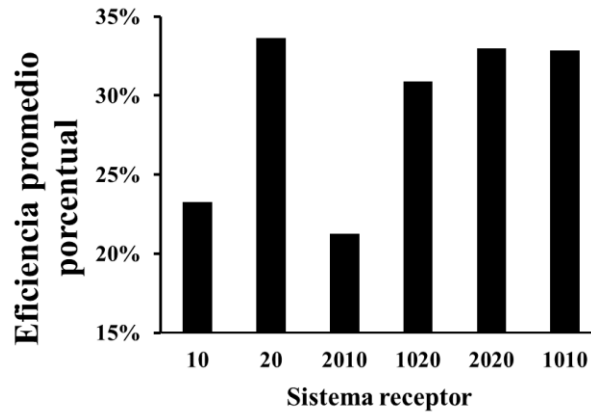


Figura 37. Eficiencia promedio del sistema para todos los sistemas bajo $S = 0\%$.

Efecto en la eficiencia del sistema con $S = 35\%$

El desempeño de la eficiencia del sistema bajo flux solar concentrado de $G \sim 715 \text{ W/m}^2$ se muestra en la Figura 38. Para estas condiciones experimentales, es evidente que la relación entre las variables estudiadas presenta un comportamiento lineal (η_s vs $\Delta T/G$). Cuanto mayor sea la eficiencia del sistema, mayores serán las ganancias en la temperatura por unidad de flux suministrado. Por otra parte, los sistemas 1010 y 2020 presentan las eficiencias más elevadas desempeñando $\eta_{s,max}$ de 0.46 y 0.45, respectivamente, seguidos de los sistemas 1020 y 20 con 0.42 y 0.41, en el orden dado. Adicionalmente, la Figura 39 presenta los sistemas evaluados como una función de las eficiencias promedio destacando que el sistema 2020 presenta la eficiencia promedio más elevada ($\bar{\eta}_s = 45\%$) y el sistema 2010 la promedio más baja ($\bar{\eta}_T = 27\%$).

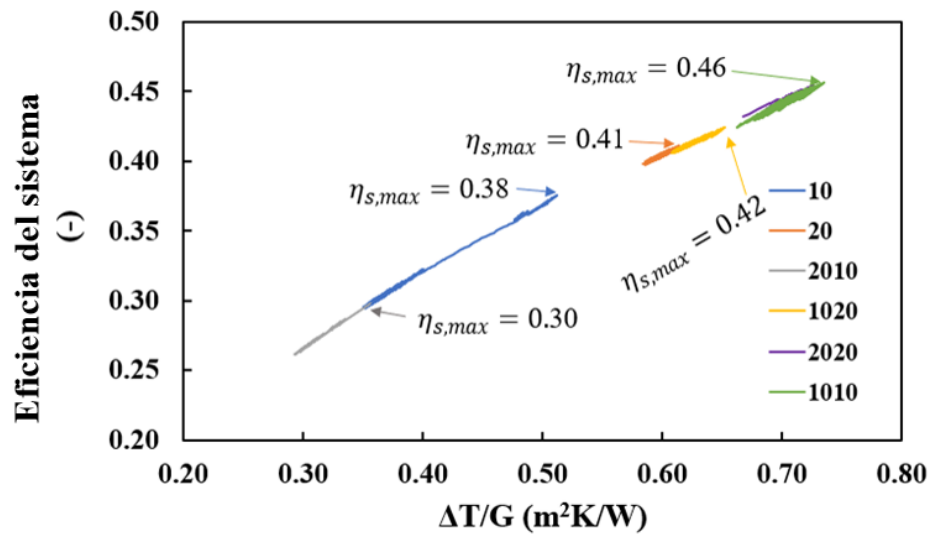


Figura 38. Eficiencia del sistema como función de $\Delta T/G$, para todos los sistemas bajo $S = 35\%$.

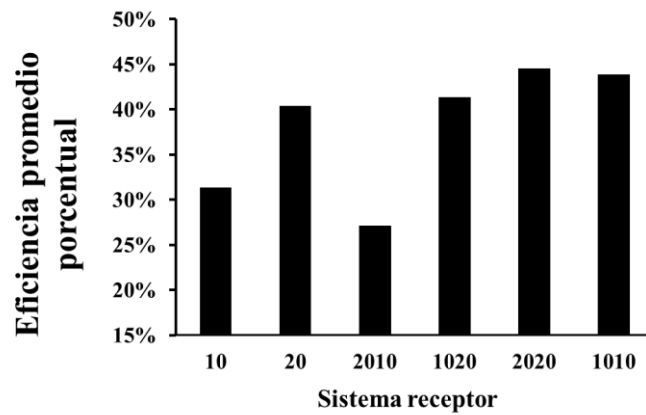


Figura 39. Eficiencia promedio del sistema para todos los sistemas bajo $S = 35\%$.

Efecto en la eficiencia del sistema con $S=65\%$

La Figura 40 muestra los desempeños de los seis sistemas evaluados bajo el menor flux solar concentrado ($G \sim 383 \text{ W/m}^2$), para estas evaluaciones el factor de sombra se fijó

en 65%. La relación entre η_s and $\Delta T/G$ muestra un comportamiento lineal. El sistema 1010 se desempeñó mejor que el resto con una eficiencia máxima de 0.68, seguido del sistema 2020 con 0.66. Para este valor de flux solar concentrado, la eficiencia del sistema 1020 fue $\eta_{s,max} = 0.61$ y $\eta_{s,max} = 0.50$ para el sistema 20. Por otra parte, los sistemas que presentaron menores eficiencias máximas fueron el 2010 y el 10, con 0.39 y 0.45, respectivamente.

