



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

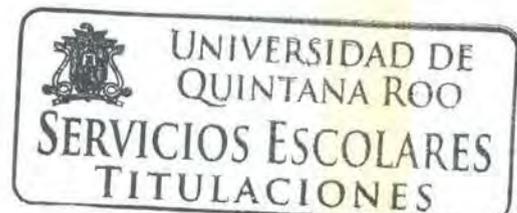
HORNO SOLAR DE ALTO FLUJO RADIATIVO

TRABAJO MONOGRÁFICO
Para obtener el grado de

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

PRESENTA
JOSÉ LUIS GORDILLO REYES

ASESORES
DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR
DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA
DR. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA





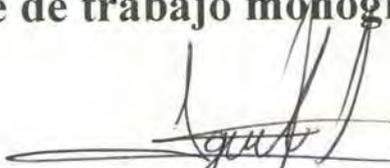
UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Trabajo monográfico bajo la supervisión del comité del programa de licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

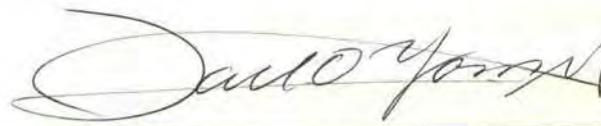
Comité de trabajo monográfico

Asesor:



DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR

Asesor:



DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA

Asesor:



DR. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA



AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto de Energía Renovable por haberme permitido realizar la estancia profesional en sus instalaciones, así como brindarme la información necesaria para realizar este trabajo monográfico.

A la Dr. Heidi Isabel Villafán Vidales, al Dr. Claudio A. Estrada Gasca, al Dr. Carlos A. Pérez Rábago y al Ing. J. de Jesús Quiñones Aguilar, por compartir su tiempo, experiencia y documentación para que el presente trabajo se realizara con la información más actualizada y de manera comprensible para los estudiantes de Licenciatura.

A mis asesores de la presente monografía, Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar, Dr. Joel Omar Yam Gamboa y Fernando Enrique Flores Murrieta por dedicarme su tiempo y conocimientos con la finalidad de concluir integralmente este trabajo de titulación.

Tabla de contenido

Índice de ilustraciones.....	2
Índice de tablas	2
Resumen	3
1. Introducción.....	4
Objetivos generales	5
Objetivos particulares.....	5
Justificación	5
2. Concentración Solar	6
Tipos de concentradores solares	6
Perspectivas de la concentración solar en Hornos Solares	10
Características del HSAFR.	11
3. Sistemas que componen el Horno solar de Alto Flujo Radiativo.....	12
SISTEMAS PRINCIPALES.....	12
Heliostato.....	12
Concentrador.....	12
Sistemas secundarios o periféricos	18
Atenuador	18
Mesa de experimentación.	20
Sistema de refrigeración.	21
4. Experimentos realizados	23
Síntesis de óxidos de tungsteno (VI) por medio de concentración solar	23
Fundición de Placa de Acero (1500°C)	25
Síntesis de óxido de tungsteno (WO ₃) por medio de concentración.	26
Conclusiones.....	27
Trabajos citados.....	28

Índice de ilustraciones

Ilustración 1; Diagrama cilindro parabólico [18]	6
Ilustración 2; Diagrama Fresnel lineal [25]	7
Ilustración 3; DIAGRAMA DEL DISCO PARABÓLICO [19]	7
Ilustración 4; Receptor central [20]	8
Ilustración 5; Este imagen representa el método de concentración que utiliza el HSAFR [4]	11
Ilustración 6; Esquema de las partes de un heliostato [5]	12
Ilustración 7; Distribución de espejos del heliostato [5]	13
Ilustración 8; Armadura del heliostato [5]	13
Ilustración 9; Brazo derecho de heliostato [6]	14
Ilustración 10; Cabezal del heliostato [6]	14
Ilustración 11; Pedestal del heliostato [6]	14
Ilustración 12; Concentrador del IER [6]	15
Ilustración 13; Distribución de facetas, distancia focal y diseño final del concentrador del HSAFR [6]	15
Ilustración 14; Facetas de primera superficie. [24]	16
Ilustración 15; Traslaciones de la montura. [9]	16
Ilustración 16; Malla, costa de una parte fija (en medio) y dos partes soldadas a un ángulo definido dependiendo del renglón del concentrador. [9]	17
Ilustración 17; Posición espacial de los espejos y ensamble sobre la malla [9]	17
Ilustración 18; Estructura Principal [9]	17
Ilustración 19; Atenuador del HSAFR	18
Ilustración 20; Atenuador en con diferentes porcentajes de abertura [11]	19
Ilustración 21; Mesa de experimentación. [8]	20
Ilustración 22; Mesa de experimentación con el HSAFR en funcionamiento. [8]	20
Ilustración 23; Forma de la radiación solar concentrada en la zona focal. [8]	20
Ilustración 24; Diagrama de flujo de proceso HSAFR.	22
Ilustración 25; Dispositivo experimental. [12]	23
Ilustración 26; Distribución de termopares. [12]	23
Ilustración 27; Reactor en funcionamiento. [12]	24
Ilustración 28; Esquema del dispositivo experimental al finalizar la prueba. [12] ¡Error! Marcador no definido.	
Ilustración 29; Difracción de rayos X de la muestra obtenida en el cuerpo de la CIEViP. [12] ¡Error! Marcador no definido.	
Ilustración 30; Placa de acero al carbón fundida a 1406°C en un tiempo de 525 segundos. [13]	25
Ilustración 31; Formación de cristales en las barras de W [23]	26
Ilustración 32; Cristales de WO3 [23]	26

Índice de tablas

Tabla 1: RANGOS DEL CILINDRO PARABÓLICO [4]	6
Tabla 2; RANGOS FRESNEL LINEAL [4]	7
Tabla 3; RANGOS DEL DISCO PARABÓLICO [3]	7
Tabla 4; RANGOS DEL R.C [4]	8
Tabla 5; DETERMINACIÓN DE CALOR NECESARIO REMOVIDO EN RECEPTOR DEL HSAFR.	21

Resumen

En la presente monografía se presentan los métodos más utilizados para realizar la concentración solar, así como diagramas que muestren los componentes estructurales de dichos mecanismos. Se exponen tablas de los rangos térmicos, eficiencias de cada sistema, además de las ventajas y desventajas de los métodos de concentración solar.

Se muestran las características climatológicas que reúne el Instituto de Energía Renovable en la ciudad de Temixco Morelos para sustentar la viabilidad de un proyecto de las magnitudes del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR).

Se exponen diagramas del funcionamiento de un horno solar. Se muestran ejemplos de algunas plantas de generación eléctrica por medio de sistemas de concentración similares a los que utiliza el (HSAFR).

Se muestran los sistemas principales y secundarios que componen el HSAFR, así como el funcionamiento y partes que conforman dichos sistemas.

Se presentan algunos experimentos realizados en el Instituto de Energía Renovable y los resultados o avances generados de estas prácticas en el HSAFR.

1. Introducción

En la última década, la importancia de las energías renovables (ER) ha tomado gran fuerza a causa de la reducción de las reservas de hidrocarburos, a tal grado que la reforma energética incluyó un apartado dedicado a éstas. Sin embargo, es necesario masificar el uso de las ER en el país, con el objetivo de reducir las descargas de CO₂, producto de la combustión de hidrocarburos, a la atmósfera. Para reducir este problema, las ER juegan un papel fundamental para la generación de energía eléctrica. La tecnología fotovoltaica, eólica, las celdas de combustible, biomasa y la foto-térmica son algunas de las fuentes renovables para obtener energía eléctrica limpia y sustentable.

Los sistemas de energía solar fotovoltaica (SF) y de generador eólico (GE) son los más ampliamente utilizados en los últimos años por ser tecnologías en desarrollo continuo, maduras, rentables y confiables. Se pueden utilizar como sistemas autónomos o interconectados a la red eléctrica, o en combinación con otras fuentes de energía para formar sistemas de potencia híbridos. Estos sistemas se utilizan en mayor medida, para generación de energía eléctrica a pequeña escala (autoconsumo). Si se requiere producción a gran escala, se utilizan granjas eólicas como la Venta I y II ubicadas en el Istmo de Tehuantepec.

Otra tecnología para la generación de energía eléctrica a gran escala (10-60 MW) son las plantas termosolares, que pueden utilizar colectores concentradores de canal parabólico, discos parabólicos con motor que funciona con ciclo Stirling o Torre central.

Debido a la viabilidad para la generación de energética a través de algún método de concentración solar, en algunas partes del mundo se han creado plantas termosolares por ejemplo; en los 60's se fabricó en Odeillo, Francia, un horno solar que aprovecha la fachada de un edificio formando un espejo parabólico para concentrar los rayos solares en una construcción cercana; en el foco de este espejo se alcanzaron temperaturas de 4000 °C.

En Barstow California, está localizada la planta termoeléctrica de 10 MWe "Solar Two", produce electricidad con una torre central que utiliza un sistema de sal fundida con suficiente capacidad de almacenamiento térmico para que la turbina opere tres horas después de que se oculta el Sol.

