



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SOLAR FOTOTÉRMICA

CARACTERIZACIÓN DE UN REACTOR SOLAR TERMOQUÍMICO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JUAN OMAR DEL VALLE BARRERA

TUTOR PRINCIPAL
DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES
INSTRUTO DE ENERGÍAS REOVABLES, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado

Secretario: Dr. Ramón Tovar Olvera

Vocal: Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes

1^{er}. Suplente: Dra. Heidi Isabel Villafán Vidales

2^{do} Suplente: Dr. Hernando Romero Paredes Rubio

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM
TEMIXCO, MORELOS

TUTOR DE TESIS:

DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIO BULNES

FIRMA

Agradecimientos

Agradezco el apoyo económico recibido por parte del FONDO SECTORIAL CONACYT-SENER SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, a través del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol) proyecto 207450, dentro del Proyecto Estratégico No. 10 COSOLpi "Combustibles solares y procesos industriales", por medio del cual fue posible desarrollar la investigación.

Agradezco al Dr. Camilo A. Arancibia Bulnes por sus consejos, sus enseñanzas, su amistad y el tiempo dedicado a esta tesis

A los miembros del comité tutorial: Dr. Oscar Jaramillo Salgado, Dra. Heidi Villafán Vidales, Dr. Hernando Romero Paredes Rubio, Dr. Ramón Tovar Olvera por sus observaciones y sugerencias que permitieron que la tesis mejorara.

Al Ingeniero José de Jesús Quiñones Aguilar por su apoyo técnico en el Horno Solar y por su amistad.

A Carlos Arreola Ramos por su ayuda y el tiempo de dedicación para esta trabajo

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	6
1.1	Instalaciones solares de alto flujo radiativo.....	6
1.1.1	Torre central.....	7
1.1.2	Horno Solar.....	8
1.2	Procesos termoquímicos para la obtención de Hidrógeno.....	9
1.2.1	Ciclos termoquímicos basados en energía solar concentrada	10
1.3	Objetivos	11
1.3.1	Objetivos específicos.....	12
2.	ESTADO DEL ARTE	14
2.1	Reactores Solares Termoquímicos	14
2.2	Reactores Solares de Radiación indirecta	14
2.3	Reactores Solares de Radiación directa	14
2.3.1	Reactores de partículas	15
2.3.2	Reactores volumétricos.....	17
2.4	Receptores volumétricos	20
2.4.1	Principios de operación.....	21
2.4.2	Transferencia de calor en medios porosos	22
3	METODOLOGÍA.....	25
3.1	Horno Solar (HoSIER).....	25
3.2	Reactor solar	26
3.2.1	<i>Componentes del reactor</i>	27
3.3	Medio Poroso	30
3.4	Procedimiento experimental	31
3.5	Estudio calorimétrico	34
4.	RESULTADOS	38
4.1	Estudio calorimétrico	38
4.2	Sistema de Enfriamiento	45
4.3	Eficiencia del reactor	46

5	CONCLUSIONES	50
6	REFERENCIAS.....	54

1 INTRODUCCIÓN

Mientras que la cantidad de los recursos de combustibles fósiles es limitada, la población mundial va en aumento haciendo que los niveles de vida incrementen el consumo de electricidad a nivel mundial. El futuro de la demanda mundial de energía aumentará por encima del nivel del petróleo, gas y carbón que puede cubrir, con lo que conducirá a un mayor aumento en el precio de la energía y los productos relacionados. Además, la contaminación del aire, debido a la quema de combustibles fósiles, ha sido un problema ambiental para los gobiernos, inversionistas, ambientalistas e investigadores en los últimos años.

Todas estas preocupaciones ponen en evidencia la necesidad de utilizar fuentes de energía renovables, especialmente la energía solar, ya que el sol es una fuente inagotable de energía que de una u otra forma el ser humano lleva aprovechando desde hace siglos. Ya en los últimos años, la energía solar ha sido explorada a través de aplicaciones de energía solar térmica y generación de energía fotovoltaica, y ambas formas han sido consideradas ampliamente tanto por los gobiernos y las empresas [BNE, 2014].

1.1 Instalaciones solares de alto flujo radiativo

Los sistemas solares de alta temperatura requieren el uso de sistemas ópticos de concentración, las cuales también son llamados sistemas de concentración solar de potencia o CSP por sus siglas en inglés (Concentrating Solar Power) cuyo objetivo es aumentar la densidad de flujo radiativo proveniente del sol para ser concentrada hacia un receptor, el cual transfiere la energía térmica a un fluido.

Los sistemas solares de alta temperatura utilizan lentes o espejos, de diferentes características, los cuales suelen estar acompañados de sistemas mecánicos cuyo propósito principal es dar seguimiento al sol y mantener constante el flujo de irradiación. Los dispositivos de concentración típicos son de geometría de "revolución" ya sean de superficie única, como los espejos parabólicos de revolución (discos parabólicos).

También se cuentan entre estos sistemas los concentradores de tipo Fresnel y los cilindros-parabólicos, para la generación de potencia eléctrica (Ver Fig. 1.1). Y por último se tienen los sistemas de superficies múltiples o facetadas, como los campos de helióstatos con concentración, sobre receptor soportado en torre central. (Duffie-Beckman, 2004).

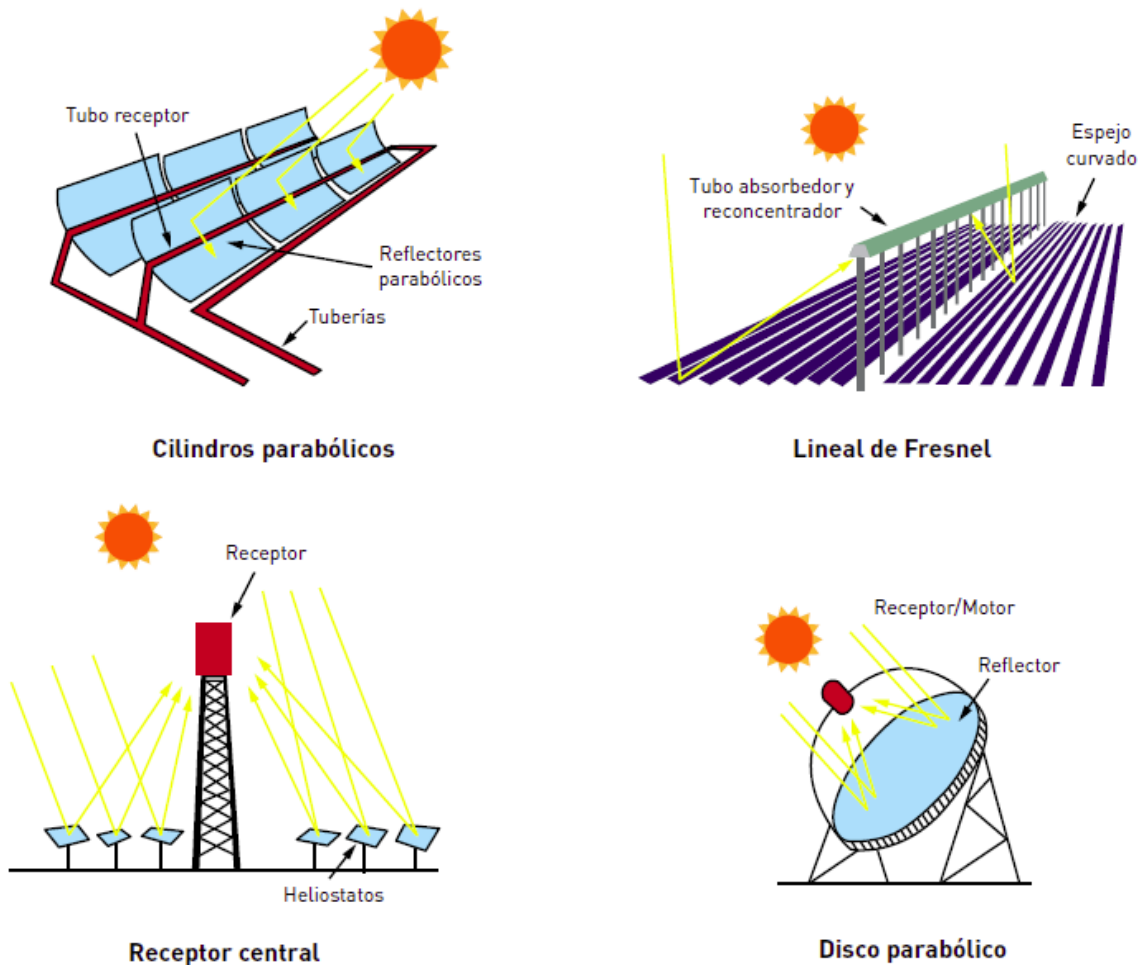


Figura 1.1.- Tipos de Concentradores solares de alta temperatura

1.1.1 Torre central

En las plantas de torre central (Ver Fig. 1.2) los heliostatos (espejos planos) reflejan la radiación solar en un receptor situado en lo alto de una torre por el que circulan sales de nitrato fundidas. Estas sales son impulsadas desde un ‘tanque frío’ hasta el receptor situado en la parte superior de una torre donde se calientan hasta alcanzar 565° . Estas sales calientes bajan al intercambiador de calor para generar vapor de agua.

En condiciones de sobre-energía, en las que la radiación calórica recibida es más que suficiente para cubrir la demanda de la turbina, parte de esas sales se almacena en un tanque caliente capaz de conservar el calor para utilizarlo en momentos de baja radiación solar. Las sales almacenadas se encargan entonces de ceder el calor almacenado y continuar generando energía eléctrica (Semanc et al., 2007)

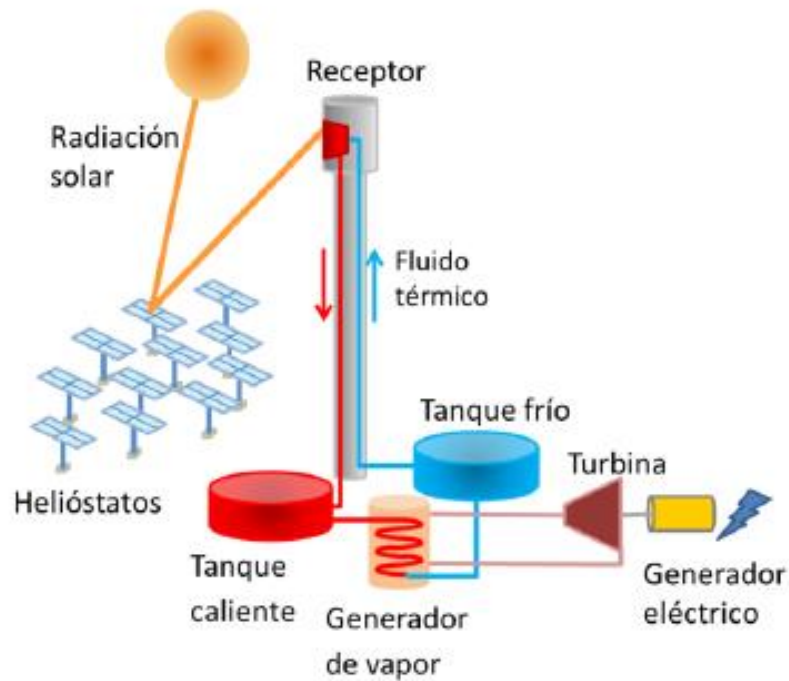


Figura 1.2.- Concepto de una planta de Torre central

1.1.2 Horno Solar

Los Hornos Solares son utilizados para altas temperaturas por el orden de las 3500 K (Trefilov et al., 1999), demandando un ambiente controlado y equipado para el desarrollo de nuevas tecnologías.

Un Horno solar (Ver Fig. 1.3) está compuesto por un conjunto de sistemas con características específicas. Un primer sistema óptico es el Heliostato (conjunto de varios espejos o facetas planas), el cual refleja la radiación solar directa hacia un concentrador. El concentrador es otro sistema óptico encargado de aumentar la densidad de flujo radiativo solar, por medio de espejos de superficie cóncava esférica, reflejando la radiación solar directa hacia el foco del concentrador (3.68 m). Otro sistema importante es el atenuador, ubicado entre el Heliostato y el concentrador, siendo el sistema de control que regula la entrada de la radiación solar proveniente del Heliostato hacia el concentrador, En la zona focal se encuentra una mesa de trabajo, donde se colocan los montajes experimentales.

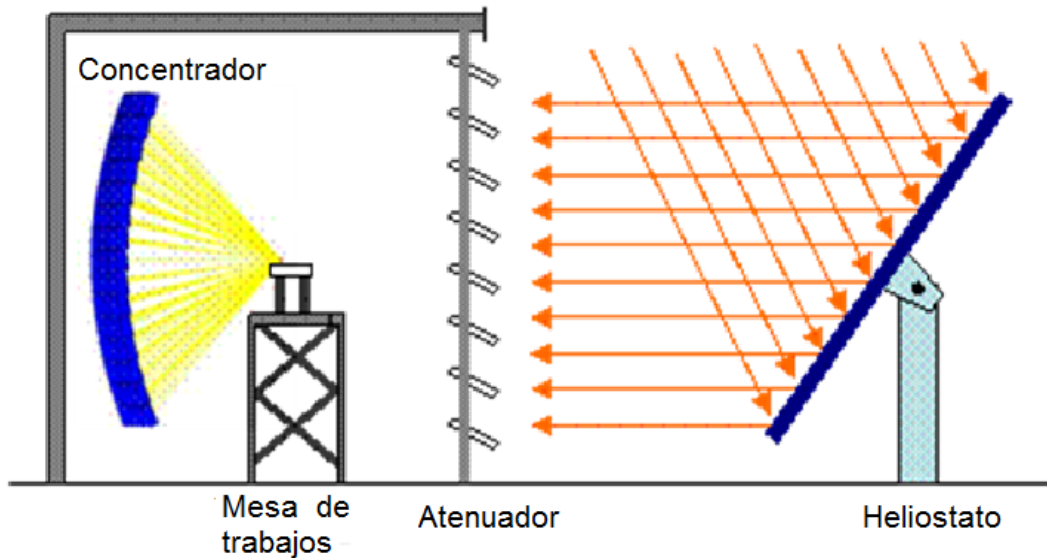


Figura 1.3.- Sistema esquemático Horno Solar

El horno solar es una tecnología para aprovechar, como fuente de calor, y llevar a cabo reacciones químicas a altas temperaturas. Por lo anterior, resulta una opción viable para la producción de combustibles solares, como el hidrógeno. Existen tres tipos de procesos para producir hidrógeno a partir de la energía solar: electroquímicos, fotoquímicos y termoquímicos. (Ngoh y Njomob et al., 2012)

1.2 Procesos termoquímicos para la obtención de Hidrógeno

Los procesos electroquímicos se basan en la irradiación con energía solar de la celda electroquímica para proporcionar la energía eléctrica necesaria para llevar a cabo la transformación química que dará lugar a la producción de hidrógeno. En el caso de los procesos fotoquímicos se aprovecha la luz de la propia radiación solar para llevar a cabo el proceso de reducción de un óxido metálico; que en una segunda etapa se hidrolizara y dará lugar a la producción de hidrógeno. Por último, los procesos termoquímicos utilizan la radiación solar concentrada como fuente de energía en el tratamiento térmico de materiales a elevada temperatura. (Steinfeld et al., 2010).