Las eficiencias promedio del sistema para todos los sistemas analizados se muestra en la Figura 41 destacando que los sistemas 2020 y 1010 muestran eficiencias de 0.65 mientras que los sistemas 1020 y 20 desempeñaron 0.60 y 0.49, en el orden dado. Por último, el sistema que presentó la menor eficiencia promedio fue el 2010 con 0.36.

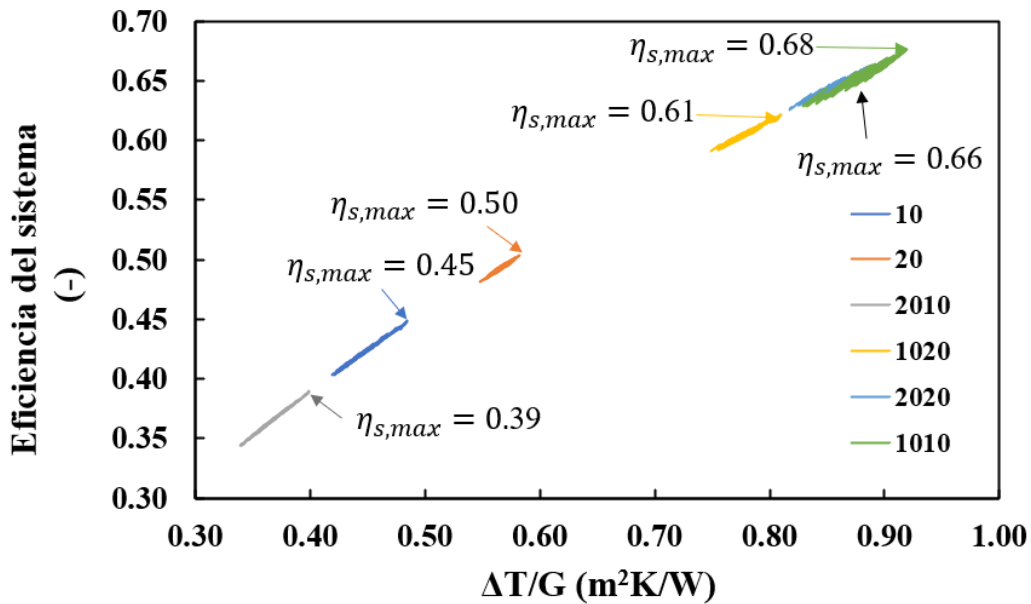


Figura 40. Eficiencia del sistema como función de $\Delta T/G$, para todos los sistemas bajo $S = 65\%$.

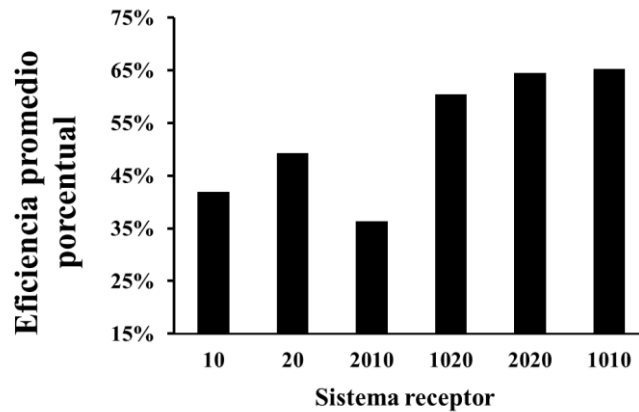


Figura 41. Eficiencia promedio del sistema para todos los sistemas bajo $S = 65\%$.

Finalmente, la Figura 42 presenta la eficiencia del sistema para todos los sistemas comparado con $\overline{\Delta T}/\overline{G}$, para los tres factores de sombra estudiados (0, 35 y 65%). Se observa un comportamiento lineal entre las variables estudiadas donde R^2 tienda a 1, además que el sistema incrementa su linealidad cuando G incrementa. Los seis sistemas estudiados presentan un valor de R^2 de 0.9985, 0.9973 y 0.9972 bajo $S = 0\%$, 35% y 65%, respectivamente. Adicionalmente, el sistema 1010 bajo 65% de factor de sombra presenta la eficiencia promedio más elevada ($\bar{\eta}_T = 65.3\%$) mientras que para el resto de los factores de sombra (0% y 35%) el sistema 2020 presenta una ligera mejora en su desempeño que el sistema 1010.

