

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN CONCENTRADOR  
SOLAR PARABÓLICO PARA LA PRODUCCIÓN DE  
HIDRÓGENO**

PRESENTA

FERMIN AGUILAR GIL

MATRICULA: 209331777

ASESORES:

DR. RUBÉN DORANTES RODRÍGUEZ

DR. JOSÉ LUIS CONTRERAS LARIOS

CIUDAD DE MÉXICO

TRIMESTRE: 180

11 DE ENERO 2019

## *Agradecimientos:*

*Quiero agradecer al CONACYT por la beca que se me otorgo para la realización de este trabajo, a través del proyecto 249855 del Fondo de Sustentabilidad Energética CONACYT-SENER.*

## Declaratoria

Yo, Dr. Rubén Dorantes Rodríguez, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dr. Rubén Dorantes Rodríguez

## Declaratoria

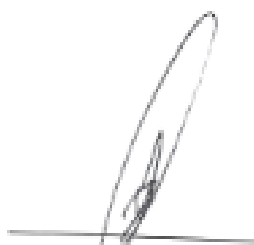
Yo, Dr. José Luis Contreras Larios, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Dr. José Luis Contreras Larios

## Declaratoria

Yo, Fermín Aguilar Gil, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.



Fermín Aguilar Gil

# Formato PI-A



## AUTORIZACIÓN DE INSCRIPCIÓN A PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA



PI-A-MEC

Trimestre en que se autoriza la propuesta: 18 I Fecha: 5/4/ 2018 PI-A-MEC 013/18

### DATOS DEL ALUMNO

Nombre: Fermín Aguilar Gil Matrícula: 209331777

Correo personal: fermon22@gmail.com

Firma

### ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa: Dr. Rubén Dorantes Rodríguez

No. económico: 5735 Adscripción/Departamento/Sección: Energía

Área de investigación: Termofluidos / Energía

Correo institucional: rjdr@correo.azc.uam.mx

Firma

### COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal: Dr. José Luis Contreras Larios

No. económico/Teléfono: Adscripción/Puesto: Energía

Área de investigación/Departamento: Procesos de la Industria Química

Correo electrónico: jlcl@correo.azc.uam.mx

Firma

### MODALIDAD DEL PROYECTO

Proyecto tecnológico  Proyecto de investigación  Estancia profesional  Experiencia profesional

### TÍTULO DEL PROYECTO

Diseño y evaluación de un concentrador solar parabólico para la producción de hidrógeno

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación:  No  Sí Clave (?):

### OBJETIVO GENERAL

Diseñar y evaluar energéticamente un concentrador solar de tipo parabólico para la producción termoquímica de hidrógeno.

### UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100118	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I	SI	Inicio
1100128	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica II		18 P
1100138	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Mecánica		Término
			18 O

Nombre y firma del Coordinador de Estudios

Ing. Romy Pérez Moreno



Originales: Coordinador de Estudios, Coordinación de Sistemas Escolares.  
Copias: Alumno; Asesor(es).

Revisión: Febrero 2016

## Resumen

En este trabajo se muestran los resultados de una simulación óptica y térmica para un concentrador solar parabólico con datos puntuales de las ciudades de Hermosillo Sonora y Ciudad de México, obtenidos del Sistema Meteorológico Nacional de la CONAGUA. El diseño se planteó para proporcionar una alternativa solar y renovable para la generación de Hidrógeno limpio.

Los resultados obtenidos muestran que el concentrador solar parabólico puesto en la ciudad de Hermosillo Sonora logra alcanzar una temperatura de operación superior a los 600°C y un funcionamiento de cerca de 7 horas de calor útil para la reacción y así generar Hidrógeno limpio, mientras que con la misma configuración en cuanto a concentración solar pero simulado en la ciudad de México se obtuvo un perfil de temperatura superior a los 600°C de alrededor de 4 horas de funcionamiento.

Por último se analizaron tres perfiles de temperatura para la opción Ciudad de México en tres diferentes días escogidos al azar, a fin de elegir la configuración que tuviera mayor número de horas de calor útil de reacción a temperaturas superiores a los 600°C.

## Contenido

Agradecimientos:.....	2
Declaratoria.....	3
Declaratoria.....	4
Declaratoria.....	5
Formato PI-A.....	6
Resumen.....	7
Contenido.....	8
Índice de Figuras.....	10
Índice de Tablas.....	11
Capítulo 1. Introducción. ....	12
1.1 Planteamiento del problema.....	12
1.2 Antecedentes. ....	13
1.3 Objetivos. ....	17
Objetivo General. ....	17
Objetivos Específicos.....	17
1.4 Justificación.....	18
Capítulo 2. Marco teórico.....	19
2.1 Disponibilidad de la Energía Solar en México. Principales aplicaciones térmicas. .....	19
2.1.2 Importancia del uso del hidrógeno como energético. ....	24
2.1.2.1 Procesos de obtención de Hidrógeno Limpio.....	25
2.1.2.2 Proceso Termoquímico para la obtención de Hidrógeno usando energía solar. ....	26
Capítulo 3. Tipos de concentradores solares.....	29
3.1 Clasificación de concentradores solares.....	29
3.1.1 Factor de concentración.....	31
3.1.2 Ángulo de apertura.....	32
3.2 Diseño de un Concentrador Solar parabólico de revolución.....	32
3.2.1 Área del paraboloide, altura y foco.....	38
Capítulo 4 Desarrollo del Proyecto.....	39
Diseño térmico de un concentrador paraboidal.....	39



4.1 Balance de energía Térmica en la generación de Hidrógeno usando un reactor como absorbedor en el punto focal .....	39
4.1.1 Ganancias de energía en un proceso termoquímico de calentamiento.....	40
4.1.2 Perdidas de energía en un proceso termoquímico de calentamiento.....	41
4.1.2.1 Convección, Emisión, conducción, Energía de reacción. ....	42
Capítulo 5. Resultados .....	44
Estudio numérico de un concentrador paraboidal para la producción termoquímica de hidrógeno para las ciudades de Hermosillo y ciudad de México. ....	44
5.1 Bases de datos meteorológicos utilizados.....	44
5.2 Algoritmo de resolución del modelo matemático y condiciones iniciales utilizadas. ....	48
5.3 Análisis dinámico del comportamiento térmico del absorbedor.....	50
Capítulo 6 Análisis y discusión de Resultados .....	53
Conclusiones.....	57
Referencias bibliográficas. ....	58
Entregables .....	60