En Almería, España, cuatro helióstatos dispuestos en dos niveles enfocan la energía a un concentrador, el cual concentra la energía radiante en su zona focal alcanzando 300 kW/m² y una potencia de 58 kW de potencia eléctrica [1]

Además de que los sistemas de concentración solar se pueden aplicar en la generación de energía eléctrica, también se les pueden dar otras aplicaciones, como en hornos solares. Estos sistemas utilizan la concentración solar para alcanzar temperaturas desde los 130 a los 3600 C°, las cuales se pueden utilizar para generar energía eléctrica, como en el caso de la planta de Almería España, para procesos de fundición de materiales, generación de combustibles o bien para procesos térmicos específicos.

Por lo anteriormente expresado, es importante conocer el funcionamiento de un horno solar, su principio de funcionamiento, construcción y evaluación térmica. Por tanto, a continuación se presenta el desarrollo de un Horno Solar de Alto Flujo Radiativo, diseñado y construido en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM en Temixco, Morelos México.

Objetivos generales

Describir el funcionamiento y partes componentes del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del Instituto de Energías Renovables con el objetivo de mostrar sus principales usos y alcances en la concentración solar.

Objetivos particulares

- Describir los tipos de dispositivos de concentración solar
- Proporcionar información de consulta para este tipo de tecnologías.
- Describir los elementos componente de un HSAFR y la importancia de éstos
- Describir las pruebas preliminares de funcionamiento

Justificación

En la actualidad es de capital importancia la implementación de métodos sustentables para la obtención de energía. La demanda energética en los tiempos actuales es excesiva y de continuar con los procedimientos hasta hoy utilizados estaremos condenando a las generaciones futuras a vivir en un planeta carente de recursos naturales y de poca calidad sanitaria.

Es por esto que la concentración solar es una alternativa viable para la obtención de energía térmica. Dicha energía se puede transformar electricidad a través del método convencional de turbinas, obtención de combustibles a través de la separación química que generan las altas temperaturas o bien para generación de calor de procesos.

Finalmente, dado que el proyecto es de gran importancia a nivel nacional y además de que no es fácil conseguir bibliografía especializada en el área de concentración solar, este documento servirá de guía a los alumnos de Ingeniería en Sistemas de Energía, para conocer a detalle el funcionamiento y las partes componentes de un horno solar.

2. Concentración Solar

Los métodos de concentración más desarrollados redirigen la radiación solar sobre un foco lineal recto o bien sobre un foco puntual, con el fin de calentar un fluido a temperatura suficiente para operar un determinado ciclo termodinámico o para generar energía térmica para procesos.

Los sistemas de concentración solar tienen como finalidad incrementar el flujo de radiación solar sobre los receptores. Estos sistemas de concentración, pueden ser reflectores o refractores; pueden formar imagen solar o no formarla; pueden seguir al sol, tener ajustes periódicos o estar fijos; pueden ser cilíndricos para enfocar sobre una "línea" (concentradores bidimensionales) o circulares para enfocar sobre un "punto" (concentradores tridimensionales). [2]

Tipos de concentradores solares

Los colectores concentradores se pueden clasificar de acuerdo al tipo de sistema de seguimiento y de su rango de temperaturas de operación. A continuación se hace una breve descripción de la clasificación de colectores concentradores.

Cilindro parabólico

Como se puede ver en la ilustración 1 se utilizan reflectores en forma cilindro parabólico para concentrar la luz solar en tubos receptores térmicamente eficientes ubicados en la línea focal de la parábola. [3]

En las tablas 1, 2,3 y 4 se muestra la razón de concentración (C), rango de temperaturas (T) y tipo de seguimiento.

Tabla 1: RANGOS DEL CILINDRO PARABÓLICO [4]

Concentración	Temperaturas	Seguimiento
$15 < C < 40$	$70 < T < 290$	Un eje

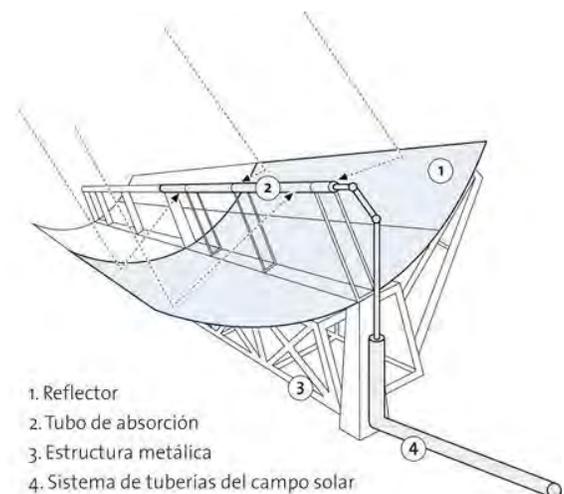


Ilustración 1; Diagrama cilindro parabólico [18]

Fresnel lineal

Consta de un conjunto de reflectores planos que concentran la radiación solar en receptores lineales invertidos elevados (ilustración2).

El agua que fluye por los receptores se convierte en vapor para la producción de calor de proceso solar. [3]

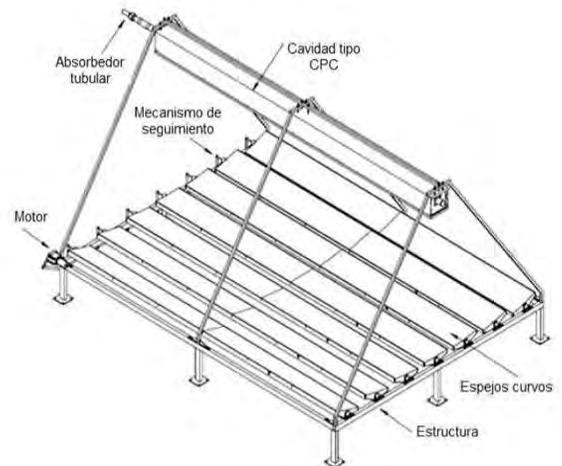


Ilustración 2; Diagrama Fresnel lineal [25]

Tabla 2; RANGOS FRESNEL LINEAL [4]

Concentración	Temperaturas	Seguimiento
$10 < C < 40$	$67 < T < 267$	Un eje

Discos parabólicos

Un reflector parabólico en forma de disco concentra los rayos solares en un receptor situado en el punto focal de un disco (ilustración3).

Por lo general se coloca en motor que funciona con un ciclo termodinámico Stirling en la zona de recepción o bien una microturbina situada en la área de mayor concentración. [3]

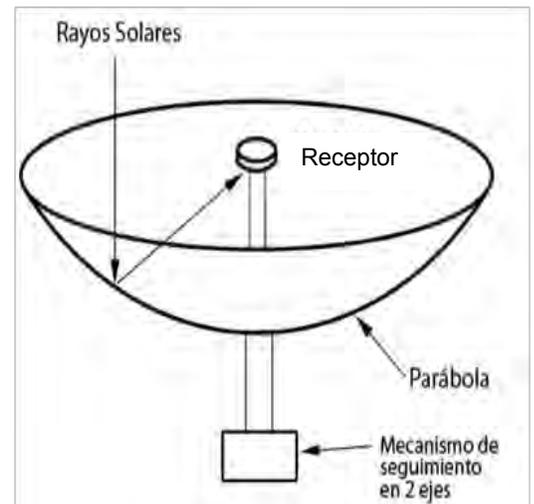


Ilustración3; DIAGRAMA DEL DISCO PARABÓLICO [19]

Tabla 3; RANGOS DEL DISCO PARABÓLICO [3]

Concentración	Temperaturas	Seguimiento
$100 < C < 1000$	$70 < T < 930$	En dos ejes

Receptor central

Un conjunto circular de heliostatos concentra la luz solar en un receptor central montado sobre una torre. Un medio de transferencia térmica en este receptor central absorbe la radiación altamente concentrada reflejada por los heliostatos y la convierte en energía térmica que se utiliza para generar el vapor súper calentado para la turbina (ilustración4). [3]

Tabla 4; RANGOS DEL R.C [4]

Concentración	Temperaturas	Seguimiento
$100 < C < 1500$	$130 < T < 2700$	En dos ejes

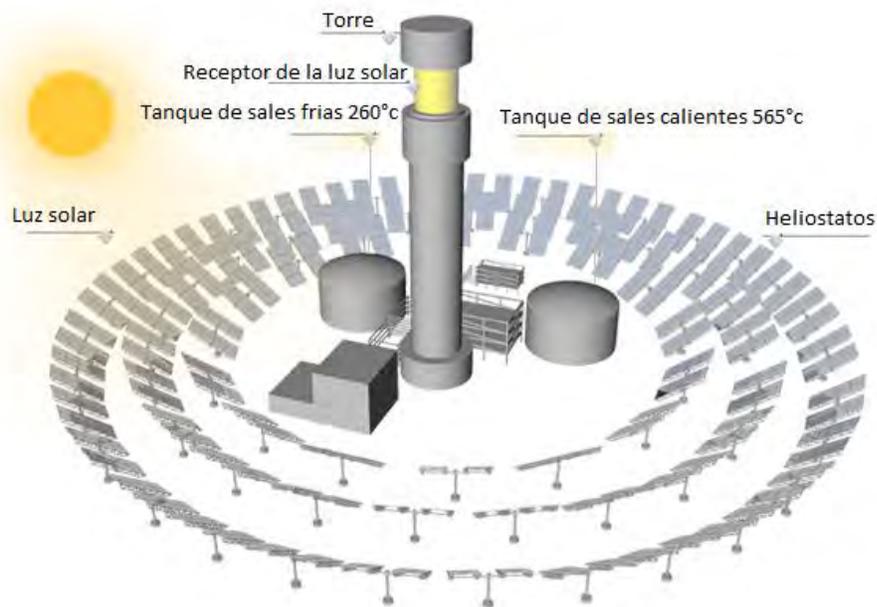


Ilustración 4; Receptor central [20]

En la tabla 4 se muestran las principales tecnologías de energía solar térmica de concentración y la comparación entre las mismas.