Los procesos termoquímicos utilizan la radiación solar concentrada como fuente calorífica de alta temperatura para producir reacciones químicas endotérmicas, es decir, transforman la energía térmica en energía química. En la figura 1.4 se presenta un esquema con todos los procesos termoquímicos susceptibles de generar hidrógeno a partir de energía solar concentrada. Estos procesos termoquímicos se dividen en dos grupos (Steinfeld et al., 2005, Villafán-Vidales et al., 2017).

- Los procesos basados en la descarbonización de combustibles fósiles para la obtención de hidrógeno: reformado, craqueo y gasificación.

- b) Los procesos que utilizan agua como materia prima para la obtención de hidrógeno: termólisis y ciclos termoquímicos.

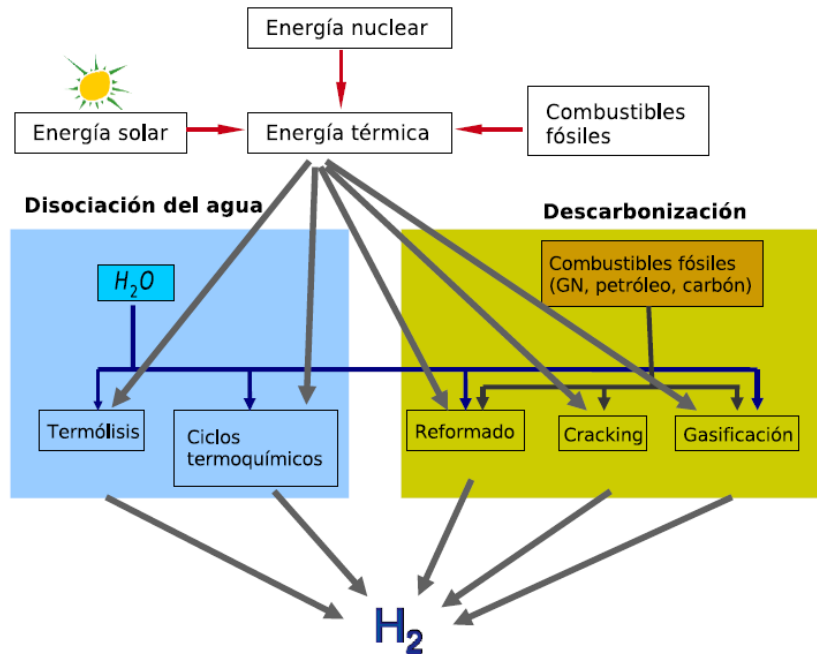


Figura 1.4. Procesos termoquímicos para la obtención de hidrógeno solar

Los procesos basados en la descarbonización de combustibles fósiles presentan dos importantes inconvenientes: requieren de combustibles fósiles y generan CO_2 y/o CO que son gases contaminantes medioambientales que contribuyen al calentamiento global.

Dentro de los procesos que utilizan agua como materia prima para la obtención de hidrógeno, la termólisis o disociación directa de la molécula de agua tiene la ventaja de que es un proceso sencillo. Sin embargo, es altamente endotérmico, es decir, requiere de un alto aporte de energía para obtener un grado de disociación aceptable (a temperaturas superiores a $2800\text{ }^\circ\text{C}$ y 0.01 bares de presión, el rendimiento del proceso es solamente de un 17%). Además, requiere de una técnica efectiva de separación del hidrógeno y el oxígeno formados, evitando así su recombinación explosiva.

Los ciclos termoquímicos son una secuencia de reacciones endotérmicas y exotérmicas que constituyen un ciclo. Su objetivo es la de producción de hidrógeno a partir de la disociación de la molécula de agua, de esta manera se sortean los dos principales inconvenientes de la termólisis, es decir, se disminuye la temperatura de operación y se obtienen el oxígeno y el hidrógeno en etapas diferentes.

1.2.1 Ciclos termoquímicos basados en energía solar concentrada

Entre los procesos que se pueden utilizar para producir hidrógeno solar, los ciclos termoquímicos son una de las opciones más prometedoras ya que en principio podrían permitir alcanzar una alta eficiencia energética, debido a la conversión directa de calor en hidrógeno en procesos de alta temperatura (Steinfeld et al., 2005; Kodama y

Gokon et al., 2007). Existen diferentes ciclos termoquímicos que permiten obtener hidrógeno (Abanades et al., 2006), entre los cuales están los basados en óxidos metálicos (Martinek et al., 2014; Chambon et al., 2011). En particular, los óxidos de Cerio ha recibido un interés especial en trabajos recientes (Abanades y Flamant et al., 2006; Villafán-Vidales et al., 2009; Chueh et al., 2010; Venstrom et al., 2014), debido a sus ventajas operativas y potencial de mayores eficiencias (Chueh et al., 2010).

En términos generales, ciclos de óxidos metálicos se pueden representar como un conjunto de dos reacciones



Donde MO_{ox} representa un óxido metálico y MO_{red} un óxido reducido del mismo metal. El primer paso del ciclo es una reacción endotérmica altamente energética que requiere temperaturas típicamente por arriba de 1000 K. En esta reacción, el óxido metálico es reducido a alta temperatura, liberando oxígeno y quedando en un estado menor de oxidación. En el segundo paso el óxido reducido se hidroliza con vapor de agua a temperaturas mucho menores, dando lugar a la producción de hidrógeno y recuperándose el óxido original.

El resultado neto del ciclo es la disociación de la molécula de agua, sin la producción de ningún residuo. Los ciclos termoquímicos se prefieren a la termólisis directa de la molécula de agua, que es un proceso que requiere temperaturas mucho mayores (por arriba de 2500 K) y presenta problemas técnicos muy difíciles de superar (Steinfeld et al., 2005).

Una parte fundamental del desarrollo de procesos termoquímicos solares para la producción de hidrógeno, es el diseño de reactores eficientes para llevarlos a cabo. En dichos reactores, dadas las altas temperaturas y altos niveles de flujo solar concentrado involucrados, los procesos de transferencia de calor por radiación toman un lugar preponderante, junto a la convección y conducción. El diseño debe optimizar la transferencia de calor del flujo solar concentrado hacia los reactivos, preservando la integridad de las diferentes componentes del reactor ante las altas temperaturas. Con el fin de implementar procesos termoquímicos a base de óxidos metálicos mixtos soportados en estructuras cerámicas porosas, se ha desarrollado un reactor solar térmico de cavidad, para ser utilizado en el Horno Solar del IER-UNAM (HoSIER) (Riveros-Rosas et al., 2010).

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es la caracterización de un reactor solar termoquímico puesto a pruebas térmicas, usando un medio poroso como receptor, en ausencia de reacción química, en el Horno Solar del IER-UNAM (HoSIER).

1.3.1 Objetivos específicos

- a) Instrumentar del reactor solar termoquímico, la cual comprende instalar y operar equipos especializados para la medición de valores de interés (Temperatura, presión, flujo másico, etc.).
- b) Realizar un estudio calorimétrico del reactor, evaluando la transferencia de calor en un medio poroso, que estará en el interior del reactor solar como receptor de la radiación solar directa.
- c) Obtener la eficiencia del reactor y las pérdidas de calor del mismo, mediante el estudio calorimétrico.
- d) Identificar puntos de interés en el diseño del reactor, los cuales ayudaran hacer un posterior rediseño y trabajo para el futuro.

2. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se presenta una revisión de artículos científicos en relación al tema propuesto en el proyecto, clasificándolos con base a simulaciones y experimentos realizados en reactores solares para procesos termoquímicos.

2.1 Reactores Solares Termoquímicos

Los reactores termoquímicos solares utilizan como fuente de calor la energía concentrada proveniente del sol para llevar a cabo reacciones químicas. Los reactores solares termoquímicos se pueden clasificar en reactores irradiados directa o indirectamente.

En los reactores irradiados directamente los reactivos son iluminados por la radiación solar concentrada, que entra al reactor a través de una ventana transparente, mientras que en los reactores irradiados indirectamente, los reactivos se calientan mediante conducción, siendo absorbido el calor por una pared opaca del reactor. Los reactores directamente irradiados son los que presentan mejores eficiencias, debido a una transferencia de calor más directa hacia los reactivos y permiten operar en procesos de mayor temperatura. (Steinfeld et al. 2001)

2.2 Reactores Solares de Radiación indirecta

Se pueden clasificar en tubulares o de doble cámara. Los primeros dispositivos de intercambio indirecto empleados en energía solar de concentración fueron receptores tubulares con aplicaciones termoeléctricas.

Estos receptores se basan en una cavidad opaca en la cual se introduce la energía solar a través de una apertura que irradia sobre una serie de tubos por cuyo interior circula un fluido que aumenta su energía térmica. Las primeras aplicaciones termoquímicas están basadas en el tratamiento de combustibles, principalmente reformado de metano, oxidación parcial y conversión de biomasa. (Levitan et al. 1989)

2.3 Reactores Solares de Radiación directa

Los reactores directamente irradiados pueden clasificarse como reactores del tipo volumétrico (monolítico), con material activo fijo y reactores que utilizan partículas en movimiento. En los reactores volumétricos los receptores están formados por estructuras porosas tridimensionales que reciben la radiación concentrada y transfieren el calor a un fluido, normalmente gas, que atraviesa la estructura.

Los reactores de partículas funcionan como receptores, las partículas sólidas constituyen los reactivos que se transforman mediante la energía térmica absorbida. Puede existir un fluido que arrastre o mantenga las partículas en suspensión y que a su vez favorezca el intercambio de calor. (Hubry et al. 1986).

En otros reactores de partículas, el reactivo corresponde a la fase gaseosa. Para favorecer la absorción de calor en el gas, se genera un lecho de partículas sólidas de un material poroso que consigue aportar una gran superficie de intercambio de calor. Esto genera un buen medio

absorbente si el tamaño de partícula es elegido correctamente y el material tiene las propiedades ópticas apropiadas. (Kogan et al. 2005)

2.3.1 Reactores de partículas

Siegel et. al., 2008 Presenta un prototipo de receptor de partículas sólidas (SPR) de 2 MW el cual consiste en una cavidad sobre la que cae una cortina de partículas esféricas que se irradian directamente con energía solar. Este prototipo ha sido probado en el Nacional Solar Termal Test Facility (NSTTF) en Albuquerque, Nuevo México. Las dimensiones del receptor son 6.3 m de altura, 1.85 m de anchura y 1.5 m de profundidad. La apertura tiene un diámetro de 1.5 m. El interior y la superficie frontal de la cavidad que rodea la apertura están recubiertos por una capa aislante (alúmina-sílice rígida, cuyo punto de fusión es 1760°C).

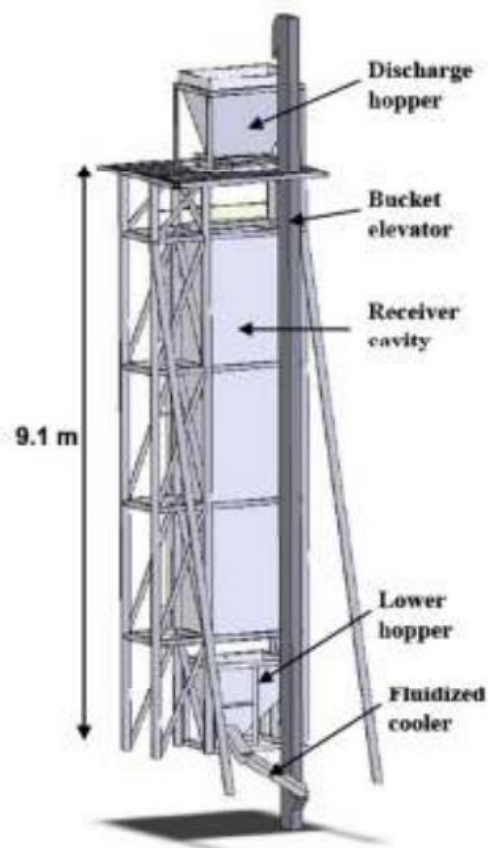


Figura 2.1. Esquema de reactor solar de cortina de partículas de Siegel et. al., 2008.

El reactor funciona en modo batch; mediante un silo situado en la zona superior que tiene capacidad para 1800 kg de partículas (aluminosilicato con 7% de Fe_eO_3). Las partículas caen a través de la apertura, donde son calentadas y se recogen en el colector situado en la zona inferior. El grosor de la cortina puede variar según van cayendo las partículas pero no debe superar los 20 cm. Se ha evaluado la temperatura de las partículas y la eficiencia del receptor en función de la potencia de la radiación en la apertura y del flujo de partículas, obteniendo unas temperaturas máximas en las partículas en torno a los 250° C. Puesto que el prototipo se propuso con el fin de

emplearlo en aplicaciones químicas las temperaturas requeridas están muy por encima, en torno a los 900° C. El estudio realizado concluye que dicha temperatura se puede llegar a alcanzar optimizando el diseño óptico del receptor y aumentando la concentración de la radiación hasta 800 soles.

Bertocchi et. al., 2004 propone un modelo de receptor de partículas que puede incrementar la temperatura del gas en 1000 K por encima de lo conseguido hasta el momento. Se basa en la idea de añadir una nube de partículas de carbón micrométricas (0,2-0,5 % en peso) a una corriente gaseosa con el fin de incrementar su temperatura respecto a la que se conseguiría en ausencia de partículas.

Este receptor fue diseñado para una potencia de entrada de 10 kW, operando bajo atmósfera presurizada gracias a la ventana transparente por la que se introduce la radiación. Dicha ventana es de cuarzo y está refrigerada, por otro lado, se mantiene limpia gracias a una inyección de gas que evita la deposición de partículas sobre la misma. La zona de inyección de las partículas y el gas está formada por un módulo de acero resistente a altas temperaturas de 40 mm de altura y 78 mm de diámetro. La cavidad del reactor es de ZrO_2 y está recubierta por una capa de $Al_2O_3SiO_2$. Esta cavidad tiene forma cónica y en la zona inferior consta de una serie de orificios para medir la temperatura de salida del gas. El recubrimiento exterior del reactor es una carcasa de acero inoxidable. (Figura 2.2)

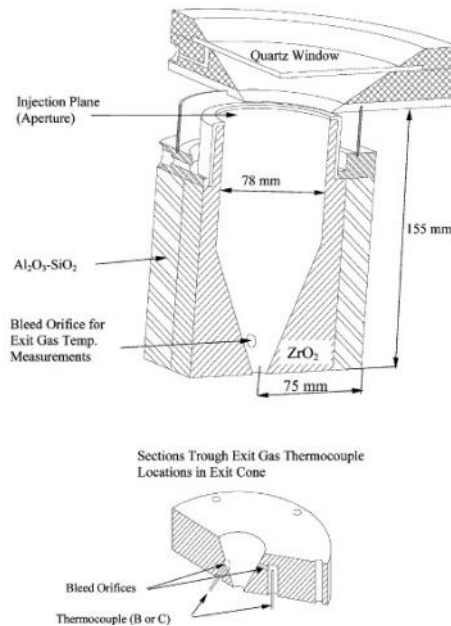


Figura 2.2. Reactor de partículas propuesto por Bertocchi et. al., 2004.

En los ensayos se midieron las temperaturas de salida para tres gases diferentes, nitrógeno, aire y dióxido de carbono, variando dicha temperatura entre 1740 y 1980 K.