## Índice de Figuras

Figura 1 Angulo solar y rotación del sistema de referencia adoptado en este estudio .....	13
Figura 2 Principales contribuciones responsables del calentamiento de la muestra (sólido) insertadas en el Punto Focal. ....	14
Figura 3 Paraboloide final con material reflejante Reflec Tech. [3] .....	15
Figura 4 Típico Sistema Disco Stirling [4].....	16
Figura 5. Mapa de Irradiación Solar, México, kWh/m <sup>2</sup> al día. ....	19
Figura 6 Concentración de radiación solar mediante un espejo parabólico. [11] ..	21
Figura 7 Concentrador de canal parabólico de las plantas SEGS, en Kramers Junction, California, EUA. ....	22
Figura 8 Sistema Fresnel lineal FRESDEMO (visto desde el receptor), en la Plataforma Solar de Almería, España .....	23
Figura 9 Sistemas de plato parabólico de la empresa Stirling Energy Systems....	23
Figura 10 Planta demostrativa de torre central Solar One, en Barstow, California. ....	24
Figura 11 El hidrógeno puede operar en un ciclo cerrado e inagotable basado en las sustancias más limpias, abundantes y elementales: agua, oxígeno e hidrógeno. [12] .....	25
Figura 12 Materias primas y procesos para la producción de hidrógeno. [13] .....	26
Figura 13 Diagrama de flujo de las instalaciones de ESR. [2].....	27
Figura 14 Reactor tubular para ESR. [2] .....	28
Figura 15 Reactor previo a empaque catalítico[2].....	28
Figura 16 Sistemas de Concentradores Lineales de Fresnel (RLF), Sistemas de receptor central o torre solar, Sistemas de Disco Parabólico, Canales parabólicos [14] .....	31
Figura 17 Área de apertura y del receptor del paraboloide. [8] .....	32
Figura 18 Geometría de una parábola en coordenadas polares. [8] .....	33
Figura 19 Primer teorema de Pappus –Guldin .....	34
Figura 20 Balance de energías. [8] .....	39
Figura 21 Colector de concentración de disco parabólico [15].....	41
Figura 22 Diagrama de flujo del código empleado para la simulación del balance Termodinámico del reactor.....	49
Figura 23 Perfil de temperatura del reactor evaluado en cuatro ciudades .....	50
Figura 24. Perfil de temperatura día favorable Hermosillo Sonora.....	51
Figura 25 Perfil de temperatura día favorable ciudad de Cuernavaca Morelos....	51
Figura 26 Perfil de temperatura día favorable Ciudad de México.....	52
Figura 27 Perfil de temperatura día favorable Ciudad de Morelia Michoacán.....	53
Figura 28 Perfil parabólico día 21/Septiembre/2018 CDMX.....	54
Figura 29 Perfil parabólico día 5/Octubre/2018 CDMX .....	55
Figura 30 Perfil parabólico día 24/Septiembre/2018 CDMX.....	55

## Índice de Tablas

Tabla 1 Radiación solar en lugares selectos de México (datos en kWh/m <sup>2</sup> por día). .....	20
Tabla 2 Comparación entre principales tecnologías para energía solar térmica de concentración. [14] .....	29
Tabla 3 Datos proporcionados por Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), del 18 de Junio de 2018, Estación Hermosillo Sonora, día escogido arbitrariamente. .....	44
Tabla 4 Datos proporcionados por Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), del 21 de Septiembre de 2018, Estación Ciudad de México, día escogido arbitrariamente. ....	46
Tabla 5 Parámetros simulación CDMX .....	53
Tabla 6 Resultados Simulación 24/10/2018 CDMX.....	56

## Capítulo 1. Introducción.

México no sólo tiene el reto de satisfacer una demanda creciente de energía, sino de hacerlo con medios de producción y de transformación limpios. Esto es, desarrollar tecnologías de producción de “combustibles solares” basadas en procesos totalmente independientes de la utilización de combustibles fósiles.

Los “combustibles solares” como la producción de hidrógeno utilizando un proceso químico donde la energía consumida es de origen térmico-solar, puede usarse de diferentes maneras: ‘mejorando’ los combustibles fósiles que se queman para generar calor, utilizándolos directamente en quemadores, en turbinas o motores para producir electricidad o movimiento, o usándolos para generar electricidad en pilas de combustible y baterías.

Básicamente hay tres rutas para producir hidrógeno a partir de la energía solar:

- Electroquímico: electricidad solar obtenida a partir de sistemas fotovoltaicos o termosolares de concentración seguido de un proceso electrolítico
- Fotoquímico/fotobiológico: uso directo de la energía de los fotones solares para procesos fotoquímicos y fotobiológicos.
- Termoquímico: calor solar a altas temperaturas seguido de un proceso termoquímico endotérmico. [1]

### 1.1 Planteamiento del problema.

El alcance de este proyecto es diseñar un concentrador solar de disco parabólico capaz de proporcionar la energía térmico-solar necesaria para producir hidrógeno “limpio”, utilizando un proceso termoquímico ya desarrollado en la UAM-A [2]. El diseño del concentrador solar se hará utilizando datos meteorológicos y de irradiación solar de dos ciudades, Hermosillo Sonora y Ciudad de México.

## 1.2 Antecedentes.

Andrea Giotri, Ennio Macchi, "An advanced solution to boost sun-to-electricity efficiency of parabolic dish." Volume 139, 1 December 2016, Pages 337-354

*Abstract- This paper investigates the coupling of parabolic dish concentrator with air micro gas turbine engine (net power output equal to 32.9 kWel). With the aim of increasing the conversion efficiency of the incoming solar radiation, a high temperature system (up to 1100 °C) has been considered: this solution implies the adoption of a ceramic expander coupled with a high temperature indirectly-irradiated solar receiver. A flexible Matlab suite has been developed for the plant sizing and for the part-load simulation; in addition, the model is able to handle general solar field configurations through the computation of reciprocal shading effect. The obtained yearly sun-to-electric efficiency (26.48%) reveals the energetic advantage over other CSP technologies that can mitigate the technological issues and consequently higher investment cost, related to high operating temperatures. The potential of a hybrid version of the dish is also discussed.*

En este artículo encontramos un análisis del uso de un concentrador solar parabólico, así como un avance en la mejora de la eficiencia en cuanto a la conversión a energía eléctrica de la radiación solar entrante, se ha considerado un sistema de alta temperatura de hasta 1100 ° C. ( figura 1).