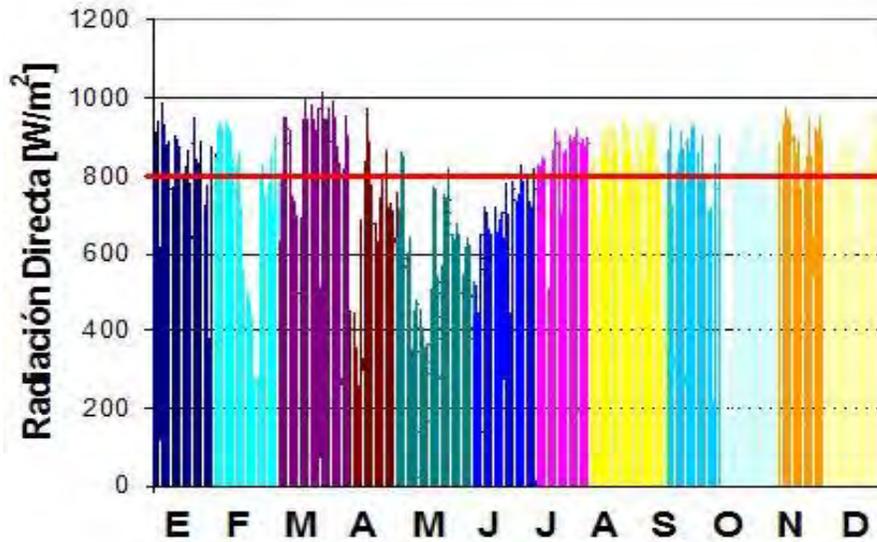
Tabla 4; Aplicaciones, ventajas y desventajas de los principales sistemas de concentración solar hasta el año 2009. [3]

	CANAL PARABÓLICO	RECEPTOR CENTRAL	DISCO PARABÓLICO	CONCENTRADOR LINEAL DE FRESNEL
Aplicaciones	Plantas conectadas a la red, calor de proceso a temperatura media a alta (Máxima potencia por central hasta la fecha: 80 MWe. Potencia total construida: más de 500 MW y más de 10 GW en construcción o propuesta)	Plantas conectadas a la red, calor de proceso de alta temperatura (Máxima potencia por central hasta la fecha: 20 MWe en construcción, Potencia total ~50MW con al menos 100MW en proceso de desarrollo)	Sistemas pequeños independientes, sin conexión a red, o en parques más grandes de discos conectados a la red (Máxima potencia por central hasta la fecha: 100 kWe, propuestas para 100MW y 500 MW en Australia y EEUU)	Plantas conectadas a la red, o generación de vapor para su uso en plantas térmicas convencionales. (Máxima potencia por central hasta la fecha: 5MW en EEUU, con 177 MW en proceso de desarrollo)
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Ya en el mercado – más de 16.000 millones de kWh de experiencia operativa; temperatura operativa potencial de hasta 500°C (400°C probado comercialmente) • Eficiencia neta anual de probado rendimiento de la planta del 14% (radiación solar a potencia eléctrica neta) • Inversión y costes operativos probados comercialmente • Modularidad • Buen uso del terreno • La menor demanda materiales • Concepto híbrido probado • Capacidad de Almacenamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Buenas perspectivas a medio plazo para grandes eficiencias de conversión, temperatura operativa potencial de más de 1000°C (565°C probado a escala de 10 MW) • Almacenamiento a altas temperaturas • Posible operación híbrida • Mejores para refrigeración en seco que los canales y Fresnel • Mejores opciones para usar en lugares no llanos 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencias de conversión muy altas – conversión solar pico a electricidad neta de más del 30% • Modularidad • Integra de la forma más efectiva el almacenamiento térmico en una central grande • Experiencia operativa de primeros proyectos de demostración • Fácil fabricación y producción en serie de piezas disponibles • No requiere agua para refrigerar el ciclo 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencias de conversión muy altas – conversión solar pico a electricidad neta de más del 30% • Modularidad • Integra de la forma más efectiva el almacenamiento térmico en una central grande • Experiencia operativa de primeros proyectos de demostración • Fácil fabricación y producción en serie de piezas disponibles • No requiere agua para refrigerar el ciclo
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • El uso de medio de transferencia térmica a base de aceite restringe hoy las temperaturas operativas a 400°C, por lo que se obtienen sólo moderadas calidades de vapor 	<ul style="list-style-type: none"> • Los valores anuales de rendimiento previstos, los costes de inversión y su operación necesitan pruebas a mayor escala en operaciones comerciales 	<ul style="list-style-type: none"> • No hay ejemplos de uso comercial a gran escala • Objetivos de costes previstos de producción en serie aún por probar • Menor potencial de disponibilidad para integración a la red • Receptores híbridos aún en proceso de I+D 	<ul style="list-style-type: none"> • Reciente entrada en el mercado, sólo hay pequeños proyectos operativos

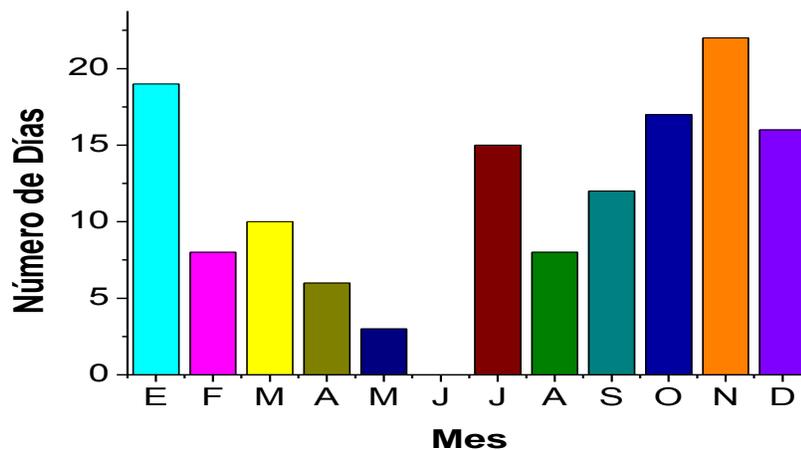
Perspectivas de la concentración solar en Hornos Solares

La UNAM construyo en el IER un Horno Solar de Alto Flujo Radiativo, con la finalidad de aportar avances en la investigación de la concentración solar.

Se eligió la ciudad de Temixco Morelos por sus características geográficas así como sus condiciones climáticas como se puede observar en los siguientes graficas;



GRAFICA 1; RADIACIÓN DIRECTA AÑO 2005



GRAFICA 2; NÚMERO DE DÍAS POR MES CON BUENA RADIACIÓN SOLAR EN 2005

Como se puede observar en la gráfica 1, durante la mayor parte del año se tiene una radiación por encima de los 800W/m^2 y en la gráfica 2 podemos ver que durante el año hay alrededor de 136 días con la radiación óptima para operar el horno.

Características del HSAFR.

Un horno solar está compuesto básicamente de dos sistemas ópticos, el primero consiste en un sistema de uno o varios heliostatos divididos en espejos o facetas planas, este redireccióna de forma colimada la radiación solar hacia un segundo sistema concentrador fijo, el cual concentra la radiación solar en un “centro” o zona focal fija. El tener fija la zona focal o de alta concentración, brinda la ventaja de contar con una mesa de trabajo ubicada en la zona focal sobre la cual se instalan equipos para la experimentación con el horno. [5]

Hoy en día se han construido plantas en diferentes partes del mundo, que utilizan la concentración solar para generar energía o bien con fines fototérmicos específicos.

En la ilustración 5 se muestran las partes principales que constituyen un horno solar.

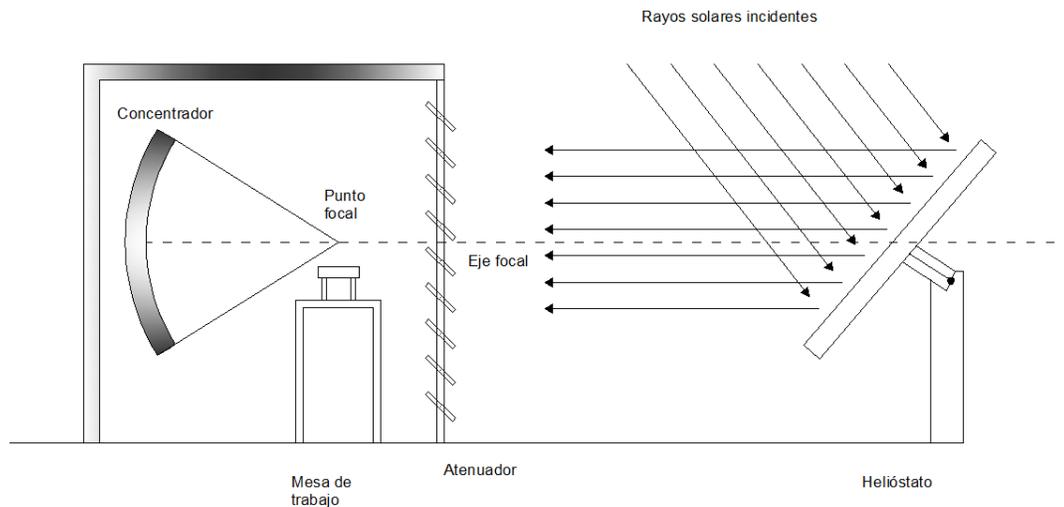


Ilustración 5; Representación del método de trazado de rayos de concentración que utiliza el HSAFR [4]

3. Sistemas que componen el Horno solar de Alto Flujo Radiativo

SISTEMAS PRINCIPALES

Heliostato

El Heliostato tiene la finalidad de redirigir la radiación solar hacia al concentrador. Este dispositivo tiene un área de 81m^2 , y su superficie está compuesta por 30 espejos o facetas que mantienen una alineación con el disco solar para optimizar la reflexión de la radiación al dispositivo de concentración.