Flamant et. al., 2006 desarrolla una serie de estudios para realizar la etapa de reducción de CeO_2 para la producción de hidrógeno a partir del ciclo termoquímico metálico de cerio en un reactor solar a escala de laboratorio en el que introduce el reactivo en forma de pellets manteniéndolo fijo mientras es iluminado por la radiación solar. Se trata de un reactor esférico, transparente, fabricado

de Pyrex. Este tipo de reactor está cerrado y permite operar bajo atmósferas controladas: inerte, vacío. (Figura 2.3)

Un gas inerte se introduce por la zona posterior del reactor, y fluye de forma continua arrastrando el oxígeno que se genera en la reacción de reducción. Sobre un soporte que contiene agua de refrigeración se coloca el reactivo que es calentado directamente mediante energía solar concentrada procedente de un concentrador parabólico. La reacción tiene lugar a una presión constante en el rango de 100 - 200 mbar, la cual se regula con un manómetro y una bomba de vacío. A partir de este sistema, se alcanzan temperaturas de 2000° C. El sólido reducido se obtiene de forma discontinua después de un tiempo de reacción de entre 2 y 6 minutos para muestras iniciales de 0.2 - 0.5 gramos.

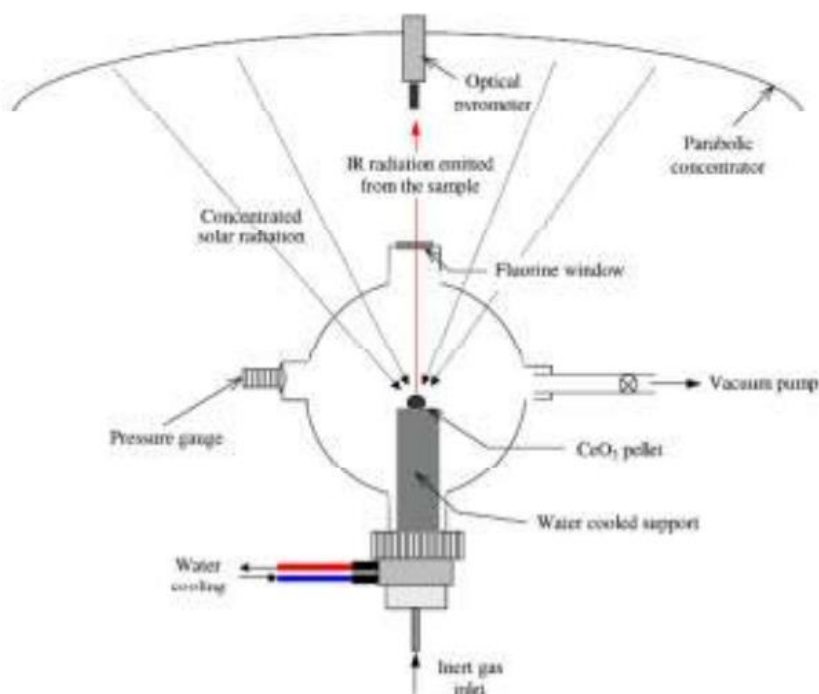


Figura 2.3. Esquema del reactor solar para la etapa de reducción de CeO_2 por Flamant 2006.

Este reactor de 10 kW de potencia, fue diseñado en una colaboración del CSIRO y el Tokio Tech para el proyecto "Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate" en el año 2009. Este reactor está diseñado para desarrollar un ciclo termoquímico de oxidación-reducción completo, intercalando ambas etapas gracias al movimiento rotativo. El reactivo sólido está fijado sobre el cilindro rotativo. A través de una ventana transparente, el reactor es iluminado por la radiación solar concentrada, donde tiene lugar la reacción endotérmica de reducción. Después, debido al giro del cilindro, el sólido reducido pasa a la zona donde tiene lugar la reacción de disociación del agua.

2.3.2 Reactores volumétricos

Los reactores volumétricos (reactores monolíticos) están formados por estructuras porosas donde se deposita el óxido metálico a utilizar. Este material recibe directamente la radiación concentrada

y transfiere el calor a un fluido, normalmente aire, que atraviesa la estructura. Los reactores multiplican considerablemente la superficie de contacto entre la radiación solar y el material del absorbedor y el gas de arrastre que lo atraviesa, permitiendo potenciar la transferencia de calor por convección y, por ello, trabajar a grandes flujos solares (Gomez-Garcia et. al. 2016).

Un primer criterio es el rango de temperatura en el que se quiera operar. Así, se están desarrollando diferentes tipos de absorbedores:

- Absorbedores volumétricos metálicos para uso entre 600 y 800 °C
- Absorbedores volumétricos cerámicos para uso entre 900 y 1200 °C

El empleo de aleaciones metálicas para la construcción de los absorbedores supone, una serie de ventajas que abarcan desde las puramente tecnológicas hasta las comerciales. Por una parte, las aleaciones metálicas han sido ampliamente estudiadas y desarrolladas para su utilización en multitud de aplicaciones industriales, por lo que existen aleaciones diseñadas específicamente para su utilización a alta temperatura en diferentes tipos de atmósferas (oxidantes reductoras, gases ácidos).

Esto supone, que también el grado de desarrollo de los procesos de fabricación y conformado está muy avanzado, lo que implica que los costes de construcción y montaje de sistemas e instalaciones basadas en aleaciones metálicas son más reducidos. Desde el punto de vista del rendimiento del absorbedor, para la selección de la aleación se tendrá también en cuenta el requisito de alta absorptividad, es decir, materiales que tengan lo que se denomina una oxidación en “negro”.

Las aleaciones más utilizadas hasta la actualidad son los aceros inoxidable, con alto contenido en cromo y níquel, y algunas aleaciones de níquel, con alto contenido en cromo, ya que ambos elementos tienen capacidad para formar fácilmente óxidos de color negro.

Los absorbedores volumétricos cerámicos trabajan en el entorno de los 1000 °C, con focos localizados que pueden alcanzar 1400°C y atmósfera oxidante. Estas exigencias reducen considerablemente los materiales candidatos para la fabricación de absorbedores, siendo los más adecuados las cerámicas. De entre estos la alúmina sería un material ideal, por sus características y su bajo costo. Sin embargo es un material de color blanco, siendo sus características ópticas y de absorptividad muy poco satisfactorias. No obstante, existen técnicas superficiales que permiten recubrir esta alúmina para otorgarle propiedades ópticas superficiales adecuadas, manteniendo el material base sus propiedades.

Wörmer et al. 1998. desarrolla un reformador de metano con una potencia de entre 200 y 300 kW (Figura 2.4). Este reactor volumétrico cuenta con una ventana cóncava por la cual penetra la radiación solar. En el interior existe una estructura absorbidora de material catalítico, para dicho material se probaron dos sistemas, una estructura de espuma de Al_2O_3 la cual se utilizó como soporte para el Rh, metal activo y otra de cerámica de SiC.

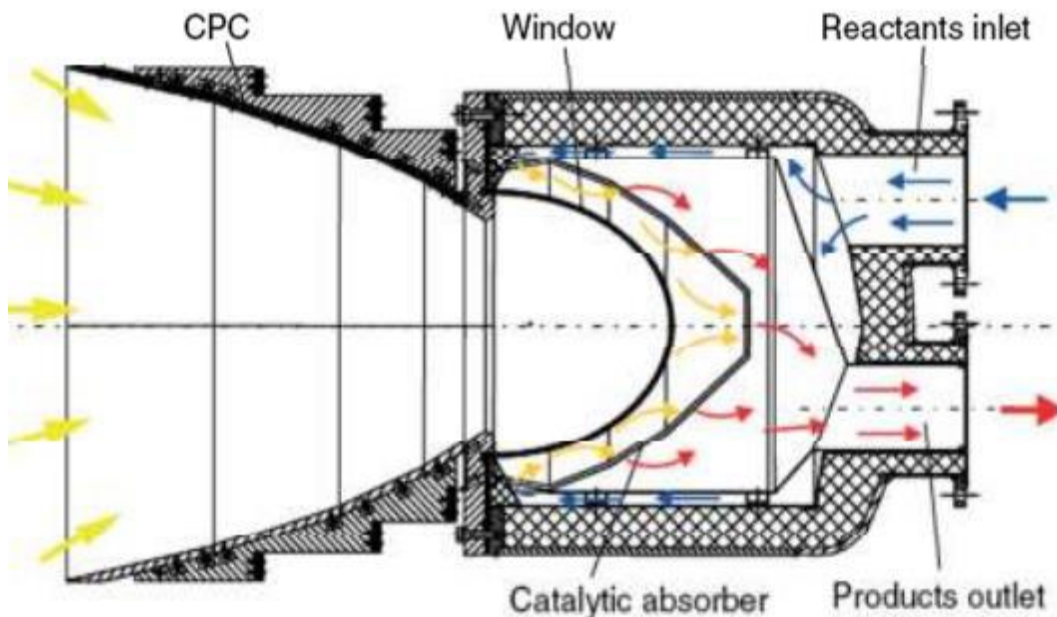


Figura 2.4. Esquemas de reformador solar de metano volumétrico del proyecto REFSOL

El metano se inyecta por la parte delantera, de forma tangencial a la ventana y el producto se extrae por la zona posterior. Este sistema fue probado en la torre solar de pruebas del Instituto Weizmann en Israel donde se observó que la actividad del catalizador permite alcanzar conversiones de hasta el 80 % operando a temperaturas entre 700 y 860 ° C para una presión absoluta de 3.5 bar..

Con este reactor solar se consigue la producción de hidrógeno con un ratio de $CO_2/(CO_2 + H_2O)$ para metano bajo, en torno a 1.8 mientras que para los procesos industriales del reformado de metano este valor se encuentra entre 2.4 y 3 mejorando así la eficiencia del sistema.

El proceso de reformado de metano solar ha sido probado a 1100 K y entre 8 y 10 bar en una instalación de torre solar para una potencia de entre 300 y 500 kW.

N. Gokon Energy et al. 2008. Desarrollan, a escala de laboratorio, un reactor volumétrico para la disociación del agua mediante el ciclo termoquímico de ferrita soportada en circona. El elemento absorbedor es de tipo espuma, sobre el cual se fija el reactivo que es irradiado directamente con un simulador solar.

El preparado de Fe_3O_4 no es fijo por lo que se coloca sobre un plato de cuarzo poroso al final de la tubería de entrada (Figura 2.5). Los diámetros interiores de las tuberías de entrada y de salida son de 31 mm y 39 mm respectivamente.

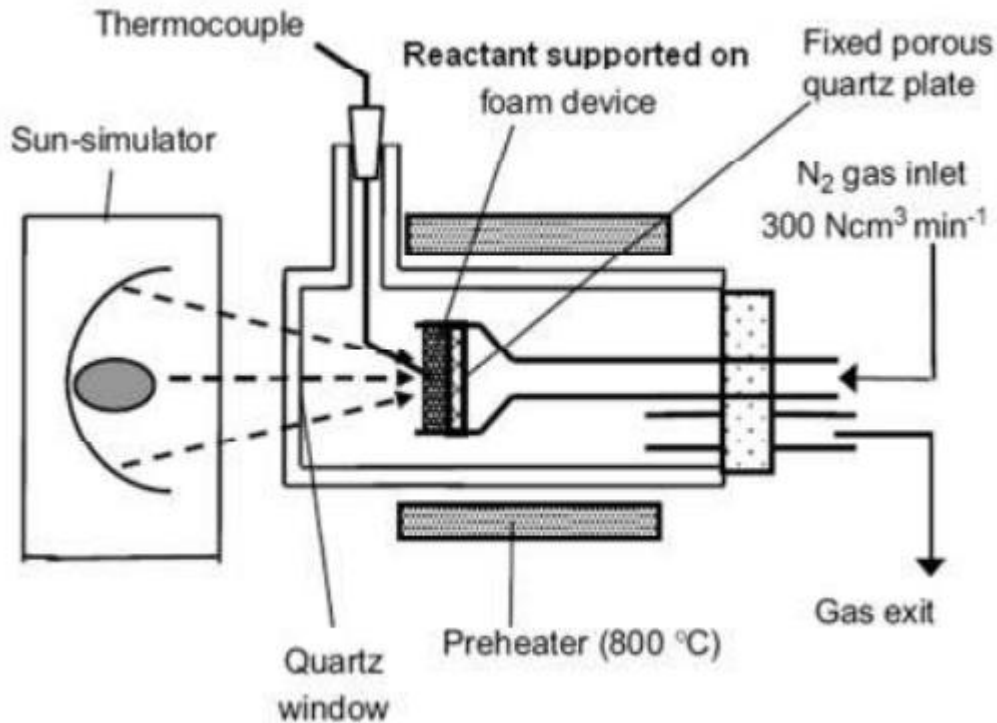


Figura 2.5. Reactor volumétrico ciclo termoquímico de ferrita Kodama et al. 2008.

El proceso consiste en una etapa previa de precalentamiento del elemento absorbedor hasta 800° C para posteriormente alcanzar temperaturas entre 1400 y 1450 °C con una lámpara de Xe de 7 kW que simula la radiación solar durante períodos de entre 30 y 60 minutos de exposición.

El absorbedor se sitúa en el foco del concentrador el cual genera una mancha de 7 cm² de diámetro. Un caudal de nitrógeno de 0.3 m³/min se hace atravesar por el absorbedor de tipo espuma hacia el tubo exterior para el arrastre del oxígeno liberado en la etapa de reducción del óxido.

El dispositivo de espuma térmicamente reducido se fija en un reactor de tubo de cuarzo con un diámetro interior de 31 mm para llevar a cabo la etapa de disolución del agua y producción de hidrógeno. Este dispositivo ha sido probado para cantidades de reactivo menores de 1 gramo alcanzando conversiones en torno al 20 – 27%.

2.4 Receptores volumétricos

El principal objetivo de los receptores volumétricos es el de incrementar considerablemente la superficie de contacto entre el material del absorbedor y el fluido que lo atraviesa, permitiendo potenciar la transferencia de calor y, por ello, trabajar a grandes flujos solares. La elección de materiales cerámicos para los receptores volumétricos permite incrementar la temperatura de trabajo entre 1200-1300 °C, muy por encima de la temperatura típica de los metálicos, 700-800 °C (Las principales ventajas de este tipo de medios son: su alta eficiencia debida a la absorción directa de radiación, alcanzan altas temperaturas de operación porque se favorece la transferencia de calor y las partículas pueden actuar como medio de almacenamiento de calor. (kribus et. al., 2014)

Una pieza fundamental en el proceso de conversión solar térmica es el absorbedor de la radiación, el cual debe estar ubicado en el punto focal del concentrador, para altas temperaturas, un medio poroso (absorbedor volumétrico) puede dar más altas eficiencias que un receptor tubular, debido al llamado “efecto volumétrico” (Ávila-Marín et. al., 2011).

Este efecto es definido como la existencia de una temperatura baja de absorción en la parte delantera del absorbedor tal que las pérdidas debidas a la emisión de la radiación hacia el ambiente son reducidas. Sin embargo los medios porosos a la fecha no presentan este efecto, producen altas temperaturas en la cara frontal y su eficiencia oscila alrededor del 70% con temperaturas del aire de 1000 °C. Por ejemplo El receptor del “TSA” su receptor volumétrico reporto temperaturas de salida del aire de 780 °C y una eficiencia del 70 % (Tyner et al., 1996)

Otro ejemplo pero con una alta eficiencia entre 80-90% con una temperatura de salida del aire mayor a los 1100 °C pero bajo una alta incidencia de flujo solar, lo que hace que su uso no sea comercial para la industria (Kribus et al., 2001).