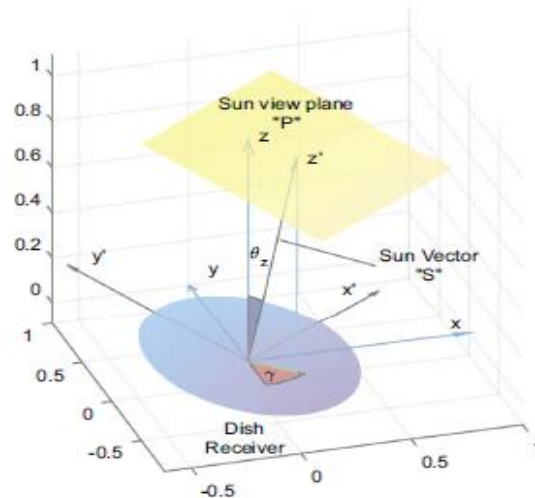


Figura 1 Angulo solar y rotación del sistema de referencia adoptado en este estudio

*Abstract- In recent years there has been a growing interest in renewable energy sources due to the increasing prices and the possible exhaustion of the current commercial energy reserves. The use of sunlight as an energy source offers a huge number of long-term benefits in widely varied and flexible applications. In the present work, the behavior of the temporal temperature in a specimen placed on the focal point of a parabolic dish solar concentrator was predicted, and a dimension quantity ( $\Omega$ ) was proposed. This parameter ( $\Omega$ ) correlates the diameter of the solar collector ( $D$ ) with the solid mass to be heated ( $M$ ) and the rate of solar irradiance ( $G$ ). The behavior of the Equilibrium Temperature as a function of  $\Omega$  was also investigated. Simulations were carried out by manipulating  $D$ ,  $M$  and  $G$ , and they were arranged according to a full factorial design. The simulation results obtained showed that temperatures up to 1,600 °C can be achieved in relatively short periods of time, and they also indicated that the solar concentrator studied in this work can be an alternative to provide thermal energy for high temperature applications.*

En el artículo anterior los resultados de la simulación obtenidos mostraron que se pueden alcanzar temperaturas de hasta 1.600 °C en períodos de tiempo relativamente cortos, y también indicaron que el concentrador solar estudiado en este trabajo puede ser una alternativa para proporcionar energía térmica para aplicaciones de alta temperatura.

El hidrógeno es un combustible ideal, ya que puede ser transformado en calor, energía mecánica, o energía eléctrica. La tecnología limpia e innovadora del hidrógeno se obtiene a partir de la síntesis de compuestos renovables como el bioetanol en presencia de catalizadores metálicos mediante procedimientos termoquímicos. Actualmente se ha desarrollado un catalizador para la reacción de reformación de etanol con vapor de agua (ESR) a base de un catalizador bimetálico Ni-Co-Hidrotalcita-WOx (HTB-3) que ha demostrado alta selectividad a H<sub>2</sub> (figura 2). [2]

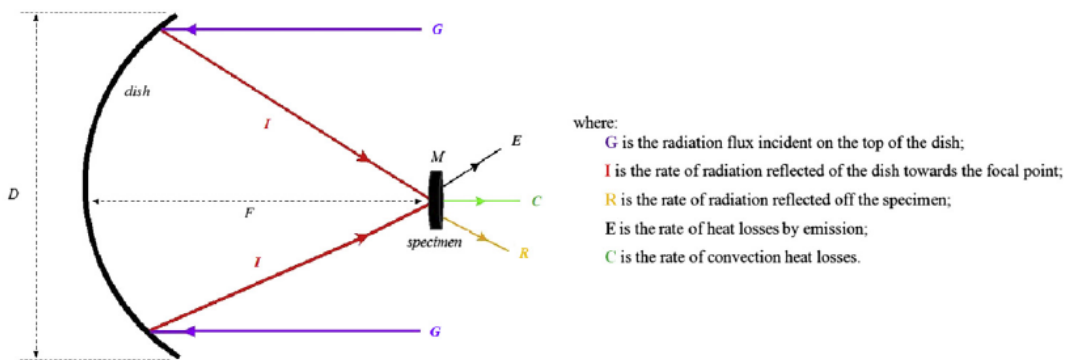


Figura 2 Principales contribuciones responsables del calentamiento de la muestra (sólido) insertadas en el Punto Focal.

La energía solar se puede aprovechar de muchas formas, de entre ellas, la concentración solar de alta temperatura ofrece soluciones técnica y económicamente factibles tanto electricidad como para calor industrial. Entre las tecnologías de concentración, el concentrador de disco parabólico permite obtener temperaturas por encima de los 400°C, y pueden ser utilizadas para activar un motor Stirling o un proceso de recuperación de aluminio.

Este proyecto tiene como objetivos principales el diseño y la construcción de un disco parabólico para concentración solar y la caracterización de un receptor para diversas posibles aplicaciones futuras.

La geometría empleada para reflejar los rayos solares hacia el receptor, es decir la geometría del plato parabólico, es una parte medular de este trabajo. De esto depende la relación de concentración del sistema y el máximo aprovechamiento de la energía solar (figura 3). [3]



*Figura 3 Paraboloide final con material reflejante Reflec Tech. [3]*

En este estudio se muestra el potencial energético que se puede obtener de los concentradores parabólicos, los mismos que guardan ciertas consideraciones geométricas respecto a su receptor, de modo que se logre la máxima eficiencia óptica. Se emplea una antena parabólica en desuso de 1.8m diámetro, la cual es un concentrador puntual que deberá ser recubierta de un material de un material altamente reflectivo, como es la película de aluminio, de esa forma se puede obtener el calor necesario en el absorbedor de un motor Stirling. [4]

Uno de los sistemas de generación térmica solar de alta temperatura son los sistemas concentradores disco-parabólicos, que al interrelacionarlo con un motor de ciclo Stirling con un generador en su salida mecánica, se obtiene la transformación de la energía térmica en mecánica y ésta en eléctrica.

Tanto en Europa como en EE.UU. se han construido unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco del concentrador parabólico, con potencias entre 1 y 25 kW.

Según documentos de referencias y bajo determinadas condiciones se obtienen rendimientos que llegan a máximos de hasta 30%, siendo su valor promedio alrededor del 20 %.

Estos sistemas Disco-Stirling presentan una alta eficiencia en la conversión de la radiación solar en energía eléctrica, alcanzando entre el 25 al 30% en condiciones nominales de operación.