Concentrador

El Concentrador lleva a cabo la convergencia de la radiación solar (que el Heliostato dirigió a su superficie), hacia un punto de menor área llamado spot.

Heliostato

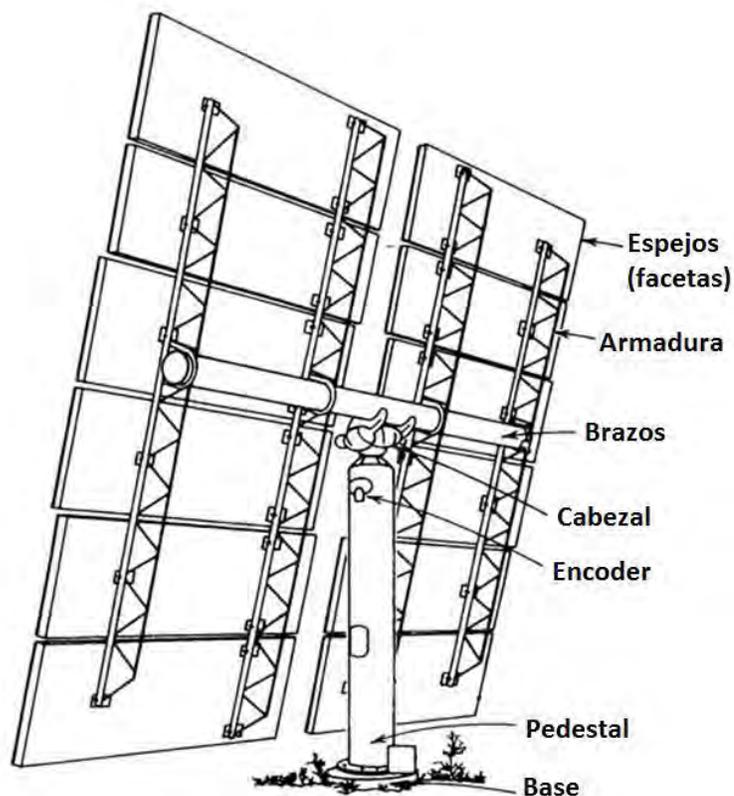


Ilustración 6; Esquema de las partes de un heliostato [5]

El seguimiento solar en este dispositivo es indispensable, para ese efecto cuenta con dos transmisiones instaladas a 90° una de otra para garantizar la elevación y la corrección de la azimut. Las transmisiones cuentan con un tornillo sin fin con una relación de giro de 18400-1 provocando un movimiento lento el cual permite al heliostato ser muy preciso.

Los motores utilizados para la transmisión de heliostatos son de corriente CD de 24 V y 2.6 A.

El heliostato está compuesto por las siguientes partes:

- Espejos(facetas)
- Armadura
- Brazos
- Cabezal
- Pedestal

Espejos o facetas

Los espejos están distribuidos como se indica en la ilustración 7. En esta misma ilustración se muestra un arreglo de 30 espejos en el que se emplean 2 tipos de espejos de capa reflectante anterior uno de 1.8x1.9m y otro de 1.8x1.3m, el cual sería más fácil de manipular aunque requiere realizar una mayor cantidad de cortes y genera más espacios en la cara del heliostato. [6]

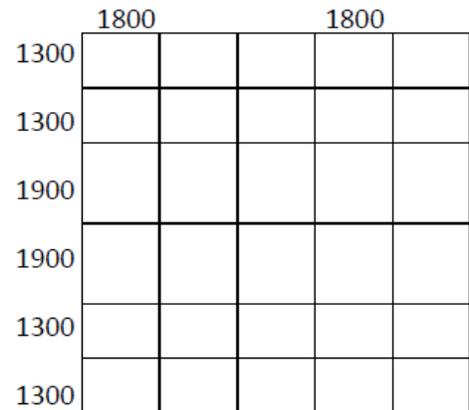


Ilustración 7; Distribución de espejos del heliostato [5]

Armadura

La armadura proporciona el área en la se instalan zapatas metálicas donde se fijaran las facetas (ilustración 8). Las placas de espejo se adhieren a las zapatas con un adhesivo especial que impide su deslizamiento. Este arreglo es ligero y resistente además esta estructura tiene un momento de torsión menor por tener en los extremos elemento más ligeros. Su desventaja es que puede ser algo complicada su construcción debido a todos los puntos de unión y el costo una vez sumado el material y fabricación. [6]

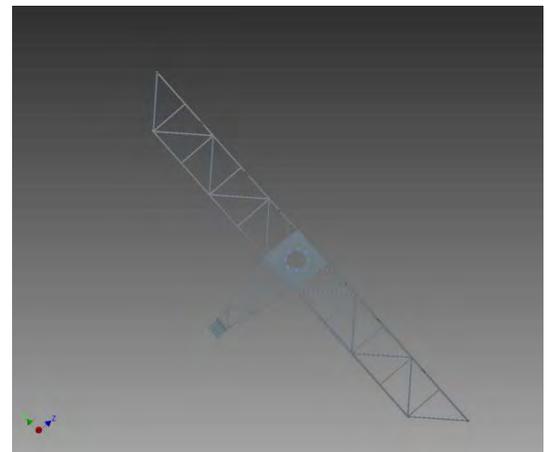


Ilustración 8; Armadura del heliostato [5]

Brazos

Los brazos son postes que conectan la estructura del Heliostato a los motores (ilustración 9). Esta sección se examinó en simulación con vientos de 70k/h y se observó que los brazos soportaran el peso de las facetas, armaduras y contrapesos soportando los esfuerzos que no superen los 1.52×10^8 Pa.

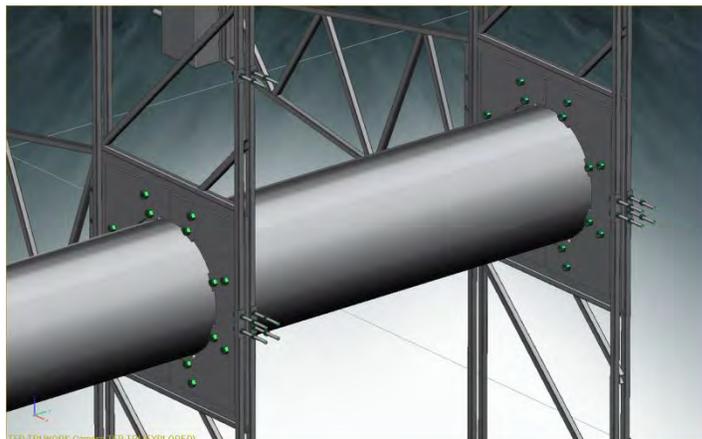


Ilustración 9; Brazo derecho de heliostato [6]

Cabezal

El cabezal es el dispositivo que genera el momento para mover los brazos del Heliostato y efectúa el movimiento en dos planos (elevación y azimut), este dispositivo se muestra en la ilustración 10.

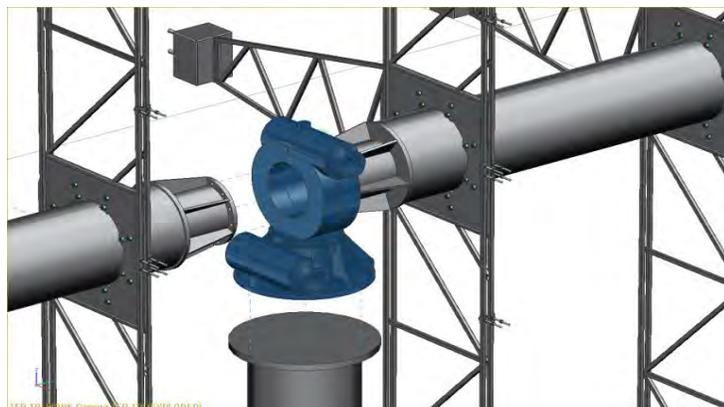


Ilustración 10; Cabezal del heliostato [6]

Pedestal

El pedestal carga todo el peso de los componentes y se instala en la base del Heliostato (ilustración 11). Al realizar las pruebas de deformación con vientos de 70k/h se considera que el pedestal soporta el peso de las facetas, armaduras, contrapesos, cabezal y brazos soportando los 7.6×10^7 Pa.