2.4.1 Principios de operación

Los principios básicos de los receptores volumétricos son:

- Son hechos de diferentes materiales (metales, cerámicos) con una porosidad específica instalados en un volumen dentro del receptor para que la radiación solar concentrada se absorba en la estructura
- La radiación solar concentrada calienta el material en el volumen y al mismo tiempo el fluido de trabajo pasa a través del receptor volumétrico calentándose por convección forzada, transformando la radiación solar en energía térmica. Figura 2.6

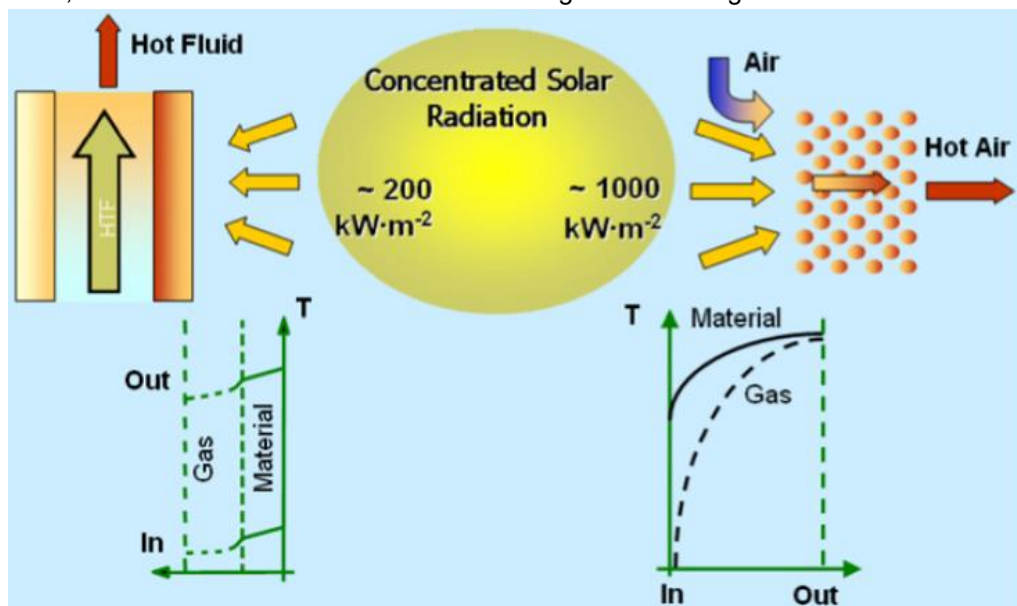


Figura 2.6.- Sistema esquemático entre un receptor tubular (izquierda) y un receptor volumétrico (derecha) (Hoffsmith et al., 1997)

- El calor es transferido al fluido de trabajo sobre la superficie siendo calentada por la radiación incidente

- Por último, “El efecto volumétrico” causa que la temperatura sobre la parte irradiada del receptor sea más baja que la temperatura de salida. (Ávila-Marín et al., 2011)

2.4.2 Transferencia de calor en medios porosos

Para el problema de transferencia de calor en medios porosos, se asume como un problema unidimensional en el cual los cambios solo ocurren en la dirección axial perpendicular a la superficie del absorbedor, donde el fluido (aire) y la propagación de la radiación ocurren a lo largo de esta dirección, como se muestra en la Fig. 2.7, el absorbedor volumétrico está modelado como un medio homogéneo dividido en dos fases, parte sólida (medio poroso) y un fluido (aire) (Quintard et al., 2005)

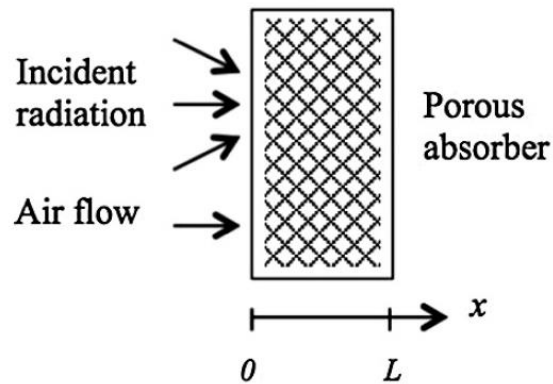


Figura 2.7.- Modelo esquemático de la propagación de la radiación en el medio poroso (Wu et al., 2011).

El modelo es aplicado a estructuras como espumas cerámicas ya que presenta estructuras desordenadas, considerando las fases sólida y del fluido se tienen dos distribuciones de temperaturas $T_s(x)$ y $T_f(x)$ el flujo másico se toma constante en cada sección que cruza, en el medio poroso, por lo que no se considera la ecuación de conservación de masa.

El balance térmico por lo tanto se separa en dos fases, el fluido es completamente transparente para la radiación, para el sólido, el área de conducción es determinada por la porosidad y la interacción con la radiación es incluida como la divergencia del flujo de radiación q_r .

$$\dot{m}C_p \frac{dT_f}{dx} = h_v [T_s(x) - T_f(x)] \quad (3)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico, C_p es el calor específico del aire, $T_s(x)$ y $T_f(x)$ son la temperatura del sólido y del fluido respectivamente y h_v es el coeficiente convectivo. Las propiedades del aire pueden cambiar considerablemente sobre el absorbedor, debido a la gran variación de temperatura.

Para poder resolver este tipo de ecuación se han usado varios métodos analíticos como “Two-flux approximation”, simulaciones en Monte Carlo, “P1 model” (Kribus et al., 2011). En la tabla 2.1 se muestran algunas comparaciones de resultados experimentales en la caracterización de medios porosos.

Tabla 2.1.- Comparación de evaluaciones en medios porosos

Autor	Material del medio poroso	Flujo másico de entrada [kg/s]	Temperatura de salida del fluido [°C]	Temperatura máxima en el receptor [°C]	Eficiencia [%]
Fend et al., 2004	SiC	0.0046	300-350	1000	75-92
Guévole et al., 2016	SiC	0.005	253	573	91
Fend et al., 2004	SSiC	0.0068	570	713	94
Wua et al., 2011	No específica	0.0036	568	No específica	37.8
Kribus et al., 2014	SiC	0.6	573	1261	74.7
Ávila-Marín et al., 2014	Aleación de inconel 601	0.43	260	430	79.8

En el siguiente capítulo se hablara de la campaña experimental realizada para la caracterización del reactor solar termoquímico del IER.

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se hablara de la caracterización térmica del reactor solar, desde sus componentes hasta la campaña experimental realizada para obtener datos de medición de temperaturas y así hacer un estudio calorimétrico del mismo. Se han medido las temperaturas en diferentes zonas del reactor y se han calculado las pérdidas asociadas a cada mecanismo de transferencia de calor. Además se menciona la forma de calcular la eficiencia térmica del reactor respecto a la potencia empleada al mismo desde el Horno Solar (HoSIER).

La campaña experimental para el estudio calorimétrico del reactor fue llevada a cabo en el Horno Solar (HoSIER) ubicado en el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), en el estado de Morelos, México.

3.1 Horno Solar (HoSIER)

El HoSIER (Ver Fig. 3.1) está compuesto por un Heliostato (81 m² de área) con un sistema de seguimiento azimutal y de altura con respecto al sol, un concentrador parabólico (38 m² de área). El horno tiene una configuración óptica en “eje” (es decir, con el punto focal en el mismo eje que une el centro del heliostato con el vértice del concentrador) y, la distancia focal es de 3.68 m. Otro elemento del HoSIER es el atenuador cuya función es controlar la radiación incidente del heliostato al concentrador y que, consta de 45 persianas de lámina de acero inoxidable tensadas verticalmente. También se cuenta con una mesa de trabajo, en el foco del concentrador, con movimientos en los 3 ejes (X, Y y Z), la cual es capaz de soportar una carga de alrededor de 250 kg. (Riveros-Rosas et al., 2010).



Figura 3.1: Heliostato (izquierda), concentrador (derecha) del HoSIER

El sistema de control (Ver Fig.3.2) es el encargado de dirigir los sistemas del HoSIER. Es el que permite que el Heliostato ajuste su posición conforme se mueve el Sol y también de que el atenuador se pueda abrir o cerrar de manera automática, dependiendo de las condiciones requeridas en las pruebas. Permite controlar la mesa de trabajo y el sistema de refrigeración. (Riveros-Rosas et al., 2010)

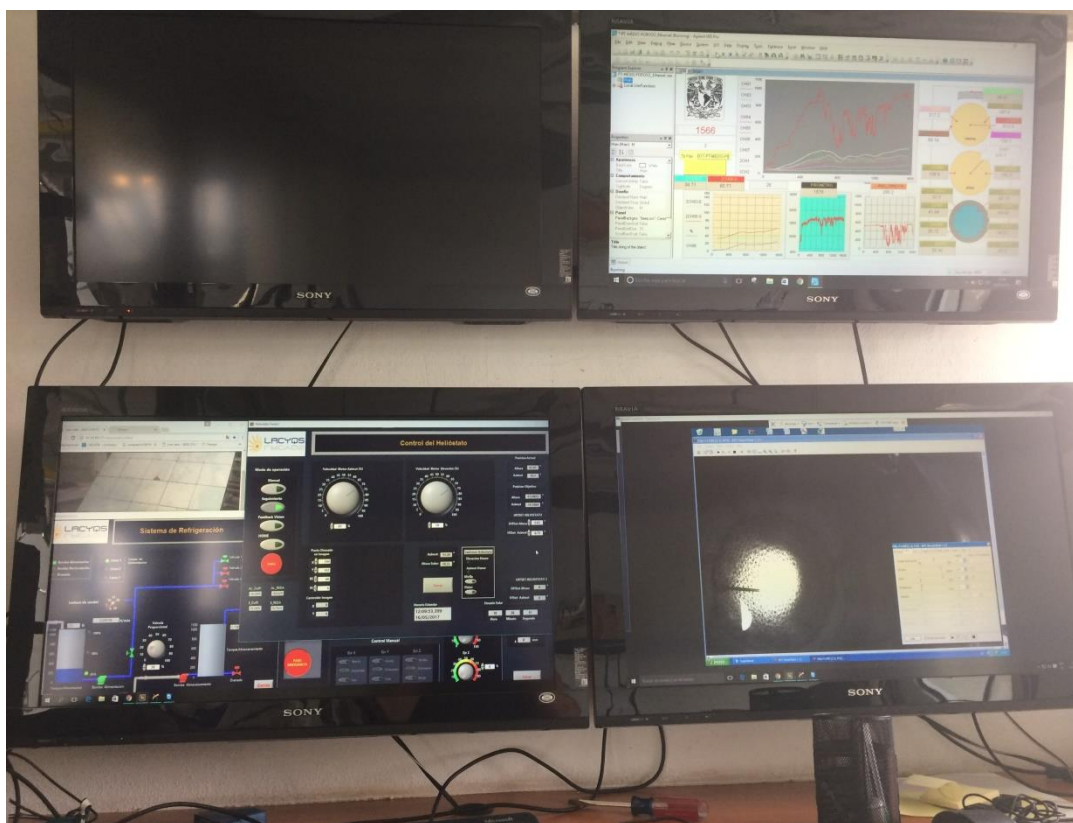


Figura 3.2: Sistema de control del HoSIER

El sistema de control utiliza una computadora y un software que consta de una programación tipo SCADA que muestra los distintos sistemas del HoSIER. SCADA es un acrónimo de “Supervisory Control And Data Acquisition” (control y adquisición de datos con supervisión). Los sistemas SCADA utilizan la computadora y tecnologías de comunicación para automatizar el monitoreo y el control de procesos industriales [Pérez-Encizo et. al.,].

3.2 Reactor solar

La presente campaña experimental se llevó a cabo en un reactor solar previamente desarrollado (Ver Fig. 3.3). En Dicho reactor se pueden realizar estudios de procesos termoquímicos en presencia de radiación solar concentrada para la obtención de combustibles solares. Su potencia de diseño $Q_{0\text{-teórico}}$ es de 10 kW. El reactor solar es un

receptor de cavidad orientado horizontalmente, permitiendo así la entrada de los rayos solares provenientes del concentrador del HoSIER por una de sus caras.



Figura 3.3: Reactor solar

3.2.1 Componentes del reactor

Los principales elementos que componen al reactor son: la parte externa, compuesta por una carcasa de acero inoxidable en la cual se sujetan componentes externos como: soportes, componentes del sistema de enfriamiento y bridas. Por la parte interna contiene aislantes térmicos y el medio poroso que será puesto a prueba en la campaña experimental.

La apertura del reactor consta de tres partes removibles (ver Fig. 3.4), (1) escudo de enfriamiento, (2) brida de la ventana con una ventana de vidrio templado y (3) una brida de entrada de gases. El escudo enfriado tiene por objetivo bloquear la incidencia de

radiación solar en la brida de la ventana, ya que si se produce un calentamiento excesivo de la brida, se generarían tensiones debido a la diferencia de coeficientes de expansión entre el acero de la brida y el vidrio, que pueden llevar a fracturas. La ventana tiene de finalidad permitir la entrada de los rayos provenientes del concentrador solar y cerrar la cavidad del reactor. La brida de entrada gases se encarga de inyectar gas al interior del reactor para generar una mayor área de contacto sólido-gas y al mismo tiempo evitar incrustaciones en la ventana del material reactante.



Figura 3.4: Sistema esquemático de la apertura del reactor solar (1) escudo refrigerado, (2) Brida de la ventana y (3) brida de entrada de gases.

Para suministrar la entrada de gases, al interior del reactor, se hace mediante 6 entradas de gas equidistantes a 60° , haciendo así que el gas (aire) entre en una misma proporción por las 6 entradas y lleguen directo al medio poroso. Mientras que para la parte exterior se distribuyeron 4 entradas a 90° de separación inyectando aire en la parte frontal de la ventana y en la brida de entrada de gases para una mayor refrigeración.

Por otro lado en la parte interna el reactor se encuentra la cavidad cerámica (Ver Fig. 3.5), en donde se llevan a cabo las pruebas experimentales. La cavidad cerámica es un conjunto de moldes de concreto refractario) de la marca Barro Mex¹, compuesto en mayor parte de alúmina (Al_2O_3). Su temperatura máxima de operación es de 1400°C .

¹ Para más información, <https://5122-mx.all.biz/concreto-refractario-convencional-g27754>

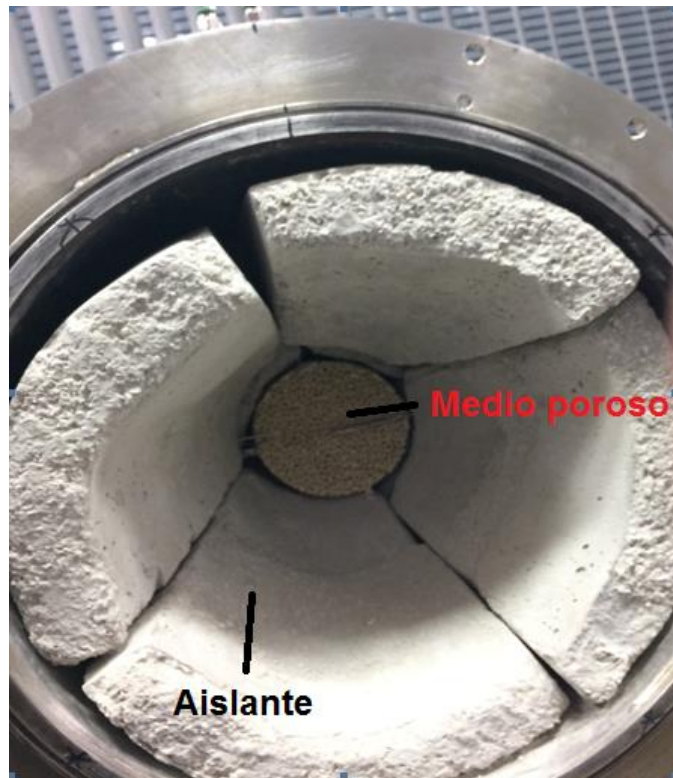


Figura 3.5: Aislante y medio poroso instalados en el interior del reactor

En la parte posterior del reactor se tiene la brida de instrumentación y muestreo (Ver Fig. 3.6), en donde se encuentra la salida de los gases. Esta brida también sirve como salida de los termopares que miden la temperatura en el interior del reactor y en el medio poroso.