Para alcanzar estos valores de rendimientos se deben obtener relaciones de concentración entre 2500 y 3500, lo que permite alcanzar temperaturas en el receptor del motor entre los 650 y 850°C, con eficiencias nominales puntuales en los motores Stirling entre 30-40% (figura4), lo que podría convertir a estos sistemas de generación eléctrica en uno de los más eficientes dentro de las aplicaciones de energías renovables. [5]



*Figura 4 Típico Sistema Disco Stirling [4]*

En el contexto mundial, el proyecto europeo FotoH<sub>2</sub>, coordinado por la Universidad de Alicante (España) se centra, precisamente, en el diseño y desarrollo de un dispositivo fotoelectroquímico capaz de producir la conversión directa de energía solar en energía química contenida en los enlaces de las moléculas de hidrógeno. [6]

El fabricante neerlandés de pintura y químicos AkzoNobel y el operador de redes de gas Gasunie planean construir la mayor planta “verde” de producción de hidrógeno de Europa. Usará una unidad de electrólisis de agua de 20 megavatios para convertir electricidad sustentable en hidrógeno. Esperan usar excedentes de



energía eólica y solar para crear hidrógeno, que posteriormente puede ser almacenado para reconversión a energía o para uso industrial directo. [7]

En 2015, Iván Rafael Martínez Cervantes alumno de Maestría de Procesos de la UAM Azcapotzalco, realizó el Estudio de un reactor de lecho catalítico para la producción de hidrógeno a partir de bioetanol. Obtuvo como resultado la evaluación del catalizador a tres diferentes temperaturas (450°C, 500°C y 550°C). [2].

En 2015 Ángela M. Jaramillo Granada y Nathaly Daza Ramírez, realizaron el diseño de una estufa solar con forma de un paraboloide de revolución, además de su análisis óptico, energético y térmico. Experimentalmente y utilizando aceite térmico, se alcanzó una temperatura de 180°C en el receptor [8]. Este trabajo servirá de base para el diseño del paraboloide y del receptor (reactor) que se utilizará para llevar a cabo la reacción termoquímica para la producción del hidrógeno.

## 1.3 Objetivos.

### Objetivo General.

- Diseñar y evaluar energéticamente un concentrador solar de tipo parabólico para la producción termoquímica de hidrógeno.

### Objetivos Específicos.

- Definir los parámetros de diseño para la construcción de un concentrador solar (geometría, tamaño, materiales de construcción y temperaturas de operación).
- Evaluar dos modelos físicos de simulación de un concentrador solar: un modelo óptico para el diseño del plato paraboidal y un modelo térmico para calcular la temperatura del absorbedor termoquímico.
- Desarrollar el programa de cálculo óptico y térmico, así como calcular la variación temporal de temperatura del absorbedor termoquímico, usando datos meteorológicos reales.
- Determinar la producción de hidrógeno y el costo, por el proceso de reformado catalítico de etanol calentado por el concentrador solar.

Compararlo contra el costo de suministro de electricidad con precios de la CFE o utilizando un combustible fósil.

## 1.4 Justificación.

“El problema del incremento en el precio de la gasolina en México se superpone al alza del petróleo a nivel mundial, por ello el costo de nuestros combustibles está sujeto al mercado internacional.” Dr. Claudio Estrada Gasca [8].

No obstante, aun si produjéramos combustibles similares a la gasolina, en el futuro el vector hidrógeno será importante y su producción a partir de energía solar concentrada cobrará mucha importancia. El ser humano ya no dependerá tanto de los hidrocarburos para quemarlos sino para aprovecharlos en productos de mayor valor agregado.

El sol es una fuente que está disponible todos los días, y por lo tanto la producción del hidrógeno dependerá de fuentes como el bioetanol o la glicerina.

El empleo masivo de energéticos sostenibles beneficiaría la economía del país, dándole seguridad a los precios de los energéticos y garantizando su abasto.

Una de las problemáticas que tienen las fuentes renovables de energía es su baja densidad y su almacenamiento. Esto en contraste con los hidrocarburos y la energía nuclear que son de alta densidad y cuyo almacenamiento es intrínseco a la fuente. Por ello, una de las tecnologías de energías renovables más promisorias es la tecnología de concentración solar para la producción de electricidad y de “combustibles solares”. [9]

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1 Disponibilidad de la Energía Solar en México. Principales aplicaciones térmicas.

El sol está jugando un papel cada vez más importante en nuestra economía, y puede llegar a ser una fuente de empleos para nuestro país. Actualmente en México es posible hacer uso de la energía eléctrica generada por el uso de paneles fotovoltaicos o sistemas de concentración solar utilizando la radiación directa, y existen mecanismos concretos para lograr que la inversión sea rentable.

Considerando la capacidad energética del Sol, la cual perdurará durante millones de años, así como la privilegiada ubicación de México en el globo terráqueo, la cual permite que el territorio nacional destaque en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual con índices que van de los 4.4 kWh/m<sup>2</sup> por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m<sup>2</sup> por día en el norte del país, ver figura 5. Resulta fundamental la adopción de políticas públicas que fomenten el aprovechamiento sustentable de la energía solar en nuestro país.