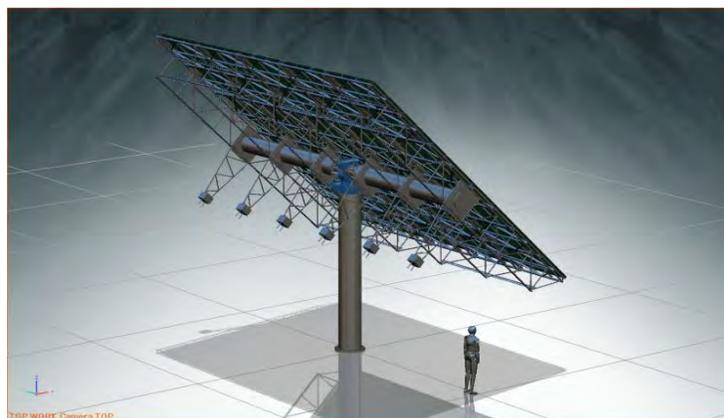


Ilustración 11; Pedestal del heliostato [6]

Concentrador

Un concentrador es un tipo de colector solar, capaz de concentrar la energía solar en un área reducida aumentando la intensidad energética (ilustración12). Similar a una lupa enfocando su luz en un punto, los concentradores reflejan la luz solar por medio de un arreglo de espejos alineados hacia un objetivo capaz de captar dicha energía para su aprovechamiento. [7]

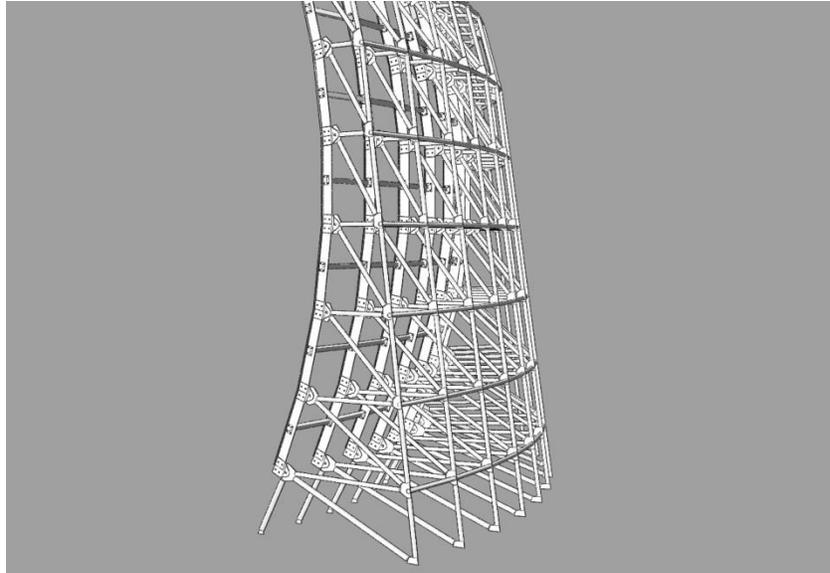
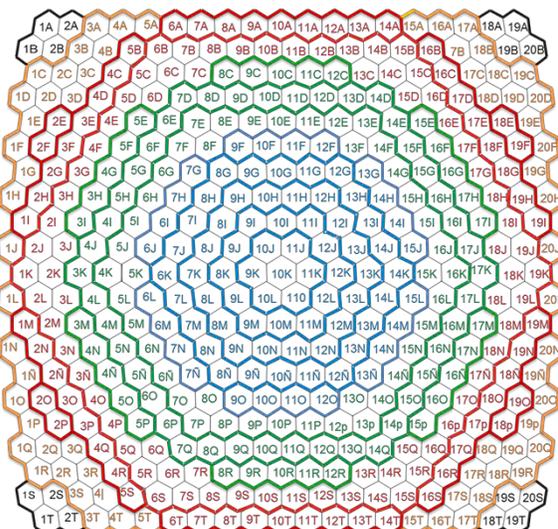


Ilustración 12; Concentrador del IER [6]

El concentrador del HSAFR, es un concentrador facetado y consta de un arreglo en forma de panel de 409 espejos (o facetas) de primera superficie. Los espejos tienen forma hexagonal con 40 cm de diámetro y superficie esférica. El arreglo de los espejos está dividido en cinco zonas ópticas diferentes los cuales están montados sobre una estructura esférica de dimensiones 6.72 m X 6.2 m. [7]

En la ilustración 13 se muestra la distribución de las facetas y tabla de distancias con respecto a su posición.



Grupo	Distancia focal (m)	Num. De espejos
A	3.75	85
B	4.00	114
C	4.25	130
D	4.50	64
E	4.75	16

Ilustración 13; Distribución de facetas, distancia focal y diseño final del concentrador del HSAFR [6]

El concentrador consta esencialmente de 3 subsistemas. El óptico (409 espejos), con superficie reflectora esférica; el subsistema de células (63 piezas), que integra grupos de espejos de 5, 6, 7, 8, 9 y 10 en función de su posición y de su distancia focal y, el subsistema estructural, que recibe, soporta y mantiene en condición permanente de alineamiento a los dos primeros. [8]

Facetas

Cada faceta (ilustración 4), se puede orientar individualmente y manualmente ya que por el momento no se cuenta con algún sistema para realizar esta orientación automáticamente y todo con el fin de corregir errores de aberración esférica. [7]

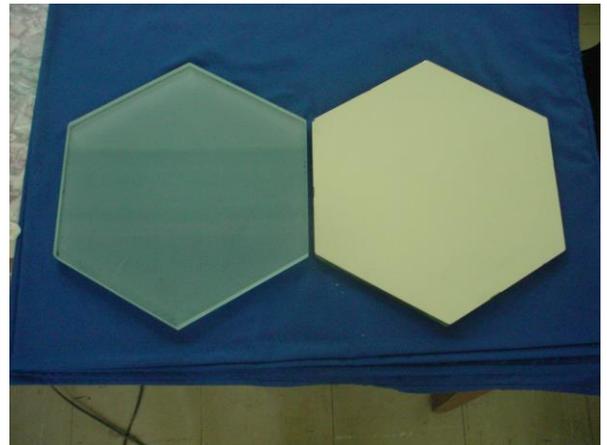


Ilustración 14; Facetas de primera superficie. [24]

Montura

La montura es un dispositivo que soporta un espejo hexagonal y que dotará de los grados de libertad necesarios para corregir la posición espacial del espejo, es decir, la montura debe ser capaz de compensar errores de montaje y fabricación de la estructuras dentro de los márgenes de variación. [9]

La Ilustración 15 muestra los desplazamientos posibles que tiene la montura sobre sus placas de soporte, las ranuras permiten desplazamientos lineales de +/- 10mm en la horizontal (se muestra con la flecha verde) y de +/- 15 mm para el eje Z (flecha roja), lo que es suficiente considerando el error permisible en dichos ejes. [9]



Ilustración 15; Traslaciones de la montura. [9]

Malla

La malla es un arreglo estructural que soporta las monturas, para ellos cuenta con puntos de sujeción y ajuste, además, su geometría pretende acercar las monturas a su posición espacial determinada. [9]

La malla consiste de tres semiestructuras (ilustración 16), una sección media y dos secciones extremas. Las secciones extremas se fijan con un ángulo y altura predeterminados por la posición espacial de cada espejo. [9]

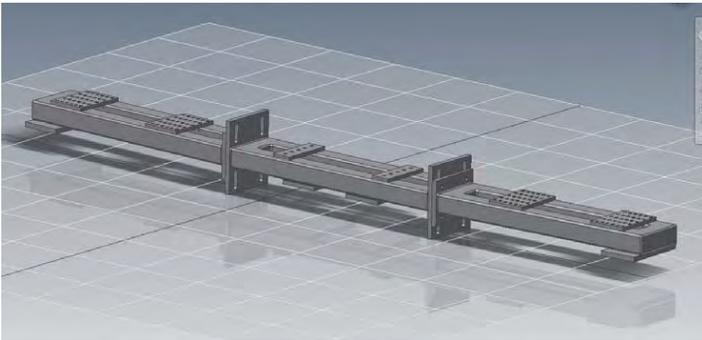


Ilustración 16; Malla, costa de una parte fija (en medio) y dos partes soldadas a un ángulo definido dependiendo del renglón del concentrador. [9]



Ilustración 17; Posición espacial de los espejos y ensamble sobre la malla [9]

Estructura principal

La estructura principal (ilustración 18) es el sustento de todo el concentrador, define las posiciones teóricas de los soportes de malla y sirve de estructura para el ensamble y mantenimiento de los espejos y la malla. Esta estructura ofrece peldaños en donde pueden montarse tableros para que una persona pueda subirse y ensamblar la malla y los espejos, así como efectuar el procedimiento de alineación. [9]

La estructura principal consta de 7 columnas donde se sujeta por medio de tornillos los soportes de la malla. Entre las columnas se atornillan soportes que proveen tanto un refuerzo para la estructura como los peldaños para un andamio para mantenimiento y ajuste. [9]

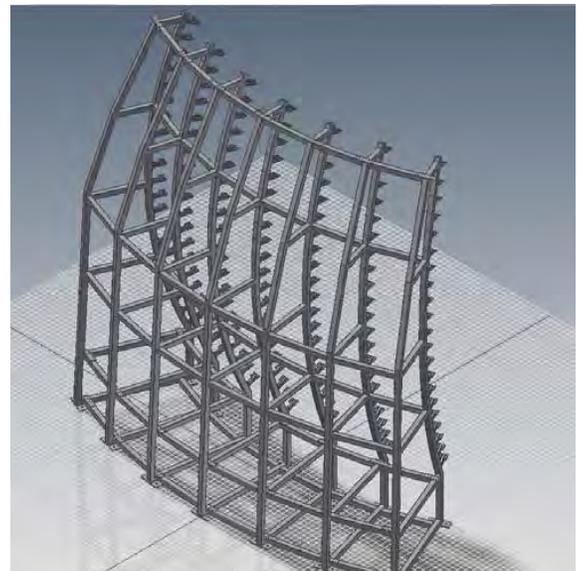


Ilustración 18; Estructura Principal [9]

Sistemas secundarios o periféricos

Atenuador



Ilustración 19; Atenuador del HSAFR

El atenuador (ilustración 19) es el sistema que regula la entrada de la radiación solar al concentrador.