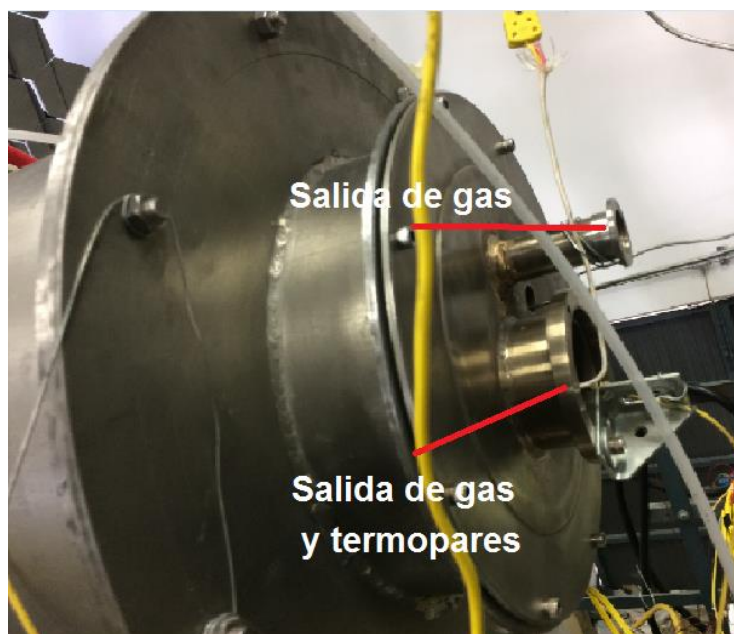


Figura 3.6.- Brida de muestreo del reactor

Tabla 3.1.- Características técnicas del Reactor Solar

Características	
Cuerpo del Reactor	Tubular de acero inoxidable (Di: 69 cm y De: 72 cm)
Escudo refrigerado	Placa de acero inoxidable (0.64 cm de espesor)
Brida de inyección de gases	Brida de acero inoxidable
Ventana	Vidrio templado (D: 40 cm; soporta una diferencia de temperatura de hasta 250°C)
Aislante	Ligas hidráulicas de mediana pureza y 42% de alúmina

3.3 Medio Poroso

Como se había mencionado antes, se realizara un estudio calorimétrico en esta campaña experimental, usando como receptor de la radiación un medio poroso de SiC (Ver Fig. 3.7) como medio absorbedor de la radiación, y se observara su comportamiento térmico a lo

Para distribuir de forma más homogénea la radiación solar concentrada en todo el medio poroso (zona de reacción), está se desplazó del foco 0.05 m, Las características del medio poroso se presentan en la Tabla 3.2.



Figura 3.7: Medio Poroso

Tabla 3.2.- Características técnicas del medio Poroso

Medio Poroso
Cerámica porosa de SiC
Diámetro de 12.5 cm
Porosidad 10 PPI

Espesor 2 cm

3.4 Procedimiento experimental

Durante la campaña experimental se realizaron 5 pruebas en el reactor. El procedimiento experimental fue el mismo para todas las pruebas, excepto, que se varió para cada caso la temperatura objetivo del medio poroso. El caudal de entrada del gas se mantuvo constante para todas las pruebas. (Ver Fig. 3.8)

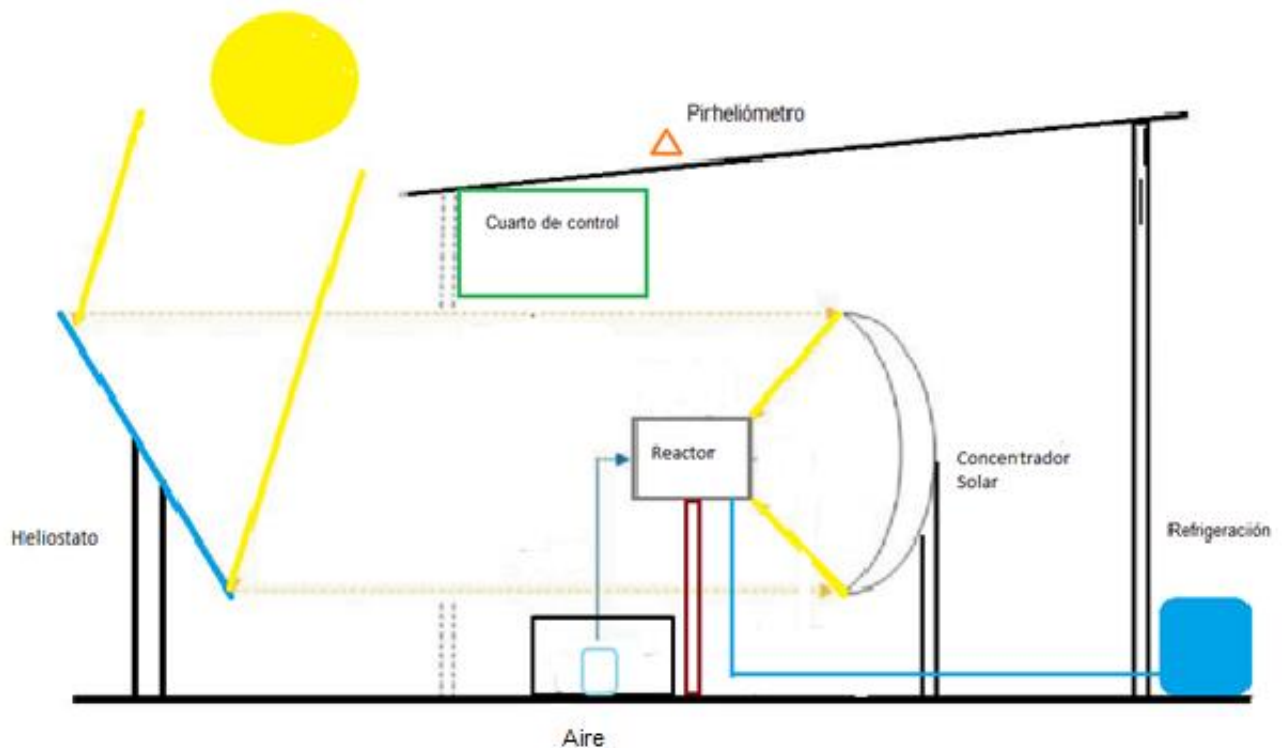


Figura 3.8: Sistema esquemático del HoSIER

Las condiciones experimentales fueron las siguientes: se realizó la experimentación a una hora cercana al medio día solar, con la finalidad de tener variaciones bajas de la radiación solar directa; alcanzar una temperatura objetivo del medio poroso para cada prueba y mantenerla constante para el resto de la misma. El procedimiento experimental, una vez teniendo los equipos en funcionamiento, es el siguiente:

- Encender el SCADA del HoSIER para tener control de los dispositivos (Heliostato, mesa de operación, refrigeración)
- Abrir el atenuador un mínimo ($>5\%$) para poder enfocar la mancha de radiación solar concentrada en el medio poroso. Una vez enfocado, abrir el atenuador poco a poco (en intervalos de 5-10%), hasta alcanzar la temperatura deseada en la superficie a calentar.

- (c) Para la entrada de gas (aire) el caudal fue de tiro forzado de 10 L/min (1 atm, 20 °C). Y para la entrada de agua se fijó un caudal de 2 L/min.
- (d) Mantener una temperatura constante en el medio poroso; considerando que los termopares T_2 y T_3 conserven la misma temperatura durante la prueba.
- (e) Llegar a la temperatura deseada en el medio poroso y mantenerla así durante una hora.
- (f) Una vez transcurrida la duración establecida para él experimento, cerrar el atenuador y esperar a que se estabilice la temperatura en el medio poroso. Ya estabilizada, cerrar el flujo de entrada de gas y de refrigeración y apagar los equipos, dando por concluida la prueba experimental.

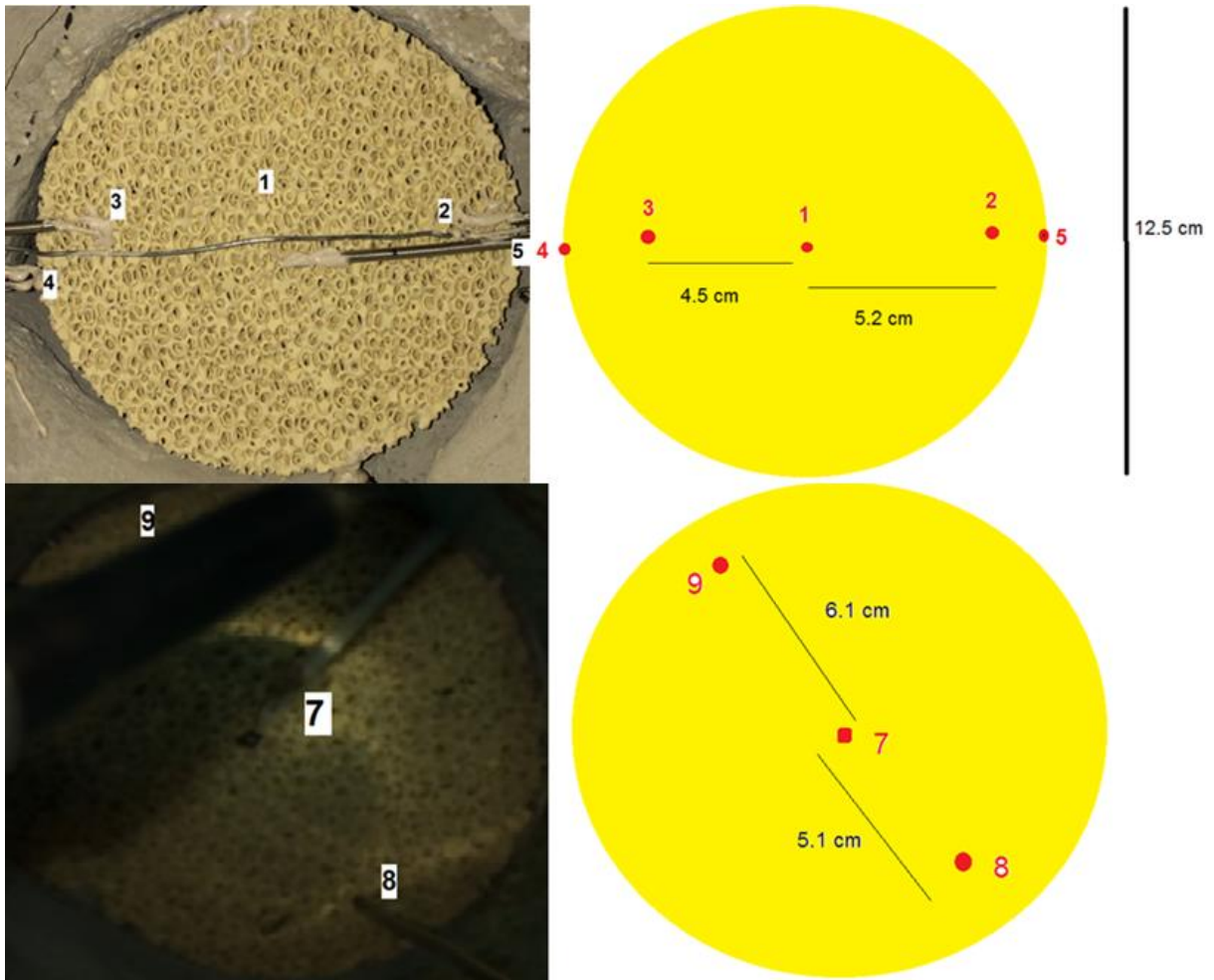


Figura 3.9. Ubicación de los termopares en el medio poroso, parte frontal (imagen de la superior Parte posterior (imagen inferior).

Para las mediciones de temperatura en el medio poroso se siguió la configuración mostrada en la Fig. 3.9. Se usaron termopares tipo K con protección de fibra de vidrio, que tienen un rango de temperatura $-200^{\circ}\text{C} - 1250^{\circ}\text{C}$ con un error de 2.2°C , de la marca

OMEGA². Así mismo se colocó otro termopar en la parte externa del aislante, la cual está en contacto con el cuerpo del reactor.

En la Fig. 3.10 se puede observar el adquisidor de datos, modelo 34970A, de la marca Agilent³. Las características de este equipo se encuentran en la Tabla 3.3.



Figura. 3.10: Adquisidor de datos modelo 34970A (superior), sistema esquemático de la captura de datos (inferior)

Tabla 3.3.- Características del adquisidor de datos

Características	
VARIABLES MEDIBLES	Temperatura, tensión AC/DC, resistencia, frecuencia y corriente
CONECTIVIDAD CON LA PC	Estándar, cuenta con una interface Gigabit LAN y USB 2.0
INTERFAZ GRÁFICA	Facilita el acceso y el control del instrumento utilizando un navegador web con Java
SOFTWARE	BenchLink Data Logger 3

La radiación solar directa se midió utilizando un pirheliómetro (Ver Fig. 3.11) de la marca Eppley Laboratory⁴, que cuenta con su mecanismo de seguimiento solar. En la Tabla 3.4 se mencionan las características del pirheliómetro.

² Para más información, http://www.omega.com/temperature/pdf/XC_K_TC_WIRE.pdf

³ Para más información, http://www.ayscom.com/data_sheets/agilent/adquisicion_de_datos/34970_72a.pdf



Figura. 3.11: Pirheliómetro marca Eppley Laboratory

Tabla 3.3.- Características del pirheliómetro

Características	
Rango espectral	250-3000 [nm]
Campo de visión	5°
Salida	0-10 [mV]
Sensibilidad	Aproximadamente 8 [$\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$]
Tiempo de respuesta	5 [s]
Impedancia	200 [Ω]

3.5 Estudio calorimétrico

El estudio calorimétrico del reactor solar, en ausencia de reacciones químicas, resulta una etapa fundamental previa a la puesta en operación, ya que conocido el comportamiento térmico del reactor es posible optimizar el sistema reactivo (Lanchi et al., 2013) y discriminar la aportación asociada al propio reactor en el proceso térmico (calentamiento/enfriamiento) del sistema completo.

Se requiere determinar las temperaturas máximas de trabajo, el comportamiento transitorio/estacionario intrínseco al reactor y el rendimiento térmico junto con la estimación de los distintos tipos de pérdidas. Para esto se insertó como receptor, en el interior de la cavidad, un material refractario con porosidades geoméricamente definidas pero sin recubrimiento de óxidos metálicos como reactivo. Este material se ubicó de manera que quedar desplazado 5 cm con respecto al foco del reactor, para lograr una distribución de irradiancia más uniforme sobre él. Esto, debido a que la mancha solar

⁴ Para más información, <http://www.eppleylab.com/instrument-list/normal-incidence-pyrheliometer/>

concentrada es más pequeña que el monolito poroso, cuando está en el foco, generando una distribución que no es uniforme sobre la cara frontal del material.