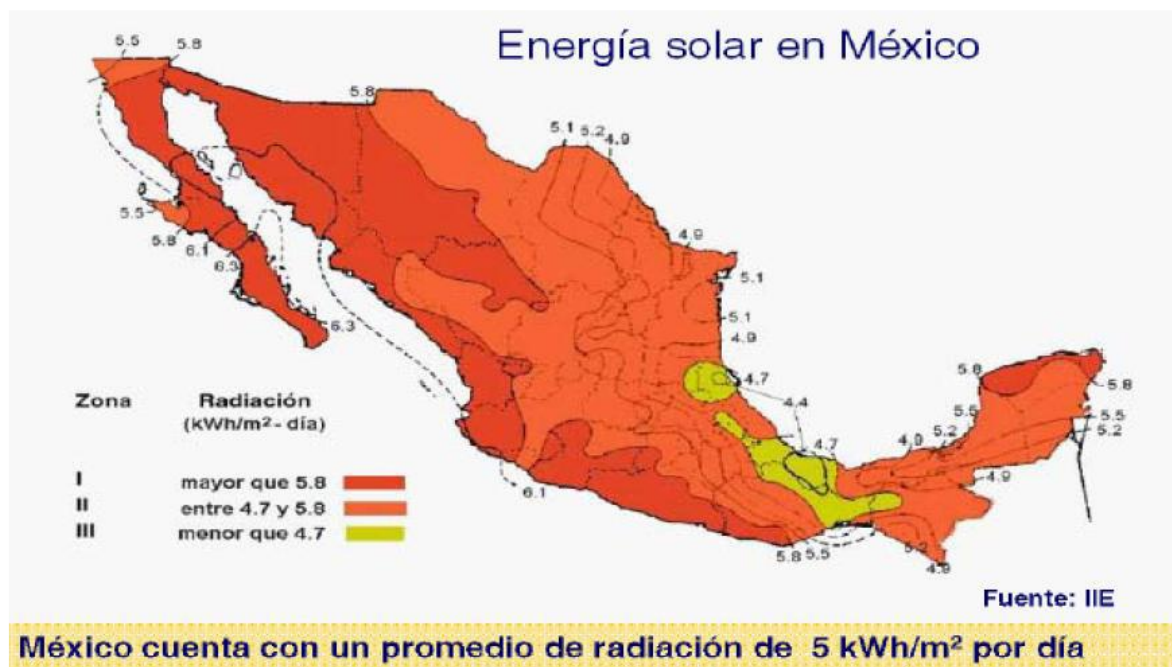


Figura 5. Mapa de Irradiación Solar, México, kWh/m<sup>2</sup> al día.

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas

México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo. La mitad del territorio nacional presenta una insolación promedio de 5.3 KWh por metro cuadrado al día, suficiente para satisfacer la necesidad de un hogar mexicano promedio. Esto nos coloca en una situación muy favorable para el uso de la energía solar (tabla 1).

Tabla 1 Radiación solar en lugares selectos de México (datos en kWh/m<sup>2</sup> por día).

Estado	Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Sonora	Hermosillo	4.0	4.6	5.4	6.6	8.3	8.5	6.9	6.6	6.7	6.0	4.7	3.9	6.0
Sonora	Guaymas	4.5	5.7	6.5	7.2	7.3	6.8	5.9	5.8	6.3	5.9	5.0	5.6	5.9
Chihuahua	Chihuahua	4.1	4.9	6.0	7.4	8.2	8.1	6.8	6.2	5.7	5.2	4.6	3.8	5.9
SLP	SLP	4.3	5.3	5.8	6.4	6.3	6.1	6.4	6.0	5.5	4.7	4.2	3.7	5.4
Zacatecas	Zacatecas	4.9	5.7	6.6	7.5	7.8	6.2	6.2	5.9	5.4	4.8	4.8	4.1	5.8
Guanajuato	Guanajuato	4.4	5.1	6.1	6.3	6.6	6.0	6.0	5.9	5.8	5.2	4.8	4.6	5.6
Aguascalientes	Aguascalientes	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	6.3	6.1	5.9	5.7	5.1	4.8	4.0	5.6
Oaxaca	Salina Cruz	5.4	6.3	6.6	6.4	6.1	5.0	5.6	5.9	5.2	5.9	5.7	5.2	5.8
Oaxaca	Oaxaca	4.9	5.7	5.8	5.5	6.0	5.4	5.9	5.6	5.0	4.9	4.8	4.4	5.3
Jalisco	Colotlán	4.6	5.7	6.5	7.5	8.2	6.6	5.8	5.6	5.8	5.3	4.9	4.1	5.9
Jalisco	Guadalajara	4.6	5.5	6.3	7.4	7.7	5.9	5.3	5.3	5.2	4.9	4.8	4.0	5.6
Durango	Durango	4.4	5.4	6.5	7.0	7.5	6.8	6.0	5.6	5.7	5.1	4.8	3.9	5.7
Baja California	La Paz	4.4	5.5	6.0	6.6	6.5	6.6	6.3	6.2	5.9	5.8	4.9	4.2	5.7
Baja California	San Javier	4.2	4.6	5.3	6.2	6.5	7.1	6.4	6.3	6.4	5.1	4.7	3.7	5.5
Baja California	Mexicali	4.1	4.4	5.0	5.6	6.6	7.3	7.0	6.1	6.1	5.5	4.5	3.9	5.5
Querétaro	Querétaro	5.0	5.7	6.4	6.8	6.9	6.4	6.4	6.4	6.3	5.4	5.0	4.4	5.9
Puebla	Puebla	4.9	5.5	6.2	6.4	6.1	5.7	5.8	5.8	5.2	5.0	4.7	4.4	5.5
Hidalgo	Pachuca	4.6	5.1	5.6	6.8	6.0	5.7	5.9	5.8	5.3	4.9	4.6	4.2	5.4

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Pese a que los niveles de irradiación en el noroeste del país son ideales para instalar un campo de concentradores solares con base en espejos en forma de canal parabólico y así generar electricidad, hasta la fecha no se ha aprovechado esta posibilidad como debiera.

Sonora recibe una insolación mayor a los 6 KWh/m<sup>2</sup>/día promedio, y resulta que, aunque eso es apenas un kilowatt hora más que el promedio nacional, lo coloca en la lista de los estados con mayor potencial eléctrico. [10]

Para concentrar la radiación solar implica generalmente captarla en un área grande de espejos, que desvíen los rayos de luz y los concentren en un área más pequeña, para aumentar así la densidad de flujo de la radiación (figura 6). A partir de los principios de la física (segunda ley de la termodinámica), se sabe que se puede concentrar la luz solar hasta un máximo de 45,000 veces, que en términos de sistemas prácticos se reduce hasta un unas 10,000 veces. Este nivel de

concentración nos permite alcanzar temperaturas cercanas a 3000°C, suficiente para la vasta mayoría de las aplicaciones que uno pudiera imaginar.