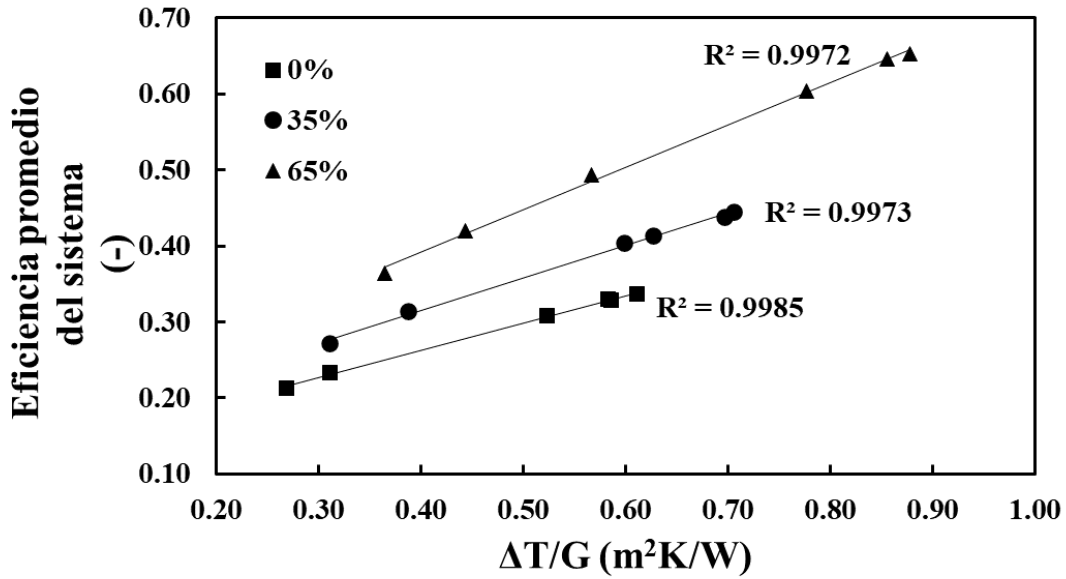


Figura 42. Eficiencia promedio del sistema como una función de $\Delta T/G$ promedio para todos los sistemas con respecto al factor de sombra (S).

4.4.3. Comparación de las eficiencias del sistema

Considerando los resultados previos, algunos sistemas han sido seleccionados para generar un modelo lineal basado en los datos promedios de cada experimento (η_s y ΔT). Los sistemas seleccionados son 10 y 20, el de peor desempeño (2010), el que mostró un desempeño promedio (1020) y el de mejor desempeño (2020). Los modelos se presentan en las ecuaciones siguientes (13-17) para los sistemas 10, 20, 2010, 1020 y 2020, respectivamente.

$$\bar{\eta}_{s,10} = 0.61 - 0.00121 \cdot (\Delta T) \quad \text{Ec. (13)}$$

$$\bar{\eta}_{s,20} = 0.56 - 0.000371 \cdot (\Delta T) \quad \text{Ec. (14)}$$

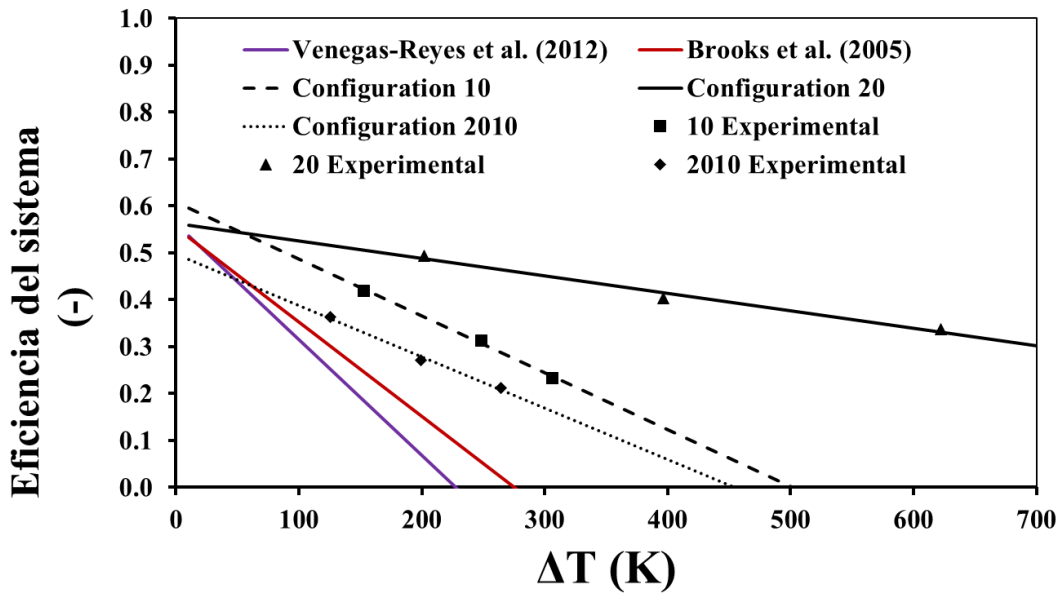
$$\bar{\eta}_{s,2010} = 0.50 - 0.001095 \cdot (\Delta T) \quad \text{Ec. (15)}$$

$$\bar{\eta}_{s,1020} = 0.92 - 0.001156 \cdot (\Delta T) \quad \text{Ec. (16)}$$

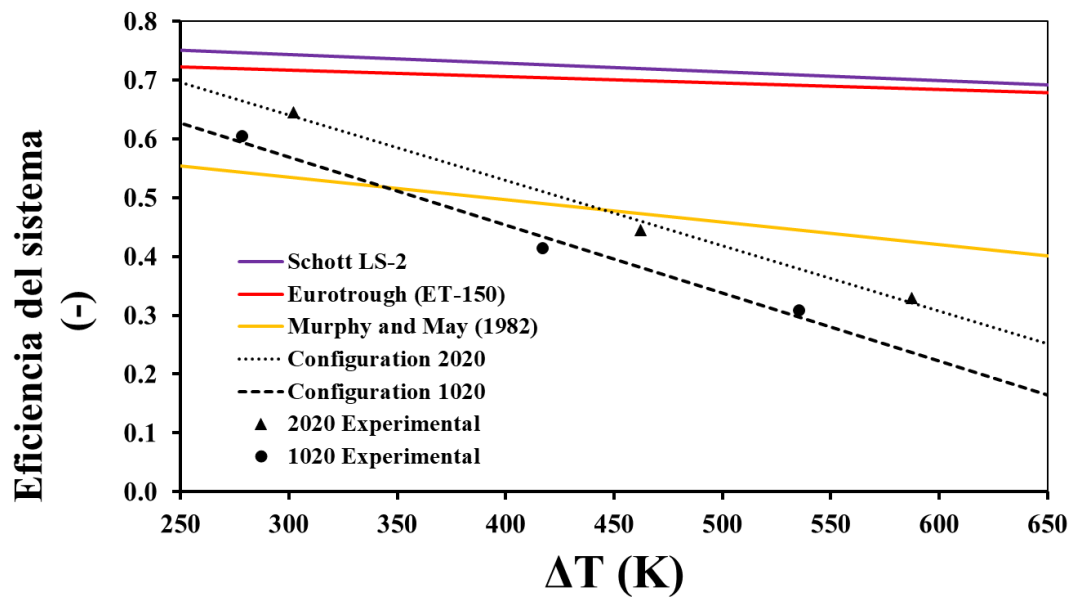
$$\bar{\eta}_{s,2020} = 0.97 - 0.001112 \cdot (\Delta T) \quad \text{Ec. (17)}$$