Tiene una escala del 0% que es el cierre total de este sistema, y el 100% que indica apertura total con una posición perpendicular al marco. Este sistema consta de 45 láminas de acero inoxidable sandblastado colocadas de manera vertical en un marco de 6.29 m X 6.7 m. Este sistema es el único medio en que se puede regular la radiación que entra a todo el sistema por lo que es de suma importancia tener un control confiable y seguro, si existiera algún imprevisto durante un experimento, el atenuador funge como sistema de seguridad ya que cuenta con distintos paros de emergencia. [7]

Las siguientes dimensiones muestran el sombreado que genera el atenuador ya instalado en la edificación. [10]

Dimensiones de la ventana en el edificio (sin ningún tipo de estructura):

Ancho= 7.00 m

Altura= 6.59 m

Superficie libre de la ventana con marco estructural instalado (solo el marco instalado junto con el soporte de la cortina de protección.):

$S = 42.078 \text{ m}^2$ sin atenuador

Superficie de obstrucción mínima (con atenuador 100% abierto, el sombreado que presentan las persianas abiertas, al concentrador):

$S_o = 0.449 \text{ m}^2$

Superficie de apertura máxima (con atenuador 100% abierto el área resultante del total de la ventana menos el S_o):

$S_m = 41.629 \text{ m}^2$

Porcentaje de obstrucción del atenuador en apertura máxima:

$\% = 1.067\%$

En la ilustración 20 se muestra como con el atenuador se puede variar la radiación que el heliostato dirige hacia el concentrador.



Ilustración 20; Atenuador en con diferentes porcentajes de abertura [11]

Mesa de experimentación.

El HSAFR tiene una mesa de trabajo (ilustración 21,22), que tiene desplazamiento en tres direcciones, (ejes, X, Y, Z). Sobre esta mesa se montan los dispositivos experimentales como receptores o reactores químicos. La mesa tiene la capacidad de proporcionar un movimiento con precisión de una décima de milímetro en cualquiera de las tres direcciones. Con esto se logra tener el control en el posicionamiento de los receptores/reactores en la zona focal del HSAFR. [7]



Ilustración 21: Mesa de experimentación. [8]

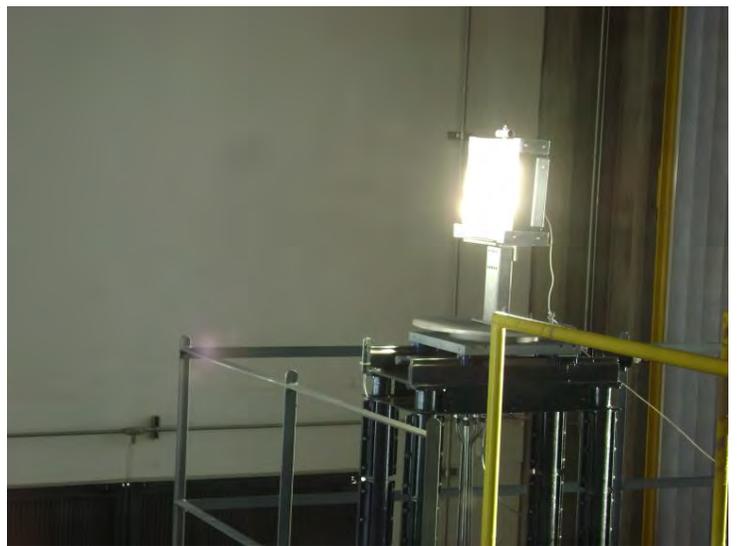


Ilustración 22; Mesa de experimentación con el HSAFR en funcionamiento. [8]

En la ilustración 23 se muestra una prueba en la que se utilizó una cámara de humo para poder verificar el ángulo de incidencia de la radiación (65.7°) y el diámetro del área de mayor concentración o spot (6.9cm).

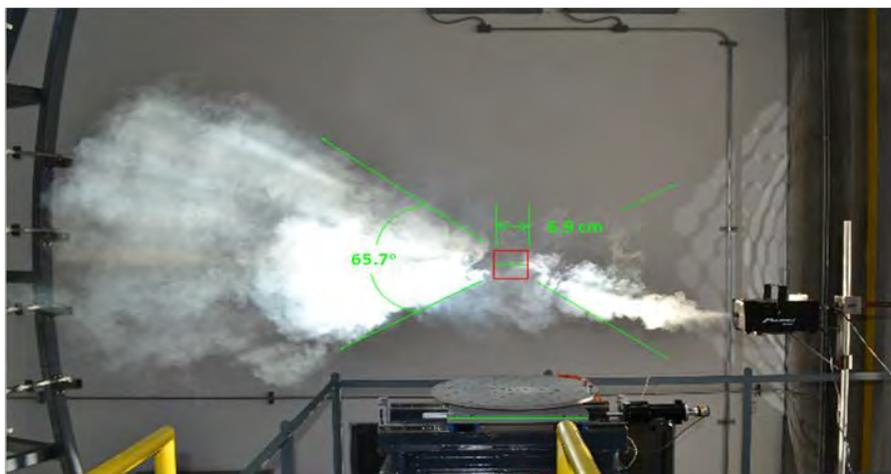


Ilustración 23; Forma de la radiación solar concentrada en la zona focal. [8]

Sistema de refrigeración.

El sistema de refrigeración es indispensable para la caracterización y experimentación que se realiza en HSAFR. Las temperaturas alcanzadas por el horno pueden fluctuar entre 3500 y 400°C, es por esto que los dispositivos de medición de la temperatura tienen que tener un sistema que permita a través de la ley de la conservación de la energía determinar las temperaturas alcanzadas.

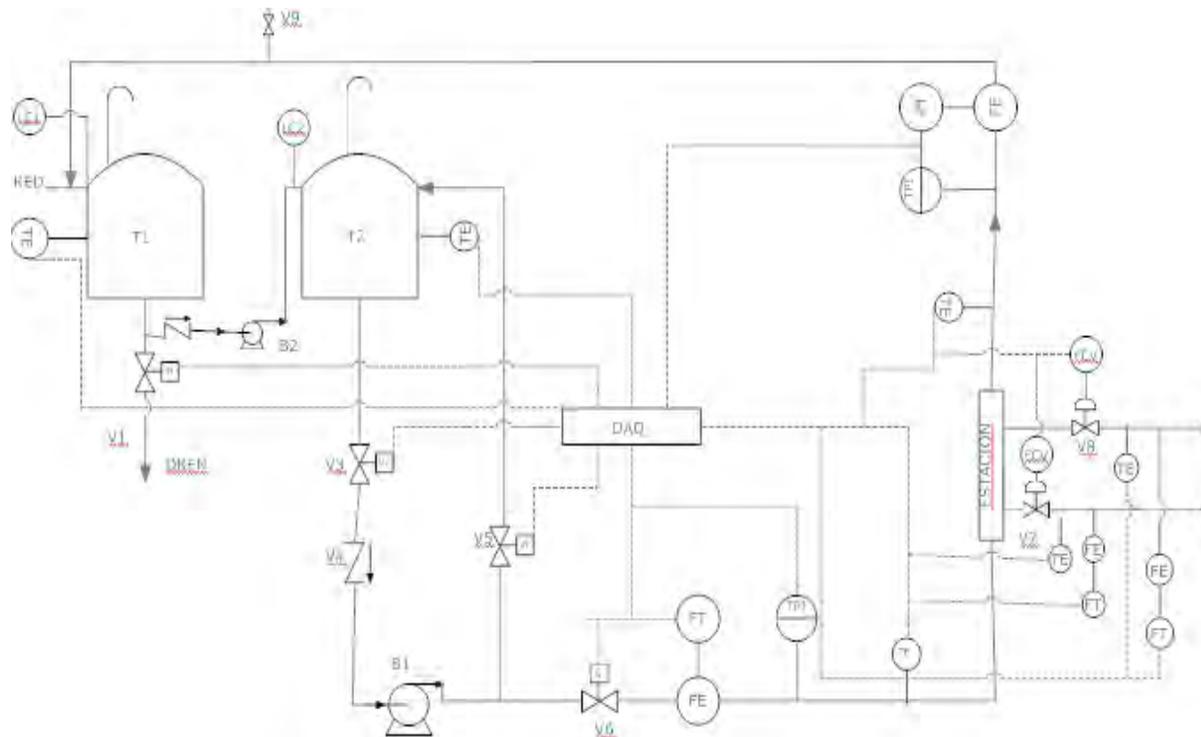
En la tabla 5 se muestra el caudal necesario para poder llevar a cabo el análisis calorimétrico con respecto al porcentaje de apertura del atenuador.

Por ejemplo: con un caudal 5 l/min con una apertura del atenuador del 100%, se estará operando en el rango máximo de operación óptima que es menor a 40° C.

Tabla 5; DETERMINACIÓN DE CALOR NECESARIO REMOVIDO EN RECEPTOR DEL HSAFR.