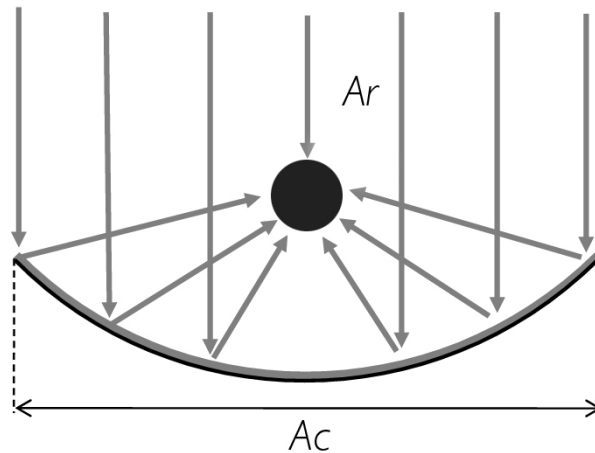


Figura 6 Concentración de radiación solar mediante un espejo parabólico. [11]

Existen diversas tecnologías para concentrar la radiación solar. Cada una de ellas tiene su nicho de aplicación dependiendo principalmente del nivel de temperaturas que permite alcanzar. Las aplicaciones solares térmicas se caracterizan por diferentes requerimientos de temperatura; en términos muy generales: calentamiento de agua para albercas; uso sanitario y climatización de espacios (27-60°C); cocción de alimentos (90-120°C); calor para procesos industriales (40-250°C); refrigeración y aire acondicionado solar (85-200°C); generación termosolar de potencia eléctrica (250-1000°C), y producción de combustibles como el hidrógeno o gas de síntesis (500-2500°C).

Probablemente el ejemplo más notorio de la utilización de tecnologías de concentración solar sean las plantas termosolares de generación de potencia eléctrica. El principio general es el siguiente: en muchas plantas termoeléctricas la electricidad se produce haciendo pasar vapor a presión a través de turbinas, produciendo con esto energía mecánica, que a su vez permite mover generadores eléctricos. El calor requerido para producir este vapor puede ser suministrado mediante la quema de combustibles como petróleo, gas o carbón, o bien mediante reactores nucleares, o por supuesto, mediante radiación solar concentrada. Existen diferentes tipos de plantas de concentración solar para la producción de electricidad, que se clasifican en cuatro tecnologías principales: canal parabólico, Fresnel lineal, disco parabólico y torre central.

En la tecnología de canal parabólico, como su nombre lo indica, se utilizan espejos alargados que forman una canaleta con perfil parabólico (figura 7). El receptor donde se enfoca la energía es un tubo que corre a lo largo del foco de la parábola. En este receptor la energía solar es absorbida y transformada en calor, el

cual es removido por un fluido que circula en el interior del tubo. Este fluido puede ser un aceite térmico, sales fundidas o alguna otra sustancia con buena capacidad calorífica, buena estabilidad a alta temperatura y con suficiente fluidez para poder ser bombeada a lo largo de grandes longitudes de tubo. Incluso se ha llegado a circular agua por el receptor para producir directamente el vapor, aunque esto presenta mayor complejidad técnica.



*Figura 7 Concentrador de canal parabólico de las plantas SEGS, en Kramers Junction, California, EUA.*

En particular, los canales parabólicos tienen un nivel de concentración intermedio (hasta unos 40 soles) y requieren seguimiento en una sola dirección. Se suelen ubicar de manera que su eje focal (definido por el tubo receptor) corra en la dirección este-oeste. De este modo, el giro para seguir al sol se da sólo en la dirección norte-sur, variando la inclinación de la parábola para ajustarse a la altura del sol respecto del sur.

La tecnología de Fresnel lineal es similar a la de canal parabólico en el sentido de que ambas son tecnologías de foco lineal, es decir, donde el receptor es muy largo. Los niveles de concentración que se alcanzan son similares en ambos casos, pero la manera de conseguirlos es bastante diferente: en la tecnología de Fresnel lineal el foco se encuentra en una estructura fija elevada (figura 8), la cual es iluminada por tiras de espejo largas y estrechas, cada una de las cuales tiene su propia inclinación y se mueve por separado para mantener los rayos del sol incidiendo en el foco fijo. Esto contrasta con el canal parabólico, donde el receptor suele moverse junto con toda la estructura del concentrador.



*Figura 8 Sistema Fresnel lineal FRESDEMO (visto desde el receptor), en la Plataforma Solar de Almería, España*

La tercera tecnología de generación eléctrica, es la de disco parabólico tipo Stirling. De aspecto similar a las antenas de telecomunicaciones, dichos discos son espejos de perfil parabólico, que enfocan la radiación solar en un receptor de tamaño reducido localizado en el foco de la parábola (figura 9). A diferencia de las dos anteriores, esta tecnología es de foco puntual, ya que la zona donde se concentra la radiación es idealmente un punto. En general, los sistemas de foco puntual permiten alcanzar concentraciones y temperaturas mayores a los de foco lineal; mientras estos últimos tienen niveles de concentración de entre 15 y 40 soles y operan a temperaturas cercanas a 300°C, los primeros alcanzan niveles de concentración cercanos a 1000 soles y operan hasta a 1000°C.



*Figura 9 Sistemas de plato parabólico de la empresa Stirling Energy Systems.*

La generación de electricidad con concentradores de disco parabólico se basa en el uso del motor Stirling, inventado por el Reverendo escocés Joseph Stirling en 1816.

La tecnología de torre central es de algún modo el equivalente a la tecnología de Fresnel lineal, pero en foco puntual. Una planta de este tipo consiste de un gran campo de helióstatos que concentran la radiación solar en lo alto de una torre (figura 10), donde se encuentra el receptor. Los helióstatos son espejos planos que se mueven continuamente para dirigir el reflejo solar hacia el receptor, y cuyos tamaños

máximos llegan a ser de alrededor de 120 metros cuadrados. Aquí hay muchas tecnologías diferentes en investigación para los receptores. Se puede calentar aire, aceite, sales fundidas y partículas sólidas. En todos los casos, el fluido térmico no necesita circular por distancias muy grandes antes de ser utilizado, como en el canal parabólico o el Fresnel lineal, pues el bloque térmico de la planta se suele encontrar en la base de la torre (con alturas máximas de alrededor de 100 m).