En la Figura 43(a) se presenta la comparación de las eficiencias más bajas del sistema. Se comparan $\bar{\eta}_{s,10}$, $\bar{\eta}_{s,20}$ y $\bar{\eta}_{s,2010}$ con respecto a ΔT , y con otras eficiencias bajas de otras tecnologías solares reportadas en la literatura. De estos resultados, el sistema 2010 (el de peor desempeño) muestra una eficiencia mayor que los sistemas desarrollados por Venegas-Reyes et al. [55] y Brooks et al. [56]. Además, los sistemas 10 y 20 se desempeñaron mejor con respecto al sistema 2010 y es evidente que el sistema 20 supera sustancialmente al sistema 10 para $\Delta T > 200^\circ\text{C}$, permitiendo un intervalo superior para las temperaturas de operación (ΔT).

Por otra parte, la Figura 43(b) muestra la comparación de las eficiencias más altas del sistema ($\bar{\eta}_s \geq 65\%$), considerando los sistemas 1020 y 2020 y sus datos experimentales con respecto a los sistemas ET-150 [57], Schot LS-2 [58], and PTC [59]. De este estudio, los sistemas 1020 y 2020 no superar las eficiencias desempeñadas por los sistemas ET-150 y Schot LS-2 para $\Delta T > 250^\circ\text{C}$. Aunque para $\Delta T < 450^\circ\text{C}$ and $\Delta T < 350^\circ\text{C}$, los sistemas 2020 y 1020 superar al PTC, respectivamente. Finalmente, de los sistemas evaluados en este trabajo, se establece que el sistema 20 es la mejor configuración para generar aire a alta temperatura ($\Delta T > 550^\circ\text{C}$).



(a)



(b)

Figura 43. Comparación de las eficiencias de este estudio con los modelos reportados en la literatura:

(a) sistemas de baja eficiencia y (b) sistemas de alta eficiencia.

4.4.4. Comparación de las eficiencias térmica y total del sistema

En esta sección, se presenta la comparación de las diferentes eficiencias calculadas – térmica y del sistema- para los tres factores de sombra utilizados y para cada sistema evaluado. La eficiencia térmica considera el factor de horno, por lo que su base de cálculo es distinta que la de la eficiencia del sistema.

La comparación de ambas eficiencias para los sistemas evaluados bajo 0% de factor de sombra se muestra en la Figura 44. En términos generales, se observa que la eficiencia térmica es mayor que la eficiencia del sistema. Adicionalmente, es notable que la mayor eficiencia térmica la presenta el sistema 20 ($\eta_T=0.61$), seguida de los sistemas 1010, 2020 y 1020 desempeñando 0.59, 0.58 y 0.52, respectivamente. Las eficiencias térmicas más bajas fueron las de los sistemas 10 y 2010 con 0.31 y 0.27, en el orden dado.

La comparación de ambas eficiencias para todos los sistemas evaluados bajo 35% de factor de sombra se presenta en la Figura 45. El panorama general corresponde al descrito para la figura anterior. Por otra parte, se resalta que las eficiencias térmicas más elevadas fueron la de los sistemas 2020 ($\eta_T=0.71$) y 1010 ($\eta_T=0.70$) mientras que las peores eficiencias calculadas fueron para los sistemas 10 ($\eta_T=0.39$) y 2010 ($\eta_T=0.31$).

Por último, en la Figura 46 se presenta la comparación de ambas eficiencias bajo 65% de factor de sombra. Las mejores eficiencias térmicas fueron las de los sistemas 1010 (0.88) y 2020 (0.86) mientras que la eficiencia intermedia corresponde al sistema 20 (0.57) y las más bajas a los sistemas 10 (0.44) y 2010 (0.36).

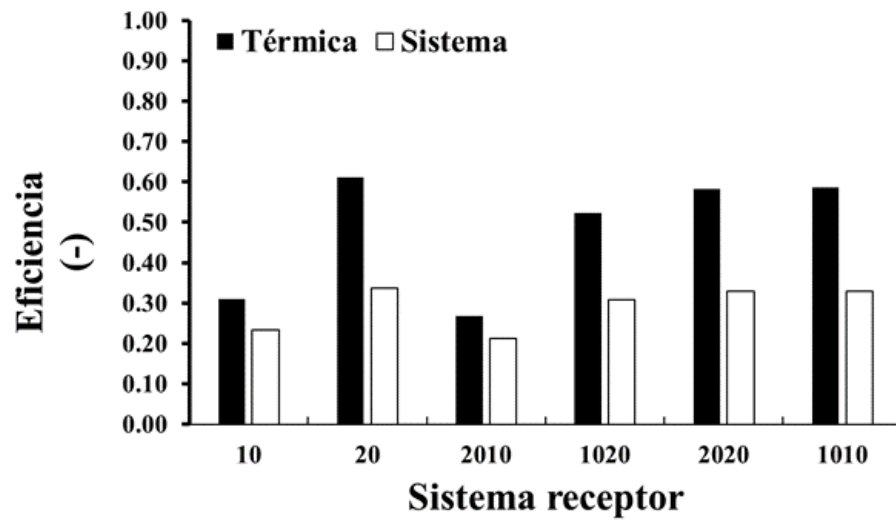


Figura 44. Comparación de las eficiencias térmica y del sistema con $S=0\%$ para todos los sistemas evaluados.