CAUDAL		APERTURA DE ATENUACIÓN				
		ΔT				
l /min	kg/s	100%	75%	50%	25%	10%
1	0.02	378.8	284.1	189.4	94.7	37.9
2.5	0.04	151.5	113.6	75.8	37.9	15.2
5	0.08	75.8	56.8	37.9	18.9	7.6
10	0.17	37.9	28.4	18.9	9.5	3.8
15	0.25	25.3	18.9	12.6	6.3	2.5
20	0.33	18.9	14.2	9.5	4.7	1.9
30	0.50	12.6	9.5	6.3	3.2	1.3
40	0.67	9.5	7.1	4.7	2.4	0.9
Casos no deseados						
Rango máximo de refrigeración		< 40 °C				
Se puede hacer calorimetría		< 20 °C				
calorimetría óptima		< 15 °C				

En la ilustración 24 se muestra el diagrama del conjunto de componentes del sistema de refrigeración del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo



NOM.	COMPONENTE
V1,2,3y5	VALVULA SELENOIDE
V4	VALVULA CHECK
V7y8	VALVULA DE CONTROL DE FLUJO
V9	VALVULA DE ALIVIO
T1	TANQUE DE RECUPERACION DE AGUA
T2	TANQUE AISLADO SUMINISTRO DE AGUA
LC	CONTROL DE NIVEL DE AGUA y TRASMISOR
FE	MEDIDOR DE FLUJO
FT	TRASMISOR DE FLUJO
PI	MEDIDOR DE PRESION
TPI	TRASMISOR DE PRESION
TE	MEDIDOR Y TRASMISOR DE TEMPERATURA
DAQ	SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS TEXAS INSTRUMENTS
B1-B 2	BOMBA

Ilustración 24; Diagrama de flujo de proceso HSAFR.

4. Experimentos realizados

Síntesis de óxidos de tungsteno (VI) por medio de concentración solar

Se utilizaron barras de tungsteno de grado industrial con 99% de pureza, apiladas para formar una “pantalla” vertical. Dichas barras se colocaron en el foco del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSAFRa) del IER-UNAM, dentro de una Cámara Inerte Esférica de Vidrio Pyrex[®] (CIEViP). Para registrar la temperatura, tanto de la cámara como de los gases del interior de la misma, se colocaron termopares en un arreglo como el de la figura 26. En la parte superior de las barras de tungsteno se colocó un recolector de muestras de forma rectangular donde se depositaron los óxidos de tungsteno, aunque toda la CIEViP sirvió como recolector de muestras. El atenuador del horno se abrió al 75% y se contaba con una irradiación de 854 W/m^2 . [12]

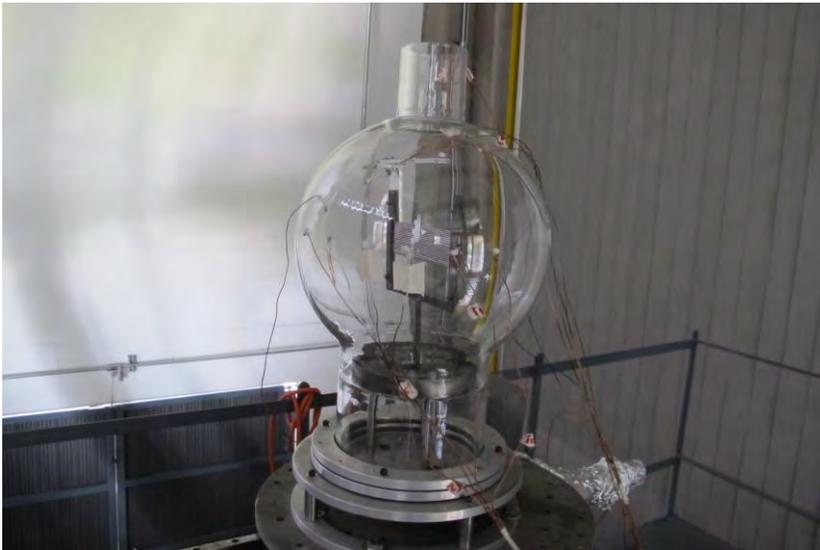


Ilustración 25; Dispositivo experimental. [12]

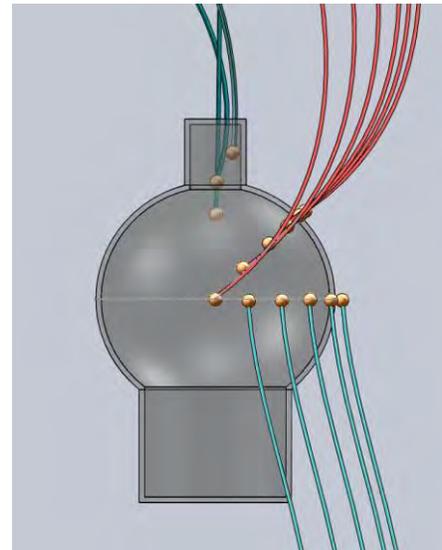


Ilustración 26; Distribución de termopares. [12]

En la región central de la CIEViP se alcanzó la temperatura máxima de $780 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que se tuvo que parar el experimento ya que el vidrio Pyrex[®] se comienza a reblandecer a los $820 \text{ }^\circ\text{C}$.

Al final de la prueba se recolectó el polvo del cuerpo de la esfera y se analizó con la técnica de Difracción de Rayos X. Los resultados de esta prueba muestran que es posible obtener dos tipos de estructuras cristalinas del WO_3 : monocíclico y tricíclico. [12]



Ilustración 27; Reactor en funcionamiento. [12]



Ilustración 28; Esquema del dispositivo experimental al finalizar la prueba. [12]

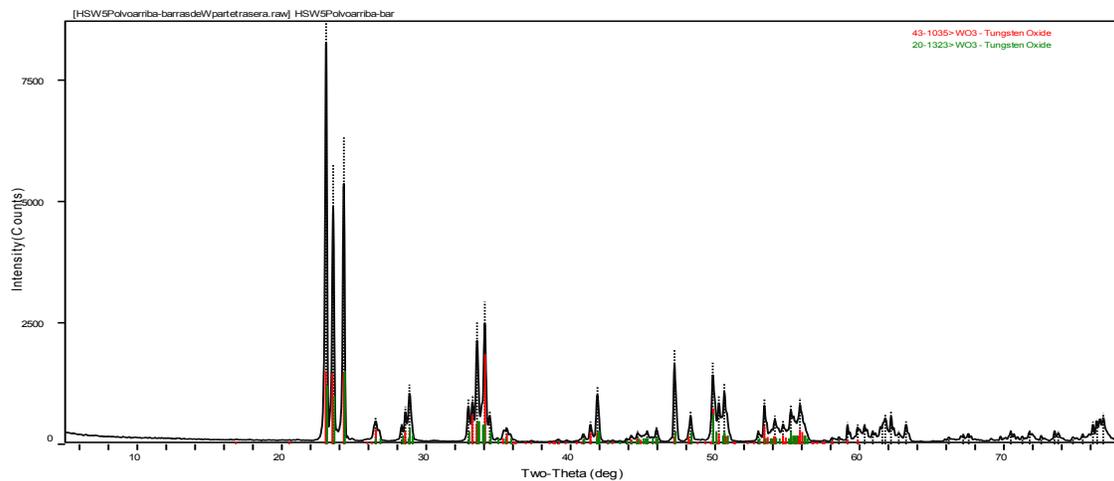


Ilustración 29; Difracción de rayos X de la muestra obtenida en el cuerpo de la CIEViP. [12]

Conclusión

- El HSAFR-UNAM fue utilizado para sintetizar diferentes estructuras cristalinas de óxidos de tungsteno.
- Las reacciones se realizaron con una cámara solar diseñada para funcionar en altas temperaturas y atmósferas controladas.
- Los resultados preliminares mostraron que era posible obtener varias estructuras cristalinas de WO₃, principalmente monoclinico, triclinico y cúbico. En otros experimentos que incluyen el uso de una bomba de vacío era también obtenido cristales W₂₄O₆₈ monoclinica.
- Otros experimentos necesitan ser realizado con el objetivo de encontrar las condiciones de síntesis óptimas de cada óxido de tungsteno, principalmente WO₃, WO₂, W₁₈O₄₉, W₂₄O₆₈

Fundición de Placa de Acero (1500°C)

Para evaluar la capacidad del HSAFR para alcanzar altas temperaturas, se planeó un experimento destructivo, colocando una placa de acero al carbón de 19 cm x 19 cm y 19 mm de espesor en la zona focal del concentrador. La temperatura del punto de fusión está por arriba de los 1500 C°. Una vez alineado el helióstato tomo 525 segundos perforar la placa. [13]



Ilustración 28; Placa de acero al carbón fundida a 1406C° en un tiempo de 525 segundos. [13]

Conclusiones

- El HSAFR pudo alcanzar una temperatura de 1406°C a la cual el acero al carbón se funde.
- Se corroboró el área de concentración o diámetro de spot con el área que se fundió en el acero al carbón.
- Con una radiación directa de 865W/m² en un tiempo de 525 segundos se puede perforar acero al carbón de 19mm.

Síntesis de óxido de tungsteno (WO_3) por medio de concentración.