*Figura 10 Planta demostrativa de torre central Solar One, en Barstow, California.*

En particular, mediante los concentradores solares se pretende solucionar la limitación que impone la densidad energética de la radiación solar, para permitir su utilización en aplicaciones como la generación de potencia eléctrica en gran escala o la producción de combustibles limpios, como el hidrógeno. [11]

### 2.1.2 Importancia del uso del hidrógeno como energético.

Motivado por el agotamiento de los combustibles fósiles, las emisiones de gases nocivos procedentes de los motores de combustión, el aumentando la demanda mundial de energía y la distribución no homogénea de los recursos energéticos, actualmente se han dirigido numerosos esfuerzos a usar fuentes de energías sostenibles y renovables y desarrollar nuevas y más eficientes tecnologías para la producción de energía. Entre ellas, el hidrógeno y las pilas de combustible están recibiendo cada vez más atención como nuevas herramientas para la gestión de la energía. [13]

El hidrógeno cuesta un poco más que los combustibles fósiles, pero va a ser competitivo, ofreciendo beneficios únicos: combustión limpia, posiblemente eliminando las emisiones de CO<sub>2</sub> y operando en un ciclo cerrado e inagotable basado en las sustancias más limpias, abundantes y elementales: agua, oxígeno e hidrógeno (figura 11); utilización más eficiente, requiriendo menos mantenimiento y produciendo menos ruido; más descentralizado y menos vulnerable que los sistemas actuales al terrorismo, desastres naturales y problemas de suministro. Mientras que existen alternativas al hidrógeno que se pueden usar en algunas



aplicaciones particulares (por ejemplo, automóviles eléctricos para viajes cortos), el hidrógeno es una alternativa económica a los combustibles fósiles que se puede usar en forma global en todos los modos de transporte (automóviles, camiones, aviones y barcos). [12]



Figura 11 El hidrógeno puede operar en un ciclo cerrado e inagotable basado en las sustancias más limpias, abundantes y elementales: agua, oxígeno e hidrógeno. [12]

El hidrógeno es capaz de proporcionar más energía térmica por unidad de masa que cualquier otro combustible conocido: 33,3 kWh por kg, frente a los 13,1 kWh del gas natural o los 12,4 kWh de la gasolina, por ejemplo (datos de energía específica). Es uno de los pocos portadores de energía con emisiones asociadas cercanas a cero (el subproducto de su utilización es el agua), junto con la electricidad y las nuevas generaciones de biocombustibles. [13]

La configuración que la economía del hidrógeno va a adquirir en los próximos 50 años depende de muchos factores, tanto conocidos como desconocidos. Sin embargo, es posible delinear sus características principales.

Al menos cuatro modelos de desarrollo que existen, dependiendo de si 1) el hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles o a partir de fuentes de energía que no generan  $CO_2$ , y 2) si se produce el hidrógeno en pequeña escala en el punto de utilización o a gran escala en una estación central y de ahí se distribuye. Entre ellos están: Modelo 1. Producción de hidrógeno nuclear a gran escala, Modelo 2. Producción centralizada de hidrógeno a partir de combustibles fósiles con captura del  $CO_2$  producido. Modelo 3. Hidrógeno a partir de gas natural a pequeña escala. Modelo 4. Hidrógeno a partir de energía renovable a pequeña escala. [12]

### 2.1.2.1 Procesos de obtención de Hidrógeno Limpio.

Existen diferentes procesos, así como las diferentes materias primas, para la producción de hidrógeno, dado que éste siempre está en forma combinada en la naturaleza. Las tecnologías disponibles incluyen procesos químicos, biológicos, electrolíticos, fotocatalítico y termoquímicos. Cada tecnología se encuentra en una etapa de desarrollo diferente, y su aplicación depende principalmente de la

disponibilidad local de materias primas, la madurez de la tecnología, las aplicaciones y la demanda del mercado y las políticas existentes. Una visión general de las diversas materias primas y tecnologías de proceso se presenta en la figura 12.

Actualmente, casi el 96% de todo el hidrógeno que se produce de manera artificial se obtiene a partir de combustibles fósiles, siendo el reformado con vapor de agua de gas natural el más usado (49%), junto con el reformado con vapor de agua o la oxidación parcial de las fracciones del petróleo (29%) y la gasificación del carbón (18%). Todos ellos procesos bien desarrollados, pero con una huella de carbono asociada. Sólo el 4% es producido mediante la electrólisis del agua. [13]

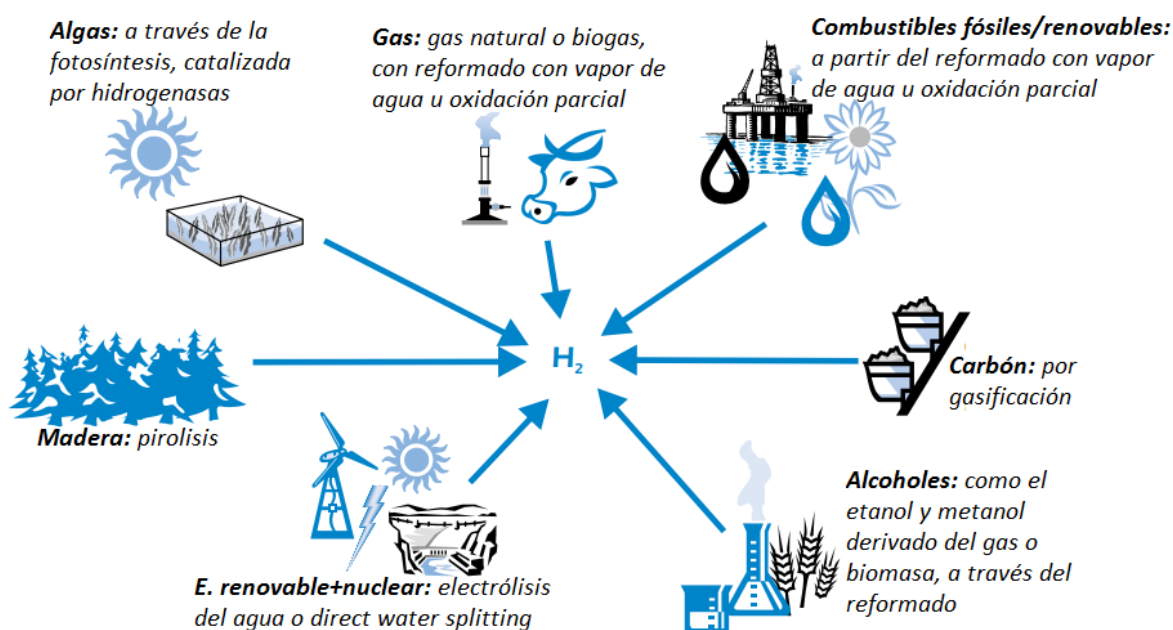


Figura 12 Materias primas y procesos para la producción de hidrógeno. [13]

### 2.1.2.2 Proceso Termoquímico para la obtención de Hidrógeno usando energía solar.

Procedimiento Termoquímico experimental.