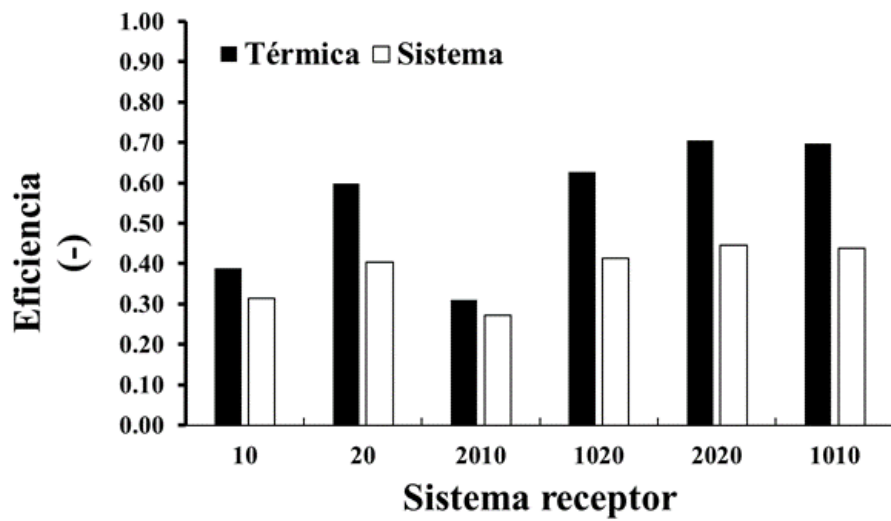


Figura 45. Comparación de las eficiencias térmica y del sistema con $S=35\%$ para todos los sistemas evaluados.

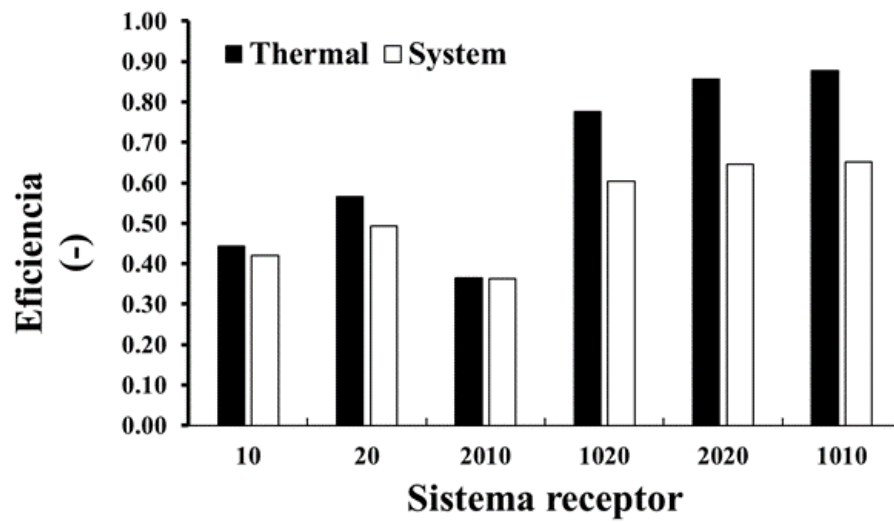


Figura 46. Comparación de las eficiencias térmica y del sistema con $S=65\%$ para todos los sistemas evaluados.

4.5 Conclusiones

Se realizó la evaluación experimental de un reactor-receptor volumétrico solar usando el Mini Horno de la Plataforma Solar de Hermosillo como fuente de flux solar concentrado para producir aire de alta temperatura.

Se probaron seis configuraciones de sistemas. Se utilizaron receptores porosos de SiC de 10 y 20 ppi para los experimentos. Las configuraciones fueron las siguientes: 10, 20, 1010, 2020, 1020 y 2010. Todas las configuraciones fueron consideradas como sistemas con sus propias características. Los sistemas fueron evaluados experimentalmente bajo tres factores de sombra: 0%, 35% y 65% para analizar su efecto en la temperatura de salida del aire. La tasa de flujo volumétrico se mantuvo constante durante las pruebas experimentales y se fijó en 0.0033 m³/s.

De acuerdo con los resultados de la temperatura del aire, se resume lo siguiente. La temperatura promedio más elevada registrada fue 647 °C para el sistema 20 bajo 0% de factor de sombra mientras que la temperatura promedio más baja fue de 151 °C para el sistema 2010 bajo 65% de sombra. Por otra parte, la temperatura máxima fue de 660 °C para el sistema 20 con 0% de sombra. De aquí, se concluye que la temperatura de salida del aire (máxima y promedio) depende del factor de sombra: cuanto menor sea el factor de sombra, mayor será la temperatura de salida del aire.