Los principales parámetros usados para evaluar térmicamente el absorbedor volumétrico son la temperatura del fluido (a la salida del absorbedor) y la eficiencia térmica (potencia entregada al reactor). La eficiencia calorimétrica η_{th} se define como el cociente del calor transferido hacia el fluido (Q_f), y la potencia de entrada del HoSIER (Q_{opt}):

$$\eta_{th} = \frac{Q_f}{Q_{opt}} \quad (3.1)$$

La evaluación calorimétrica (Q_f) hacia el fluido se calcula a partir:

$$Q_f = \dot{m}\Delta H \quad (3.2)$$

Donde \dot{m} es el flujo másico y ΔH es el cambio de entalpía del sistema debido a que no es un sistema hermético, para calcular el ΔH [Cengel, 2011]:

$$\Delta H = C_p(T_2 - T_1) \quad (3.4)$$

Donde, T_1 y T_2 son las temperaturas de entrada y salida del fluido y C_p es el calor específico. La potencia incidente entregada por el concentrador del HoSiER es Q_{opt} y se calcula como:

$$Q_{opt} = F_{ate}F_{esc}\rho_T \tau_v G_b A_{conc} \quad (3.5)$$

Siendo F_{ate} es el factor de apertura del atenuador, F_{esc} es el factor de bloqueo, de la radiación solar directa, por parte del escudo de enfriamiento, G_b es la irradiación solar en el momento de la prueba, A_{conc} es el área del concentrador del HoSIER, $\rho_T=0.7$ es la ferectancia combinada del espejo y el concentrador y $\tau_v = 0.85$ es la transmitancia de la ventana. El calor debido a las pérdidas (\dot{Q}_{perd}) convectivas y radiativas, está dado por [Lanchi et al., 2013]:

$$Q_{perd} = Q_{conv} + Q_{emi} \quad (3.6)$$

Donde Q_{conv} es la pérdida de calor por convección:

$$Q_{conv} = h_{conv}(T_w - T_a) \quad (3.7)$$

Siendo T_w la temperatura de la pared del aislante y T_a la temperatura ambiente: Para encontrar h_{conv} se usa una correlación para convección libre aplicada a cilindros horizontales. La correlación de Nusselt implica el efecto del número de Prantl, el número de Grashof::

$$Nu = 0.053(Gr_D Pr)^{0.25} \quad (3.8)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.9)$$

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_w - T_{amb})^{0.25}}{\mu^2} \quad (3.10)$$

Donde ρ es la densidad Gr y Pr son los números de Grashof y de Prantl respectivamente, g la gravedad, β es el coeficiente de expansión volumétrica, ν es la viscosidad cinemática, α es la difusividad térmica, T_w y T_{amb} son las temperaturas de la pared y del ambiente respectivamente. Todas las propiedades del fluido son evaluadas a la temperatura de película T_p , donde $T_p = 0.5(T_w - T_a)$. Por último, el Q_{emi} es el calor emitido por el aislante y se calcula:

$$Q_{emi} = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_{amb}^4) \quad (3.11)$$

Donde ε es la emitancia del reactor, σ la constante de Stephan-Boltzmann ($5.670373 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T_w y T_{amb} son las temperaturas de la pared y del ambiente respectivamente.

4.RESULTADOS

En esta sección se presenta los resultados obtenidos en la campaña experimental realizada del 14 al 18 de Mayo del 2017, para el estudio calorimétrico, basándose en los datos de medición de temperatura, de entrada y salida del aire al medio poroso y de la transferencia de calor hacia el aislante. Así mismo se presentan los gráficos de la evolución de la temperatura con respecto al tiempo, del Reactor y del medio poroso. También se muestra el comportamiento del sistema de enfriamiento de la ventana y de la brida de entrada de gases.

4.1 Estudio calorimétrico

Como se mencionó en el capítulo 3, se realizaron 5 pruebas a diferentes temperatura objetivo en el medio poroso, obteniendo así diferentes resultados en cuanto a la eficiencia y las pérdidas de calor del reactor, así como la potencia incidente por parte del HoSIER. En esto último tuvo mucho que ver el clima para cada día, ya que la medición máxima de radiación solar directa oscilo alrededor de $700 \text{ [W/m}^2\text{]}$, pero variando conforme al tiempo. Así hubo días con muchas nubes, lo cual afectó la intensidad de la radiación solar, de tal manera que era muy grande la diferencia de radiación de un momento a otro.

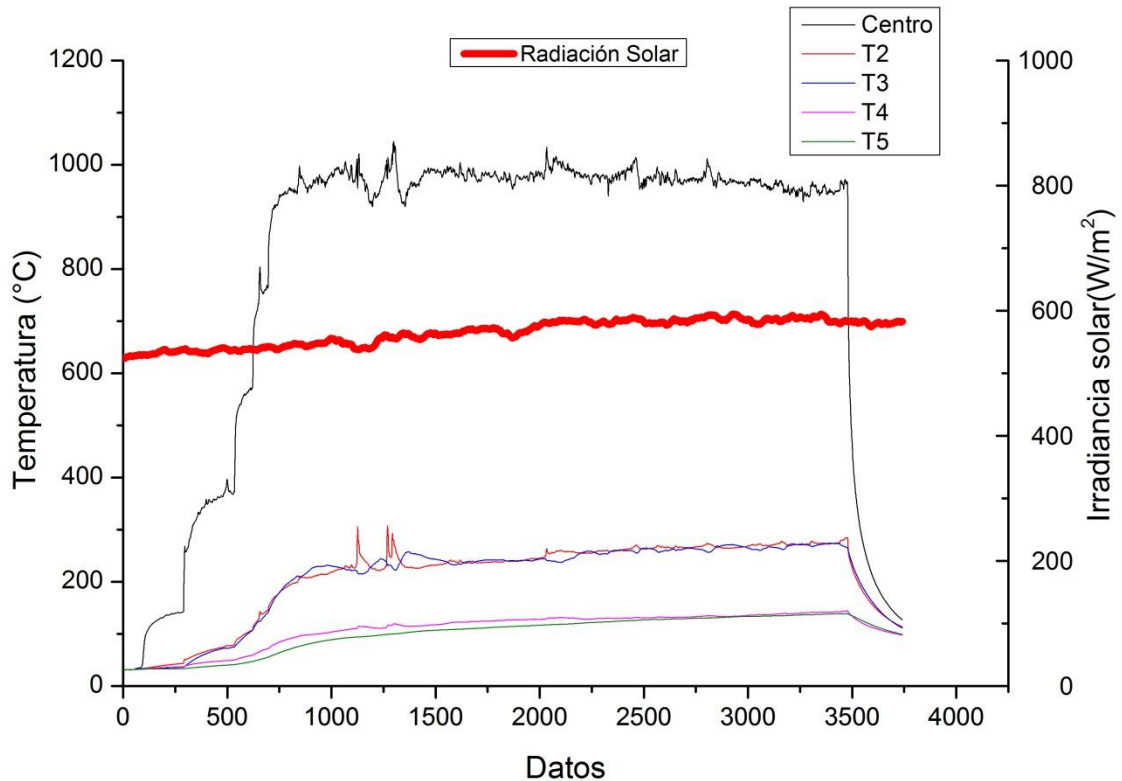
Para cada prueba experimental el propósito era establecer una temperatura objetivo en el medio poroso y mantenerla así por una hora, bservando la evolución de la temperatura de salida del gas y el aislante. La temperatura del aislante es la que nos indica el momento en el que se llega al estado estacionario, o sea cuando la transferencia de calor en la parte exterior del aislante (en contacto con la carcasa del reactor) deja de variar.

El procedimiento fue el mismo para cada una de las pruebas, ir abriendo poco a poco el atenuador hasta llegar a la temperatura desea en el medio poroso. Durante este proceso se usan como referencia las mediciones de los termopares T_2 y T_3 los cuales se encuentran en la periferia del medio poroso (recordar Fig. 3.9 del capítulo 3), los cuales nos dirían si la radiación estuviese más concentrada de un lado u otro del receptor. Se busca, mantener sus temperaturas similares, para así asegurar un flujo radiativo incidente lo más uniforme posible en el medio poroso. Los parámetros de cada prueba se observan en la tabla 4.1 los cuales se tomaron a partir de que el medio poroso llegara a la temperatura deseada para el momento estacionario, los datos para los caudales fueron los mismos para todas las pruebas.

En cada día se tuvieron diferentes radiaciones y temperatura de ambiente, ya que en el mes que se realizaron las pruebas empieza la época de lluvias en la zona. Como consecuencia, se tenían días nubosos con radiación solar intermitente o nula, como es el caso el día 16 de mayo. Se presentaran las gráficas y el análisis para 2 días, el de mejores condiciones y el de las peores condiciones con respecto a la radiación solar directa. Cabe señalar que el flujo de entrada del gas fue de 10 L/min , mientras que el caudal de agua del sistema de enfriamiento se fijó en 2L/min para cada prueba.

Tabla 4.1.- Datos usados en las pruebas experimentales

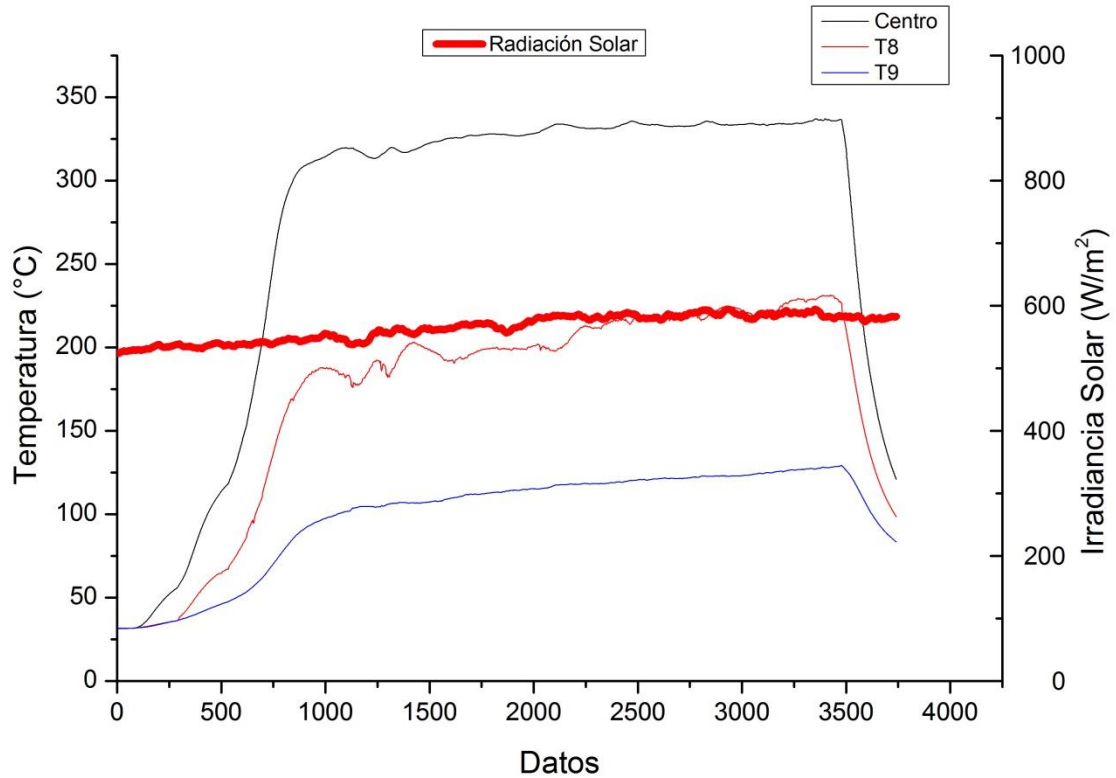
Día de la Prueba	Temperatura objetivo para el medio poroso	Irradiancia solar directa promedio	Apertura del atenuador	Temperatura ambiente promedio
	[°C]	[W/m²]	[%]	[°C]
14 de Mayo	1200	620	50	30.6
15 de Mayo	650	650	30	30.1
16 de Mayo	900	550	35	33.2
17 de Mayo	900	580	25	30
18 de Mayo	1000	560	20	34.5



Gráfica 4.1.- Temperaturas en la parte frontal del medio poroso comparadas con la radiación solar directa para el día 17 de Mayo

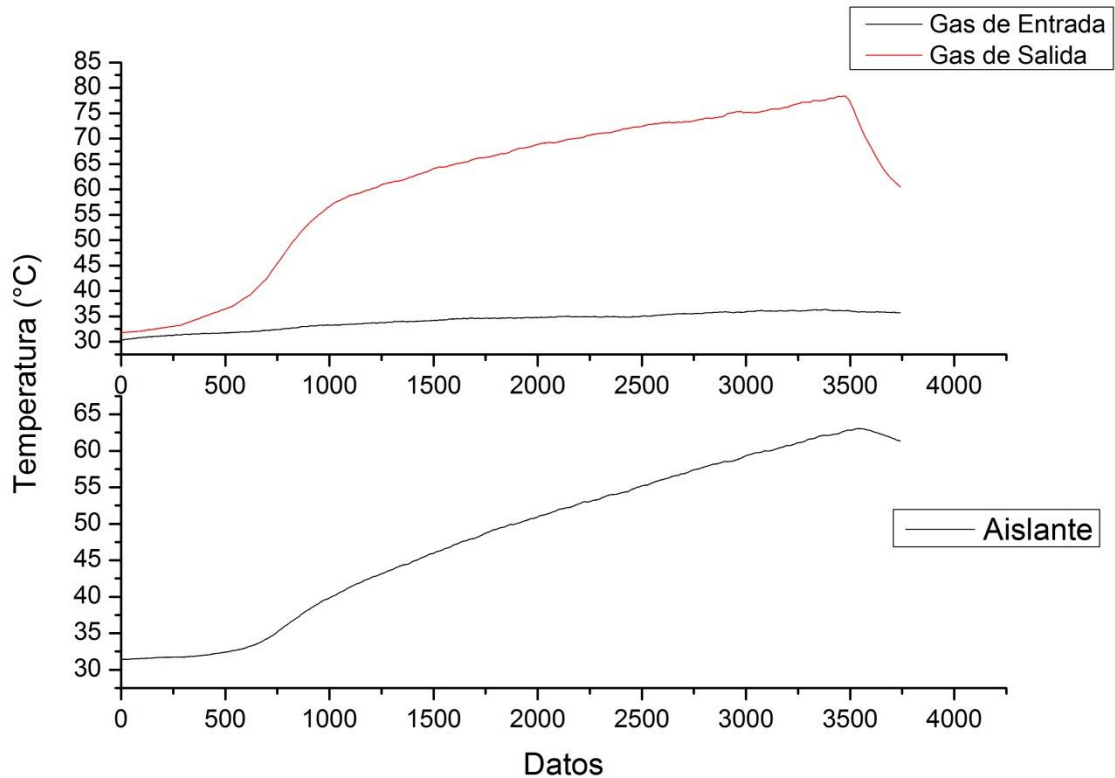
En la gráfica 4.1 se presentan los datos, tomados cada segundo, para el día 17 de mayo. Se puede apreciar que en la mayor parte de datos, la irradiación solar tuvo un comportamiento semiestable, manteniéndose en el rango de 550-600 [W/m²]. A pesar de esto, no se dificultó tener resultados cuasi-estables en el medio poroso y así mantenerlo a 900 °C, ya que la nubosidad no fue importante.