Utilizando las instalaciones del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR) del IER-UNAM, se obtuvo el óxido de tungsteno a alta temperatura colocando electrodos de tungsteno de grado industrial con pureza del 99% en el foco del HSAFR de 30 KWt, dentro de una cámara esférica de vidrio Pyrex®. La temperatura alcanzada en el foco permite la formación del WO_3 a presión atmosférica y en presencia del oxígeno contenido en el aire. El compuesto se recolectó de manera generosa por simple deposición. [12]

El trióxido de tungsteno (WO_3) es un compuesto con aplicaciones tecnológicas y científicas muy importantes, debido a que se utiliza como material electrocrómico, fotocromico o gasocromico. Este material se sintetiza por diversos métodos como deposición química, sputtering, condensación de gas, sol-gel y otros. Sin embargo, todos estos métodos resultan complicados y costosos, tanto económica como energéticamente, ya que requieren de varios pasos y/o reactantes para su implementación. La concentración solar es una buena alternativa para evitar procesos complicados y reducir costos en la preparación del WO_3 . [12]

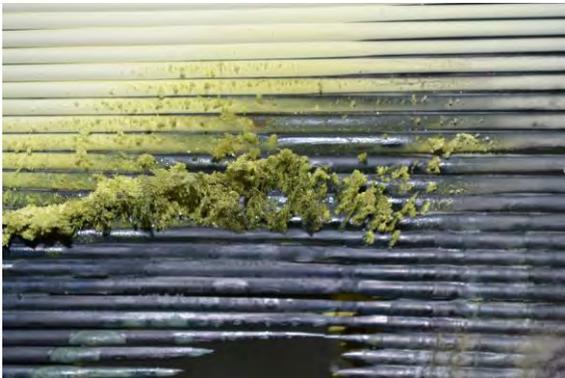


Ilustración 30; Cristales de WO_3 [23]

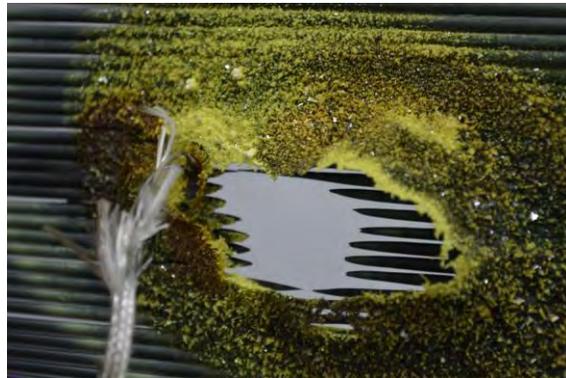


Ilustración 29; Formación de cristales en las barras de W [23]

Conclusiones

- En este experimento se alcanzó la temperatura máxima registrada en el HSAFR que es de $3600^{\circ}C$ ya que esta es la temperatura de fusión del Tungsteno. El equipo de investigación encargado de la caracterización del horno podía calcular teóricamente las temperaturas máximas que podía conseguir el sistema, sin embargo se enfrentaban a las limitantes tecnológicas para poder medir altas temperaturas con dispositivos electrónicos. Este experimento permitió determinar un parámetro de temperatura máxima.
- Con una radiación de $800W/m^2$ en un tiempo de 13 minutos se pudo fundir tungsteno con un espesor de 4mm.
- Al colocar barras de tungsteno dentro de una esfera de vidrio Pyrex®, a una temperatura de $3406^{\circ}C$, a una atmosfera de presión, con el oxígeno que contenido por el aire se obtuvieron cristales de WO_3 .

Conclusiones

Se mostraron las partes componentes del HSAFR y explicaron sus principios de funcionamiento aportando la documentación necesaria para los estudiantes interesados en las energías renovables, así como en la óptica, termodinámica y la transferencia de calor.

Las perspectivas para de aplicación del método de concentración utilizado por HSAFR son innumerables, desde poner a prueba las propiedades térmicas de los materiales que se someten a altas temperaturas, polímeros utilizados por la NASA para naves espaciales por ejemplo, separar el hidrogeno del agua para generar combustible, llevar acabo el cocimiento de cerámicos para la construcción, generar energía a través de reacciones químicas o bien generar vapor con las características de calidad necesarias para mover turbinas, etc.

El tener a disposición el avance en la tecnología de concentración solar utilizada en el HSAFR, así como los experimentos y resultados de los mismos, puede estimular a las nuevas generaciones a profundizar en el tema he inclinar su formación académica en las energías renovables.

El HSAFR se encuentra, hasta la fecha de recopilación de la información con la que se realizó esta monografía, en su fase de caracterización, es por esto que aún no se cuenta con una vasta gama de experimentos y resultados, se espera que en un corto plazo comiencen los trabajos de investigación en forma.

El método de obtención de energía calorífica que utiliza el HSAFR es una de los metodos más eficientes de generar altas temperaturas a bajo costo, es decir, ya con la infraestructura concluida solo se necesita una buena radiación solar ($800\text{W}/\text{m}^2$) y darle la apertura necesaria al atenuador para poder generar temperaturas de hasta 3600°C por lo que muestran los resultados obtenidos en la experimentación, esto genera que la investigación en las áreas científicas involucradas, sea más accesible para la comunidad científica .

Trabajos citados

- [1] V. MUÑOZ, «GHorno solar de alta temperatura para el cocimiento,,» Queretaro, 2010.
- [2] D. R. E. C. L. Dr. Claudio A. Estrada Gasca, «CURSO DE CONCENTRADORES SOLARES,» Temixco Morelos, 2003.
- [3] S. T. J. A. N. Dr Christoph Richter, «Energía Solar Térmica,» *Greenpeace*,, p. 88, 2009.
- [4] C. A. Estrada, «Sistemas de Concentración Solar para la Generación Eléctrica,» Temixco Morelos, 2006.
- [5] J. L. Pedraza, «DISEÑO, CONSTRUCCION Y PUESTA EN OPERACIÓN DE UNA PANTALLA LAMBERTIANA PARA EL HORNO SOLAR DE ALTO FLUJO RADIATIVO,» Temixco Morelos, 2012.
- [6] Ó. P. T. I. C. A. Y. E. L. E. C. T. R. Ó. N. I. C. A. INSTITUTONACIONALDEASTROFÍSICA, «LABORATORIO DE DISEÑO MECÁNICO,» 2010.
- [7] E. B. Bazán, «Optimización y Puesta a Punto del Sistema de Control SCADA para la Operación,» TEMIXCO MORELOS, 2013.
- [8] U. CIE – CCADET, «“CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL CONCENTRADOR”.,» Temixco Morelos, 2009.
- [9] Ó. P. T. I. C. A. Y. E. L. E. C. T. R. Ó. N. I. C. A. INSTITUTONACIONALDEASTROFÍSICA, «Reporte de Ingeniería, SUBENSAMBLE MEH, MALL y ESTP,» 2009.
- [10] P. E. D. G. S. D. C.V., «DESARROLLO DEL CONCEPTO, DISEÑO, FABRICACIÓN E INSTALACIÓN DE UN ATENUADOR PARA LABORATORIO SOLAR.,» Temixco Morelos, 2009.
- [11] L. N. d. S. d. C. S. y. Q. Solar, «Ficha de especificaciones del Atenuador del,» 2006.
- [12] A. B.-O. C. E.-. G. H.I. Villafán- Vidales, «Síntesis de óxidos de tungsteno (VI) por medio de concentración solar,» Temixco Morelos, 2009.
- [13] C. A. Pérez-Rábago., «Operación del Horno Solar de Altos Flujos Radiativos (HSAFR),» Temixco Morelos, Marzo, 2011.

- [14] K. Solomos y N. Avouris, «Learning From Multiple Collaborating Intelligent Tutors: An Agent-Based Approach,» vol. 10, nº 3.4, 1999.
- [15] D. a. B. C. Ballard, Computer vision, Englewood Cliffs. : Prentice-Hall Inc. , 1982.
- [16] L. Carroll, «Alice's Adventures in Wonderland,» [En línea]. Available: <http://www.germany.eu.net/books/carroll/alice.html>. [Último acceso: 10 febrero 1995].
- [17] C. d. I. E. M. y. Tecnológicas, «Informe Anual,» Almeria España, 2012.
- [18] «SOLAR MILENNIUM AG,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.solarmillennium.de/espa%C3%B1ol/archiv/tecnologa/centrales-cilindro-parabolicas/campo-solar/index.html>.
- [19] «DIRECT SSS,» 2013. [En línea]. Available: http://www.mybestcv2.co.il/TextPage_EN.aspx?ID=11501153.
- [20] «SQM,» 2013. [En línea]. Available: [http://www.sqm.com/es-es/unidadesdenegocios/qu%C3%ADmicosindustriales/salestermosolares/energ%C3%ADAsolarconcentrada\(csp\).aspx](http://www.sqm.com/es-es/unidadesdenegocios/qu%C3%ADmicosindustriales/salestermosolares/energ%C3%ADAsolarconcentrada(csp).aspx).
- [21] D. R. Rosas, «"DISEÑO ÓPTICO DEL HORNO SOLAR DE ALTO FLUJO,» TEMIXCO MORELOS, 2008.
- [22] D. J. O. A. Aguilar, *Colectores solares de canal parabólico, diseño y aplicaciones*, CHETUMAL QUINTANA ROO, 2013.
- [23] L. N. d. S. d. C. S. y. Q. Solar, «Informe Técnico 5to Semestre de Avance,» Temixco Morelos, 2010.
- [24] U. IER, «FACETAS DE PIMERA SUPERFICIE,» TEMIXCO MORELOS.
- [25] «SCIELO,» Centro de Información Tecnológica, 2013. [En línea]. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642013000100013&script=sci_arttext.