Con respecto a los resultados de eficiencia, las siguientes conclusiones son presentadas. Independientemente del sistema evaluado, el elevado flux solar concentrado suministrado y alta temperatura de operación causan bajas eficiencias térmica y general del sistema, por lo que una baja eficiencia producirá un incremento en la temperatura de salida del aire. Este comportamiento corresponde a lo reportado en la literatura sobre sistemas solares térmicos. De ahí que trabajar con bajo flux solar concentrado es benéfico para estos sistemas desde el punto de vista de las eficiencias. La eficiencia del sistema más elevada fue la del 1010 presentando $\eta_s=68\%$ and $\bar{\eta}_s=65.3\%$, para la máxima y la promedio, respectivamente. Estos valores pueden estar relacionados con la eficiencia máxima del sistema estudiado (Mini Horno) y se relaciona con los factores de horno obtenidos (76%@Máximo, 68%@90%, 60%@80%).

La operación del Mini Horno Solar es susceptible a la dirección y velocidad del viento, y tiene un importante efecto en la temperatura de salida del aire independientemente de la configuración del sistema. Estas variables afectan el sistema de seguimiento del heliostato causando ligeros movimientos debido a la resistencia del mismo sistema produciendo movimientos de entrada y salida de foco en el spot concentrado sobre el receptor generando variaciones en la temperatura de salida del aire.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES GENERALES

*“Prefiero ser un mono transformado que
un hijo desfigurado de Adán”.*

- Paul Broca

1. Se realizó la evaluación experimental de un reactor-receptor volumétrico solar usando el Mini Horno de la Plataforma Solar de Hermosillo como fuente de flux solar concentrado para producir aire de alta temperatura.
2. Se probaron seis configuraciones de sistemas. Se utilizaron receptores porosos de SiC de 10 y 20 ppi para los experimentos (10, 20, 1010, 2020, 1020 y 2010). Los sistemas fueron evaluados experimentalmente bajo tres factores de sombra: 0%, 35% y 65% para analizar su efecto en la temperatura de salida del aire. La tasa de flujo volumétrico se mantuvo constante durante las pruebas experimentales y se fijó en 0.0033 m³/s.
3. Se concluye que la temperatura de salida del aire (máxima y promedio) depende del factor de sombra: cuanto menor sea el factor de sombra, mayor será la temperatura de salida del aire. La temperatura máxima fue de 660 °C para el sistema 20 con 0% de sombra.
4. Con respecto a los resultados de eficiencia, las siguientes conclusiones son presentadas. Independientemente del sistema evaluado, el elevado flux solar concentrado suministrado y alta temperatura de operación causan bajas eficiencias térmica y general del sistema, por lo que una baja eficiencia producirá un incremento en la temperatura de salida del aire.
5. Los resultados de este estudio se utilizaron para enviar un artículo para su publicación, que actualmente se encuentra en revisión.



REFERENCIAS

- [1] Ali M, Rady M, Attia MAA, Ewais EMM. Consistent coupled optical and thermal analysis of volumetric solar receivers with honeycomb absorbers. *Renew Energy* 2020;145:1849–61. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.082>.
- [2] Raboaca MS, Badea G, Enache A, Filote C, Rasoi G, Rata M, et al. Concentrating solar power technologies. *Energies* 2019;12:1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en12061048>.
- [3] Wang F, Shuai Y, Tan H, Zhang X, Mao Q. Heat transfer analyses of porous media receiver with multi-dish collector by coupling MCRT and FVM method. *Sol Energy* 2013;93:158–68. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.004>.
- [4] Riveros-Rosas D, Sánchez-González M, Estrada CA. Three-dimensional analysis of a concentrated solar flux. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2008;130:0145031–4. <https://doi.org/10.1115/1.2807212>.
- [5] Perez-Enciso R, Riveros-Rosas D, Sanchez M, Pérez-Rabago CA, Arancibia-Bulnes CA, Romero-Paredes H, et al. Three-dimensional analysis of solar radiation distribution at the focal zone of the solar furnace of IER-UNAM. *Energy Procedia* 2014;57:3031–40. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.339>.
- [6] Gómez F, Gonzalez-aguilar J, Romero M. Experimental 3D flux distribution of a 7 kW e -solar simulator. 17th SolarPACES Conf., 2011.
- [7] Perez-Enciso R, Gallo A, Riveros-Rosas D, Fuentealba-Vidal E, Perez-Rábago C. A simple method to achieve a uniform flux distribution in a multi-faceted point focus concentrator. *Renew Energy* 2016;93:115–24. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.069>.
- [8] Shuai Y, Xia XL, Tan HP. Numerical study of radiation characteristics in a dish solar collector system. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2008;130:0210011–8. <https://doi.org/10.1115/1.2840570>.

-
- [9] Röger M, Herrmann P, Ulmer S, Ebert M, Prah1 C, Göhring F. Techniques to measure solar flux density distribution on large-scale receivers. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2014;136:1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4027261>.
- [10] Chen X, Xia XL, Meng XL, Dong XH. Thermal performance analysis on a volumetric solar receiver with double-layer ceramic foam. *Energy Convers Manag* 2015;97:282–9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.066>.
- [11] Barreto G, Canhoto P, Collares-Pereira M. Three-dimensional modelling and analysis of solar radiation absorption in porous volumetric receivers. *Appl Energy* 2018;215:602–14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.065>.
- [12] Chen X, Xia XL, Dong XH, Dai GL. Integrated analysis on the volumetric absorption characteristics and optical performance for a porous media receiver. *Energy Convers Manag* 2015;105:562–9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.028>.
- [13] Du S, Xia T, He YL, Li ZY, Li D, Xie XQ. Experiment and optimization study on the radial graded porous volumetric solar receiver matching non-uniform solar flux distribution. *Appl Energy* 2020;275:115343. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115343>.
- [14] Eccher M, Turrini S, Salemi A, Bettonte M, Miotello A, Brusa RS. Construction method and optical characterization of parabolic solar modules for concentration systems. *Sol Energy* 2013;94:19–27. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.028>.
- [15] Wang G, Wang F, Shen F, Jiang T, Chen Z, Hu P. Experimental and optical performances of a solar CPV device using a linear Fresnel reflector concentrator. *Renew Energy* 2020;146:2351–61. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.090>.
- [16] He YL, Wang K, Qiu Y, Du BC, Liang Q, Du S. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions. *Appl Therm Eng* 2019;149:448–74. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.006>.