Como se puede observar, el comportamiento promedio de la irradiación solar fue con tendencia creciente, pero muy lenta, por lo que esto no afectó la temperatura en el centro del medio poroso. Dicha temperatura se mantuvo con tendencia semiestable, oscilando en un rango estrecho de 980 °C. Esto ocurrió así; a pesar de la presencia de viento, que como se muestra entre los datos 1000 y 1500, que provocó que el heliostato se moviera y en consecuencia desenfocara la mancha solar en el medio poroso, alterando su temperatura hacia uno de sus lados. Posteriormente reajustando el heliostato en modo de control manual, se logró estabilizar nuevamente la temperatura hasta el final de la prueba. Por otro lado, el comportamiento de las temperaturas en los termopares T₂ y T₃ fue con tendencia creciente. Lo mismo pasó con los termopares T₄ y T₅ que se ubican en las fronteras del medio poroso y hacen contacto con el aislante (recordar la Fig. 3.9 del capítulo 3), muestran un comportamiento con tendencia creciente pero similar entre ambos, lo que indica un calentamiento uniforme en el medio poroso, transfiriendo el calor del centro hacia afuera y por conducción al aislante.



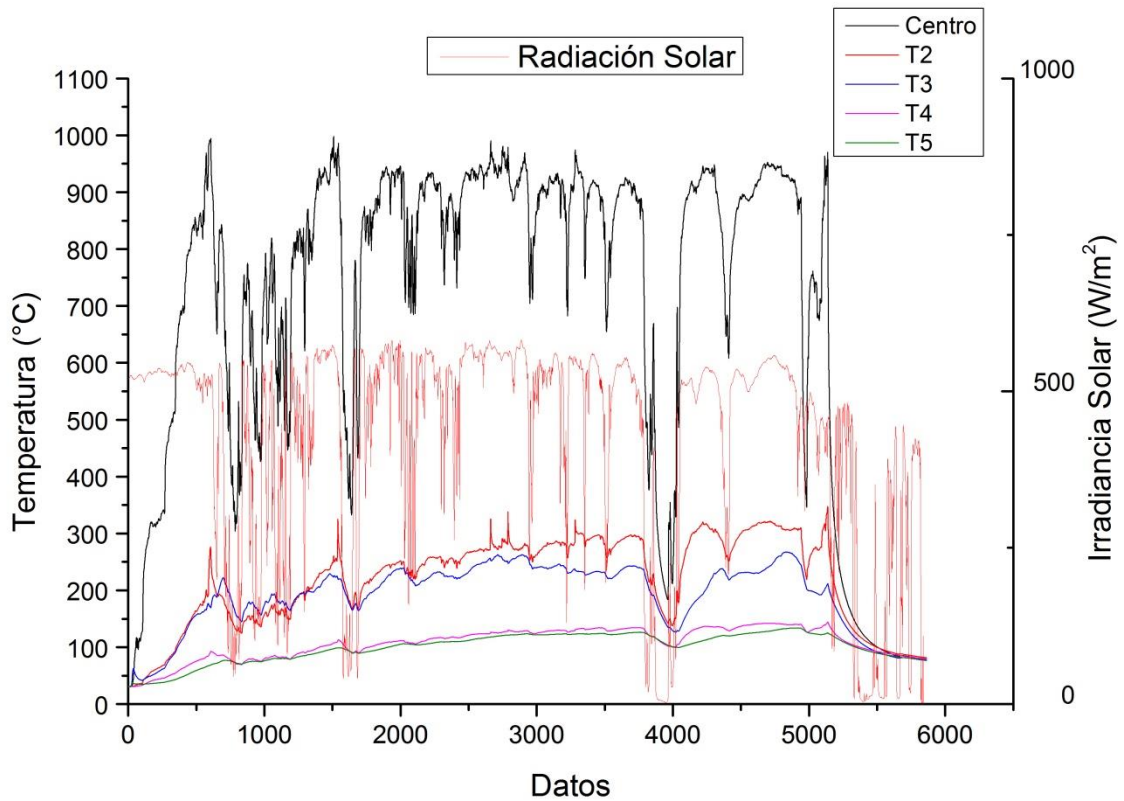
Gráfica 4.2.- Temperaturas en la parte posterior del medio poroso comparadas con la radiación solar directa para el día 17 de Mayo

Para las temperaturas de la parte posterior del medio poroso, los resultados se muestran en la gráfica 4.2. Aquí, también se observa un comportamiento cuasiestable al final de la corrida para el punto central, llegando hasta 350° como máxima temperatura alcanzada. Se observa también el efecto del viento, pero aquí no repercute tanto como en la parte frontal, lo que indica que posiblemente es que esté llegando mucha radiación solar directa concentrada a la parte de atrás del medio poroso. En cuanto a la medición de los termopares T_8 y T_9 que se encuentran separados del punto central del medio poroso, se nota una diferencia de 100°C entre uno y otro, debido a que no estaban simétricamente puestos; no tenían la misma distancia con respecto al punto central del medio poroso, siendo el termopar T_9 el más alejado (recordar Fig. 3.9 del capítulo 3).



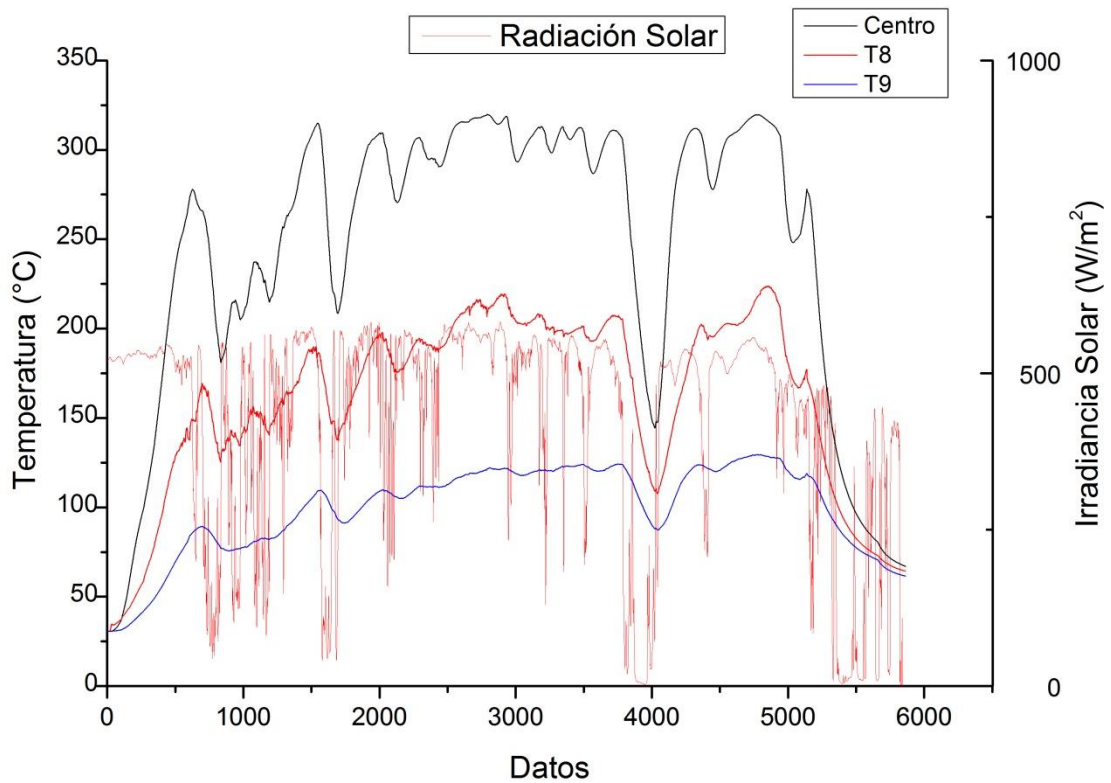
Gráfica 4.3.- Temperaturas de entrada y salida del gas (superior) y temperatura del aislante (inferior) para el día 17 de Mayo

En la gráfica 4.3 se ve el comportamiento de la temperatura de la entrada y salida de los gases, así como la del aislante. Se observa un comportamiento estable en la temperatura de entrada del gas, mientras que para la medición de temperatura de salida, tiende a crecer conforme se calienta el medio poroso pero sin llegar a un estado estacionario. Para el aislante el comportamiento es con tendencia creciente pero también sin llegar a un estado estacionario, a pesar de que fue una prueba de más de 2 horas, no se notaba algún cambio con respecto a la evolución casi lineal de la temperatura del aislante. Esto nos indica que se requiere más tiempo de prueba y también que el aislante sea de un material con una mejor conductividad térmica y en menor proporción de material.



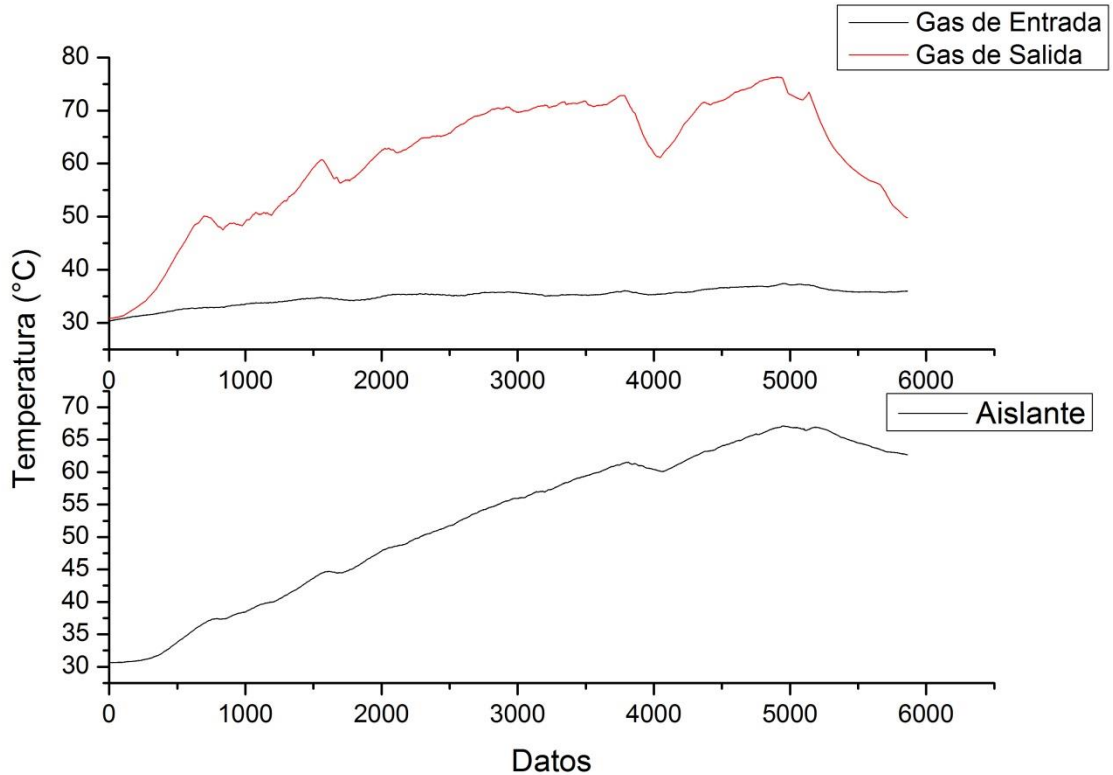
Gráfica 4.4.- Temperaturas en la parte frontal del medio poroso y radiación solar directa para el día 16 de Mayo

En la gráfica 4.7, se muestran los resultados obtenidos el día 16 de mayo. Para este día se tuvieron, las peores condiciones de las 5 pruebas realizadas, debido a la presencia de mayor nubosidad y viento. La irradiancia solar directa fue muy variable, fluctuando a cada momento, debido al paso de nubes. Esto afectó también la concentración solar sobre el medio poroso y por ende su temperatura. Cabe señalar que la temperatura alcanzada para esta prueba, en el centro del medio poroso, fue de 640 °C por unos minutos y después decayó. Lo interesante de esta prueba es observar como depende la temperatura central del medio poroso en gran medida de la radiación solar concentrada viendo un comportamiento similar en las gráficas. Por ejemplo para el dato 4000 se ve como la irradiancia llega a un valor cercano a cero y la temperatura en el centro del medio poroso tiene su lectura más baja (79.04 °C). Para el caso de los termopares T_2 y T_3 , este tipo de variaciones, debidas a los cambios bruscos de radiación solar; también se notan pero en menor medida que para el caso del termopar del centro. Esto se debe a que, la zona del centro es la parte más caliente, y por ende el decaimiento de la temperatura seria mayor que en la periferia del medio poroso.



Gráfica 4.5.- Temperaturas en la parte posterior del medio poroso y radiación solar directa para el día 16 de Mayo

En cuanto al comportamiento de la parte posterior del medio poroso, gráfica 4.5, también se ven afectadas las temperaturas por la radiación directa inestable. Se puede notar la influencia que ejerce la radiación solar en la parte posterior; lo que nos indica que hay más transferencia de calor, por conducción, de la parte frontal a la posterior que del mismo gas hacia el medio poroso. Debido al comportamiento inestable de la irradiancia solar, de subidas y bajadas de repentinas, complica en gran medida en tener un comportamiento pseudoestacionario y así mismo, la transferencia de calor por conducción a través del medio poroso es variable a lo largo de la prueba.

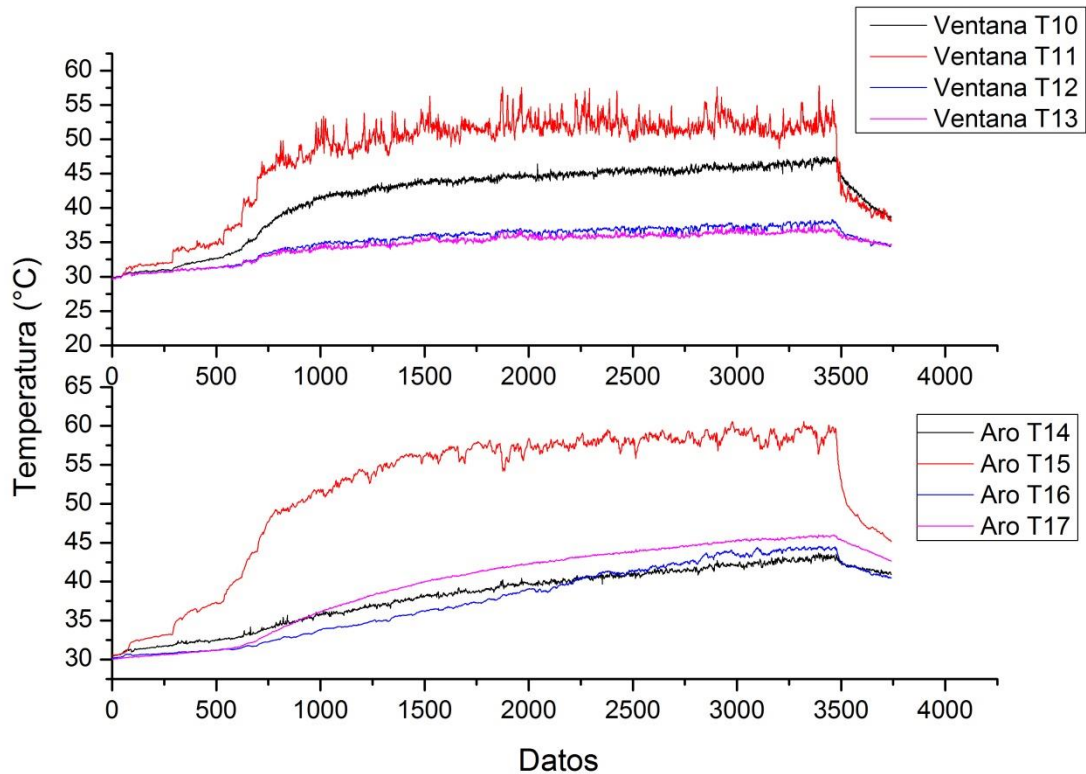


Gráfica 4.6.- Temperaturas de entrada y salida del gas (superior) y temperatura del aislante (inferior) para el día 16 de Mayo

En la Fig. 4.6 se observa el comportamiento de las temperaturas de salida de los gases y del aislante. Para la salida de gases, se ve como varía con tendencia creciente, a pesar de algunos bajones de irradiancia solar, llegando hasta un estado semi-estable entre los datos 3000 y 4000. En cuanto al aislante, no muestra mucha diferencia a las pruebas anteriores. Continúa con una tendencia creciente, aunque hay dos puntos donde decae. Crece con tendencia lenta, debido a la poca irradiancia concentrada, como consecuencia, es menor el calor transferido por el medio poroso.