-
- [17] Xia XL, Dai GL, Shuai Y. Experimental and numerical investigation on solar concentrating characteristics of a sixteen-dish concentrator. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37:18694–703. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.115>.
- [18] Coughenour BM, Stalcup T, Wheelwright B, Geary A, Hammer K, Angel R. Dish-based high concentration PV system with Köhler optics. *Opt Express* 2014;22:A211. <https://doi.org/10.1364/oe.22.00a211>.
- [19] Johnston G. Focal region measurements of the 20 m² tiled dish at the Australian National University. *Sol Energy* 1998;63:117–24. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00041-3).
- [20] Güven HM, Bannerot RB. Derivation of universal error parameters for comprehensive optical analysis of parabolic troughs. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 1986;108:275–81. <https://doi.org/10.1115/1.3268106>.
- [21] Ulmer S, Reinalter W, Heller P, Lüpfert E, Martínez D. Beam characterization and improvement with a flux mapping system for dish concentrators. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2002;124:182–8. <https://doi.org/10.1115/1.1464881>.
- [22] Qiu K, Yan L, Ni M, Wang C, Xiao G, Luo Z, et al. Simulation and experimental study of an air tube-cavity solar receiver. *Energy Convers Manag* 2015;103:847–58. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.013>.
- [23] Shuai Y, Xia X, Tan H. Numerical simulation and experiment research of radiation performance in a dish solar collector system. *Front Energy Power Eng China* 2010;4:488–95. <https://doi.org/10.1007/s11708-010-0007-z>.
- [24] Jaramillo OA, Pérez-Rábago CA, Arancibia-Bulnes CA, Estrada CA. A flat-plate calorimeter for concentrated solar flux evaluation. *Renew Energy* 2008;33:2322–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.020>.
- [25] Dähler F, Wild M, Schächli R, Haueter P, Cooper T, Good P, et al. Optical design and experimental characterization of a solar concentrating dish system for fuel production via thermochemical redox cycles. *Sol Energy* 2018;170:568–75. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.085>.

-
- [26] Gardon R. An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation. *Rev Sci Instrum* 1953;24:366–70. <https://doi.org/10.1063/1.1770712>.
- [27] Shannon RE. 1998_0002.pdf. *Proc. 1998 Winter Simul. Conf.*, 1998, p. 7–14.
- [28] Blanco MJ, Amieva JM, Mancillas A. The Tonatiuh Software Development Project: An Open Source Approach to the Simulation of Solar Concentrating Systems. *Comput. Inf. Eng.*, Orlando, Florida USA: ASMEDC; 2005, p. 157–64. <https://doi.org/10.1115/IMECE2005-81859>.
- [29] Lokeswaran S, Mallick TK, Reddy KS. Design and analysis of dense array CPV receiver for square parabolic dish system with CPC array as secondary concentrator. *Sol Energy* 2020;199:782–95. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.075>.
- [30] Neumann A, Groer U. Experimenting with concentrated sunlight using the DLR solar furnace. *Sol Energy* 1996;58:181–90. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00079-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00079-5).
- [31] Neumann A, Witzke A, Jones SA, Schmitt G. Representative terrestrial solar brightness profiles. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2002;124:198–204. <https://doi.org/10.1115/1.1464880>.
- [32] Kodama T. High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels. vol. 29. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00059-5).
- [33] Hischer I, Leumann P, Steinfeld A. Experimental and numerical analyses of a pressurized air receiver for solar-driven gas turbines. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2012;134. <https://doi.org/10.1115/1.4005446>.
- [34] Roldán MI, Avila-Marin A, Alvarez-Lara M, Fernandez-Reche J. Experimental and Numerical Characterization of Ceramic and Metallic Absorbers under Lab-scale Conditions. *Energy Procedia* 2015;69:523–31. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.061>.
- [35] Pitz-Paal R, Hoffschmidt B, Böhmer M, Becker M. Experimental and numerical

-
-
- evaluation of the performance and flow stability of different types of open volumetric absorbers under non-homogeneous irradiation. *Sol Energy* 1997;60:135–50. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00007-8).
- [36] Fend T, Pitz-Paal R, Reutter O, Bauer J örg, Hoffschmidt B. Two novel high-porosity materials as volumetric receivers for concentrated solar radiation. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2004;84:291–304. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.01.039>.
- [37] Zhu J, Wang K, Li G, Wu H, Jiang Z, Lin F, et al. Experimental study of the energy and exergy performance for a pressurized volumetric solar receiver. *Appl Therm Eng* 2016;104:212–21. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.075>.
- [38] Ávila-Marín AL. Volumetric receivers in Solar Thermal Power Plants with Central Receiver System technology: A review. *Sol Energy* 2011;85:891–910. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.002>.
- [39] Pritzkow WEC. Pressure loaded volumetric ceramic receiver. *Sol Energy Mater* 1991;24:498–507. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(91\)90086-Z](https://doi.org/10.1016/0165-1633(91)90086-Z).
- [40] Kami J, Kribus A, Rubin R, Doron P. The Porcupine: A novel high-flux absorber for volumetric solar receivers. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 1998;120:85–95. <https://doi.org/10.1115/1.2888060>.
- [41] Wang P, Li JB, Bai FW, Liu DY, Xu C, Zhao L, et al. Experimental and theoretical evaluation on the thermal performance of a windowed volumetric solar receiver. *Energy* 2017;119:652–61. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.024>.
- [42] Pabst C, Feckler G, Schmitz S, Smirnova O, Capuano R, Hirth P, et al. Experimental performance of an advanced metal volumetric air receiver for Solar Towers. *Renew Energy* 2017;106:91–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.016>.
- [43] Aichmayer L, Garrido J, Wang W, Laumert B. Experimental evaluation of a novel solar receiver for a micro gas-turbine based solar dish system in the KTH high-flux solar simulator. *Energy* 2018;159:184–95.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.120>.

- [44] Hoffschmidt B, Téllez FM, Valverde A, Fernández J, Fernández V. Performance evaluation of the 200-kWth HiTRec-II open volumetric air receiver. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2003;125:87–94. <https://doi.org/10.1115/1.1530627>.
- [45] Téllez FM. Thermal Performance Evaluation of the 200 kWth “SolAir” Volumetric Solar Receiver. 2003.
- [46] Avila-Marin A, Alvarez-Lara M, Fernandez-Reche J. Experimental results of gradual porosity volumetric air receivers with wire meshes. *Renew Energy* 2018;122:339–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.073>.
- [47] Zaversky F, Aldaz L, Sánchez M, Fernández-Reche J, Füssel A, Adler J. Experimental and numerical evaluation of a small array of ceramic foam volumetric absorbers. *AIP Conf Proc* 2019;2126. <https://doi.org/10.1063/1.5117578>.
- [48] Du S, Li MJ, He Y, Li ZY. Experimental and numerical study on the reflectance losses of the porous volumetric solar receiver. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2020;214:110558. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110558>.
- [49] Patil VR, Kiener F, Grylka A, Steinfeld A. Experimental testing of a solar air cavity-receiver with reticulated porous ceramic absorbers for thermal processing at above 1000 °C. *Sol Energy* 2021;214:72–85. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.045>.
- [50] Bliss RW. Notes on performance design of parabolic solar furnaces. *Sol Energy* 1957;1:22–9. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(57\)90051-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(57)90051-8).
- [51] Perez-Enciso R. Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER. Universidad Nacional Autonoma de México, 2015.
- [52] Red Solarimetrica Mexicana, Estación Hermosillo n.d. <https://solarimetricapsh.unison.mx/index.html>.
- [53] Giacomo P. Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981).

-
- Metrologia 1982;18:33–40. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/18/1/006>.
- [54] Altamirano-Carranza AS. Generación del año meteorológico típico (TMY) para la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH). Universidad de Sonora, 2020.
- [55] Venegas-Reyes E, Jaramillo OA, Castrejón-García R, Aguilar JO, Sosa-Montemayor F. Design, construction, and testing of a parabolic trough solar concentrator for hot water and low enthalpy steam generation. J Renew Sustain Energy 2012;4:53103. <https://doi.org/10.1063/1.4751461>.
- [56] Brooks MJ, Mills I, Harms T. Design, construction and testing of a parabolic trough solar collector for a developing-country application. Proc. ISES Sol. World Congr., Orlando, Florida USA: 2005.
- [57] Blanco J, Alarcón D, Sánchez B, Malato S. Technical comparison of different solar-assisted heat supply systems for a multi-effect seawater distillation unit. ISES Sol World 2003:14–9.
- [58] Moss T a, Brosseau D a. Final Test Results for the Schott HCE on a LS-2 Collector 2005:1–22.
- [59] Murphy LM, MAy EK. Steam Generation in Line-focus Solar Collectors: a Comparative Assessment of Thermal Performance, Operating Stability, and Cost Issues. 1982.

DIFUSIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1. Congresos

Arizona Student Energy Conference

“Experimental analysis of a CPV based on a parabolic dish collector”

Tucson, Arizona. Noviembre 2018.

XLII Semana Nacional de Energía Solar

“Análisis experimental de un concentrador fotovoltaico de disco parabólico”

Ciudad de México. Noviembre 2018.

4to Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables, Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática

“Caracterización térmica y eléctrica de un sistema fotovoltaico de alta concentración de disco parabólico”

Santiago de Querétaro, Querétaro. Octubre 2019.

Reunión Universitaria de Investigación en Materiales

“Estudio óptico para el desarrollo de un reactor solar volumétrico para alta temperatura”

Hermosillo, Sonora. Noviembre 2019.

Arizona Student Energy Conference

“Imagine and ray tracing analysis of a parabolic dish collector”

Tucson, Arizona. Noviembre 2019.

XLIV Semana Nacional de Energía Solar

“Análisis tridimensional de la Distribución de Flux en la Zona Focal del Concentrador de Disco Parabólico”

En Línea, Octubre 2020.

Solar Paces 2020

“Three dimensional analysis of the flux distribution at the focal zone of a parabolic dish

collector”

En Línea, Septiembre 2020.

**International Conference on Innovation in Energy Engineering and Cleaner
Production 2021**

“Optical analysis for a honeycomb solar receiver using a point-focus concentrator”

En Línea, Julio 2021.

XLV Semana Nacional de Energía Solar

“Simulación por trazado de rayos en un receptor volumétrico usando un concentrador
de foco puntual”

Híbrido, Octubre 2021.

ANEXOS