4.2 Sistema de Enfriamiento

En la Gráfica 4.7, se muestran las temperaturas de la refrigeración del escudo de la ventana y del aro de entrada de gases y su comportamiento para el día 17 de mayo. Cabe señalar que se tuvo el mismo comportamiento en las demás pruebas, nunca se alcanzaron temperaturas superiores 100 °C ni en la ventana, ni en la brida de entrada de gases.



Gráfica 4.7.- Temperaturas de parte refrigerada ventana y brida de entrada de gases

Para la ventana se observa que no se llegó a 100 °C lo cual es bueno ya que si se sobrepasa esta marca podría haber problemas de fracturas por choques térmicos. Lo curioso es que los valores más altos de temperatura se registraron en los termopares T_{10} y T_{14} , los cuales se ubicaron en la parte superior derecha para ambos casos (ventana y brida) lo que nos indica una tendencia de transferencia de calor más elevada en esa zona. Esto podría, ser debido a que no estaba centrada correctamente la mancha solar. Pasó algo similar en el medio poroso. A pesar de estos inconvenientes, la refrigeración por agua en la parte interior del escudo refrigerado y el enfriamiento por inyección de aire externamente, fueron exitosas, ya que no hubo ventanas rotas en esta campaña a diferencia de la campaña preliminar, realizada en el 2016.

4.3 Eficiencia del reactor

Una vez obtenidos los datos de las pruebas experimentales, se puede calcular la eficiencia del reactor solar, conociendo la potencia entregada al fluido, por el medio poroso, entre la potencia incidente al reactor. En la tabla 4.2 se exponen los datos experimentales obtenidos con base a las ecuaciones mostradas en el capítulo anterior.

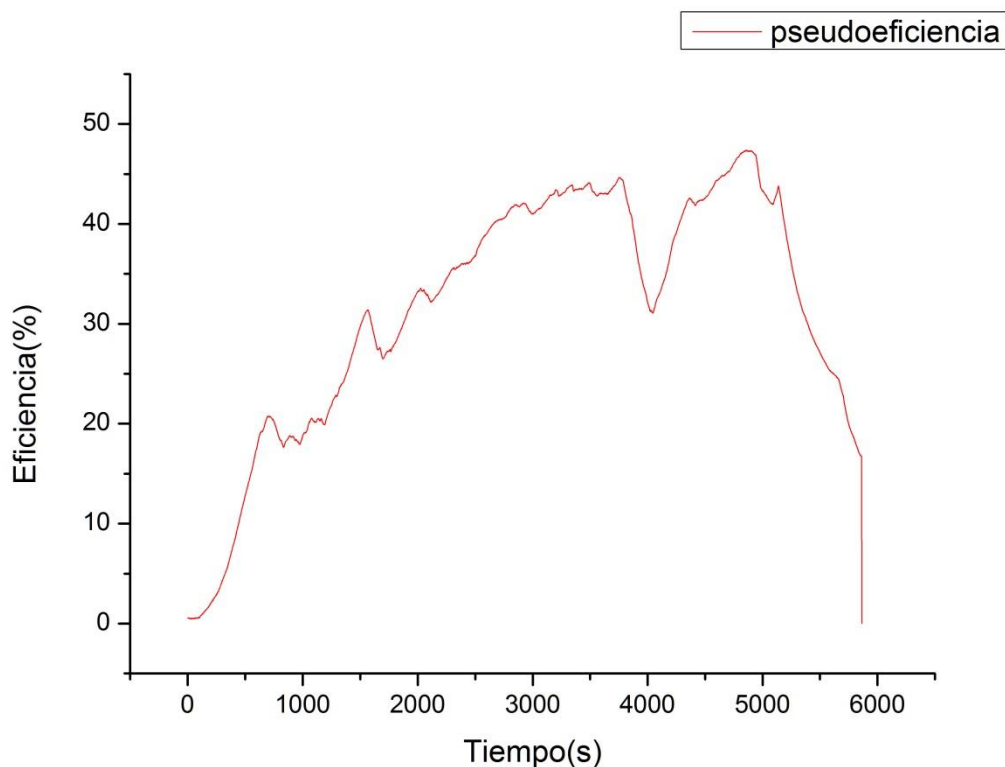
Tabla 4.2.- Datos obtenidos de las pruebas experimentales

Día de Prueba	Temperatura promedio central del medio poroso [°C]	Q_f [kW]	Q_{opt} [kW]	Q_{conv} [kW]	Q_{emi} [kW]	Q_{perd} [kW]	η_{th} [%]
14 de Mayo	1129.9	0.00421	4.95	3.3	1.05	4.35	0.1
15 de Mayo	712.8	0.0091	3.10	1.9	0.26	2.16	0.29
16 de Mayo	691.6	0.00149	1.6	3.08	0.58	3.66	0.098
17 de Mayo	796.5	0.0158	2.53	2.81	0.54	3.36	0.59
18 de Mayo	770.7	0.0157	2.47	3.5	0.88	4.38	0.54

En la tabla 4.2 se muestran los valores obtenidos para las 5 pruebas, mostrando al final la eficiencia de cada una de ellas. La eficiencia del 17 de mayo es la más alta (0.59), recordando que se mantuvo el medio poroso a 900 °C para esa prueba. Por el otro lado, la menor eficiencia fue para el día 16 de mayo, era de suponerse, debido a las condiciones climatológicas presentes en ese día, que afectaron la radiación directa y por ende el estado semi-estable no se presentó. Aunque cabe resaltar el calor perdido se presentó en los días 14 y 18 de mayo, en los cuales, la temperatura objetivo del medio poroso, sobrepasaba los 1000 °C..

En todos los resultados anteriores es importante resaltar que para las pruebas no se llegó al nunca estado estacionario en el aislante, debido a la gran inercia térmica de este componente. Por lo tanto los resultados de eficiencia no son indicativos del

desempeño del reactor, ya que parte importante del calor durante la duración completa de los experimentos estaba siendo invertida en el calentamiento del sistema. Esto explica en parte por qué los resultados de la eficiencia son extremadamente bajos, en comparación con los obtenidos por otros autores (Tabla 2.1). De hecho, al prestar atención a la temperatura del fluido nos damos cuenta que nunca se acercó al estado estacionario, lo cual sugiere que tampoco el medio poroso se encontraba totalmente estabilizado todavía. Como resultado de esto, la eficiencia calculada a partir del calor transferido al fluido no es una constante (Ver gráfica 4.8).



Gráfica 4.8.- Eficiencia contra tiempo

En la gráfica 4.8 se puede observar la eficiencia con respecto al tiempo. Se aprecia que la eficiencia tiende a crecer conforme pasa el tiempo, a medida que aumenta la temperatura del gas a la salida. Por lo tanto la eficiencia que se está evaluando es una pseudo-eficiencia transitoria. Que no es realmente representativa del reactor.

Sin embargo, al usar el reactor para experimentos químicos, no operará en estado estable, debido a su inercia. Por eso los resultados anteriores sirven de guía para saber que esperar del sistema en operación real, aunque no se haya logrado evaluar realmente su eficiencia.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo la instrumentación y la caracterización de un reactor solar termoquímico, cuyo objetivo es el estudio de los ciclos termoquímicos de reducción-oxidación de óxidos metálicos. Dichos procesos termoquímicos se pueden aplicar para la producción de hidrógeno. El reactor solar consiste en una cavidad, donde se encuentra un medio poroso de SiC, que funcionó como absorbedor volumétrico de la radiación solar.

Se realizó un estudio calorimétrico en el medio poroso para evaluar la eficiencia aparente del reactor, comparando el calor transferido al aire que circula a través del medio poroso con la potencia entregada por el HoSIER.

De acuerdo a lo observado en las pruebas térmicas, el diseño del reactor permite emplear diferentes condiciones de operación, ya que se pudo trabajar con temperaturas desde 560 a 1200°C sin que el reactor sufriera ninguna afectación. Esto indica que el reactor podrá eventualmente ser aplicado para estudiar una variedad de reacciones químicas de interés. En el presente trabajo solo se realizaron pruebas térmicas, no reacciones químicas, ya que el interés era la caracterización térmica solamente. En ellas se obtuvo una eficiencia térmica, para el mejor día, del 36 %. Es importante aclarar que nunca se pudo llegar a un estado estacionario del reactor, debido a la gran inercia térmica del material aislante, aunque si se lograron temperaturas aproximadamente estables en el medio poroso. Por lo anterior, las eficiencias evaluadas son solo aparentes, basadas en el calentamiento del fluido, el cual tampoco se estabilizó.

Es importante resaltar que aunque no se tuvieron las mejores condiciones climáticas, las temperaturas en los dos puntos de referencia del medio poroso, se emparejan rápidamente, en alrededor de 5 minutos, cada vez que cambia la irradiancia solar. Esto es alentador en cuanto a la operación futura del reactor, dado que al tratarse de un medio cerámico es un tiempo relativamente rápido, En cuanto al diseño del reactor, se pueden mejorar varios aspectos.

- El más importante, contar con una cavidad que cierre herméticamente al reactor, que cuente con las medidas correctas, porque el aislante que se usó tenía aberturas afectando, sobre todo, a la distribución de entrada de aire hacia el medio poroso, y también cambiar el material del aislante por algo como el SiC ya que este soporta hasta 2000° c y es perfecto para pruebas de reducción que se puedan realizar en el futuro, Se de estudiar la posibilidad de reducir el volumen del material aislante para tener una menor inercia térmica.
- En cuanto al enfriamiento a la ventana, el sistema de inyección externa de aire, tanto en la parte frontal de la ventana como a la brida de entrada de gases, fue un éxito porque se consiguió mantener la temperatura en la ventana por abajo de 100°C sin importar si la temperatura del medio poroso estuviera a 1200°C, Con esto se evitó la ruptura de la ventana debido a estrés térmico, Lo que había sido un problema recurrente en las pruebas preliminares del reactor llevadas a cabo en 2016

Por último, como un trabajo a futuro, se podría verificar los experimentos con pruebas más prolongadas y con condiciones más favorables. Como recomendación se pueden realizar pruebas en los meses de diciembre y enero lo cuales presentan mejores condiciones climatológicas.

6 REFERENCIAS

Abanades S, Charvin P, Flamant G, Neveu P. "Screening of water-splitting thermochemical cycles potentially attractive for hydrogen production by concentrated solar energy". *Energy*. 31 (2006):2805-22.

Avila-Marin A.L. Alvarez-Lara M., Fernandez-Reche J.. "Experimental results of gradual porosity wire mesh absorber for volumetric receivers". *Energy Procedia* 49 (2014) 275 – 283

Bertocchi R. , Karni J. , Kribus A. , "Experimental evaluation of a non-isothermal high temperature solar particle receiver", *Energy*. 29 (2004) 687-700.

Duffie, J. A. & Beckman, W. A., "Solar engineering of thermal processes", John Wiley & Sons, (2013)

Cengel Y., Ghajar A., "Transferencia de calor y Masa", McGraHill, Cuarta edición, 2011.

Fend T., Hoffschmidt B., Pitz-Paal R., Reutter O., Rietbrock P., "Porous materials as open volumetric solar receivers: Experimental determination of thermophysical and heat transfer properties". *Energy* 29 (2004), 823-833

Fend T., Hoffschmidt B., Pitz-Paal R., Reutter O., Rietbrock P., "Two novel high-porosity materials as volumetric receivers for concentrated solar radiation". *Solar Energy Materials & Solar Cells* 84 (2004) 291-304

Funk JE. "Thermochemical hydrogen production: past and present". *Int J Hydrogen Energy*. (2001) 26, 185-90.

Guévole S., Rousseau B., Domingues G., Vicente J. Caliot C., "Representative elementary volumes required to characterize the normal spectral emittance of silicon carbide foams used as volumetric solar absorbers", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 93 (2016) 118–129

Gokon N., Hasegawa T., Takahashi S., Kodama T., "Thermochemical two-step watersplitting for hydrogen production using Fe-YSZ particles and a ceramic foam device", *Energy*. 33 (2008) 1407-16.

Hirsch D. "Hydrogen production by the solar thermal decomposition of natural gas using vortex-flow solar reactor", doctoral thesis, 2003, ETH Zurich, Diss, 15212. <http://ecollection.ethbib.eth-z.ch/view/etch:26828>.

Hruby J.M., "A technical feasibility study of a solid particle solar central receiver for high temperature applications", SAND-86-8211 (1986).

Kogan A., Kogan M., Barak S., "Production of hydrogen and carbon by solar thermal methane splitting. III. Fluidization, entrainment and seeding powder particles into a volumetric solar receiver", *Int J Hydrogen Energy*. 30 (2005) 35-43.

Kodama T. "High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels". *Prog Energy Combust Sci*. 29 (2003). 567-97.

Kribus A., Grijnevicha MM., Graya Y., Caliotb C.. "Parametric study of volumetric absorber performance". *Energy Procedia* 49 (2014) 408 – 417

Lanchi M, Varsano F, Brunetti B, Murmura MA, Annesini MC, Turchetti L, Grena R. "Thermal characterization of a cavity receiver for hydrogen production by thermochemical cycles operating at moderate temperatures". *Solar Energy*, 92(2013) 256-68.

Levitan R., Rosin H., Levy M., "Chemical reactions in a solar furnace- Direct heating of the reactor in a tubular receiver", *Solar Energy*. 42 (1989) 267-72.

Palero S., "Estudio Teórico-Experimental de la Transferencia de Calor en Absorbedores Solares Volumétricos: Estados Críticos", (2008).

Perkins C, Weimer AW. "Likely near-term solar-thermal water splitting technologies". *Int J Hydrogen Energy*. 29 (2004) :1587-99

Pérez-Encizo RA, Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER, Tesis de Doctorado, UNAM, Temixco. Morelos, México (2015)

Steinfeld A., "Solar thermochemical production of hydrogen—a review", *Solar Energy*. 78 (2005) 603-615.

Steinfeld A, Palumbo R. "Solar thermochemical process technology". *Encyclopedia of Physical Science & Technology*, Academic Press. 15(2001) 237-56.

Villafan-Vidales HI., Stéphane Abanades, Cyril Caliot, H. Romero-Paredes," Heat transfer simulation in a thermochemical solar reactor based on a volumetric porous receiver", *Thermal Engineering*, Volume 31, Issue 16, November 2011, 3377-3386.

Villafan-Vidales HI.. . Arancibia-Bulnes CA, Riveros-Rosas D, Romero-Paredes H, Estrada CA. "An overview of the solar thermochemical processes for hydrogen and syngas production: Reactors, and facilities", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 75, (2017), 894-908.

Tamme R., Buck R., Epstien M, "Solar Upgrading of Fuels for Generation of Electricity, *Journal Solar Energy Engineering*". 163 (2001),160-63.

Wua Z., Caliot C., Flamant G., Wang Z.. "Coupled radiation and flow modeling in ceramic foam volumetric solar air receivers". *Solar Energy* 85 (2011) 2374–2385