La reacción catalítica se llevó a cabo en un reactor convencional de lecho fijo, tubular de acero inoxidable, con una longitud de 12 cm de lecho (Figura 13). El catalizador fue granulado en forma cilíndrica y se depositó una carga de 18g. La alimentación al reactor consistió de etanol, agua y  $N_2$  (Infra-Air Products) en fase gas con un espacio-velocidad WHSV de 118 h<sup>-1</sup>. La mezcla de agua y etanol se alimentó con una relación molar de 4/1 en presencia de una corriente de  $N_2$  usando

dos saturadores metálicos como se puede observar en el diagrama de flujo, la temperatura axial del reactor se midió con un termopar ubicado a la mitad del diámetro del reactor y la conversión se evaluó usando cinco puertos de muestreo soldados a lo largo de la pared del reactor. [2]

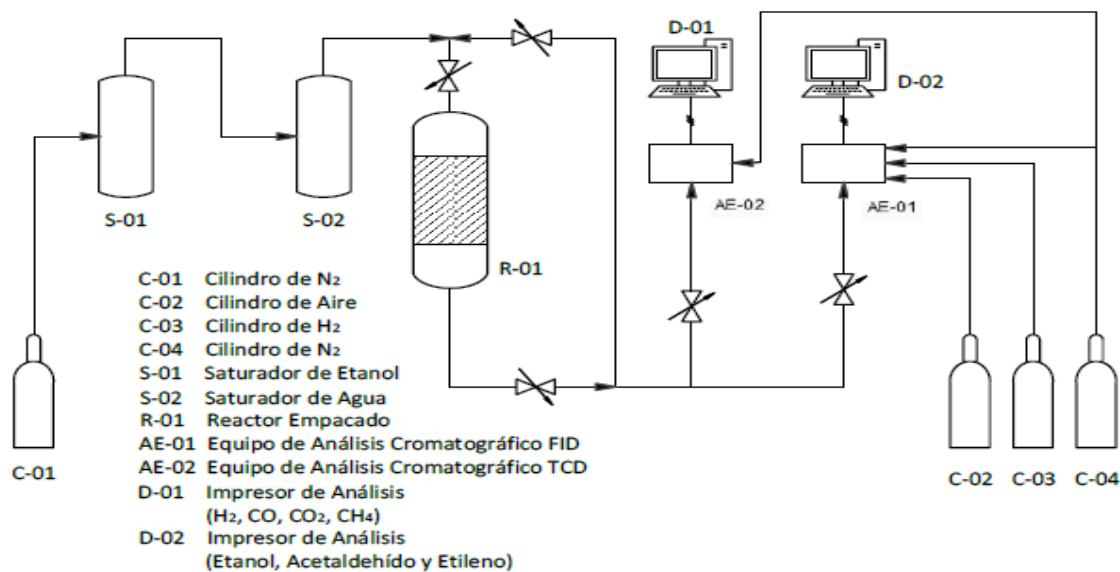


Figura 13 Diagrama de flujo de las instalaciones de ESR. [2]

La temperatura de activación del catalizador fue controlada a 450°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) en un flujo de H<sub>2</sub> por 30 min para limpiar y activar su superficie. Después de este paso se introdujo un flujo de N<sub>2</sub> (30 cm<sup>3</sup>/min) a fin de eliminar todo el gas H<sub>2</sub> remanente dentro del reactor.

La evaluación del catalizador se realizó a tres diferentes temperaturas de reacción: 450, 500 y 550°C. Se mantuvo al catalizador a la temperatura de reacción por 30 min para poder hacer tres análisis cromatográficos. Cada análisis de los reactivos y de los productos de reacción se hizo en línea con el cromatógrafo de gases. Con una válvula de inyección automática interior se dividió a la muestra en dos porciones que se analizaron para obtener una cuantificación completa de los productos de reacción. Se identificaron: H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> usando el detector de conductividad térmica (TCD) con una columna empacada de sílica gel 12 grado 60/80 (18 x 1/8 pulgadas) en un cromatógrafo Gow-Mac 550. Etanol, acetaldehído y etileno se analizaron en un cromatógrafo Varian 3800 con detector de ionización de flama (FID), usando una columna capilar (Varian, VF-1ms, 15 m, 0.25 mm, 0.25  $\mu\text{m}$ ). Se determinaron la conversión, selectividad y temperatura a lo largo del reactor. [2]

En base al diseño y construcción del reactor catalítico [2], se construyó el reactor tubular. En las figuras 14 y 15 se puede observar previo a su empacado e instalación en la unidad de reformado. En el catalizador bajo la forma de partículas (esferas o

cilindros) en las que las dimensiones varía de 0.1 a 1 cm esta mantenido fijo en el interior de uno o varios tubos que constituyen la envoltura del reactor.

El material utilizado fue acero inoxidable 316.



Figura 14 Reactor tubular para ESR. [2]



Figura 15 Reactor previo a empaque catalítico [2]

El diseño de un concentrador solar tipo parabólico para la producción termoquímica de hidrógeno será en función de suplir la energía necesaria para la producción termoquímica de hidrógeno que hasta ahora es mediante el uso de resistencias eléctricas, así dado que la energía solar, es una tecnología de bajo impacto ambiental y sin generar residuos peligrosos ni subproductos que puedan incidir en el cambio climático, entonces resulta muy atractiva para poder tener un proceso de producción de hidrógeno de bajo impacto ambiental.

## Capítulo 3. Tipos de concentradores solares.

### 3.1 Clasificación de concentradores solares.

Existen cuatro tecnologías comerciales de ESTC (Energía Solar Térmica de Concentración): sistemas de canales parabólicos y sistemas de concentradores lineales de Fresnel, que ambos son concentradores lineales y receptores centrales y sistemas de discos parabólicos, que son concentradores puntuales. Los sistemas de receptores centrales se denominan también torres centrales solares. (tabla 2 y figura 14.)

*Tabla 2 Comparación entre principales tecnologías para energía solar térmica de concentración. [14]*

<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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)</li> <li>Eficiencia neta anual de probado rendimiento de la planta del 14% (radiación solar a potencia eléctrica neta)</li> <li>Inversión y costes operativos probados comercialmente</li> <li>Modularidad</li> <li>Buen uso del terreno</li> <li>La menor demanda de materiales</li> <li>Concepto híbrido probado</li> <li>Capacidad de almacenamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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)</li> <li>Almacenamiento a altas temperaturas</li> <li>Posible operación híbrida</li> <li>Mejores para refrigeración en seco que los canales y Fresnel</li> <li>Mejores opciones para usar en lugares no llanos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eficiencias de conversión muy altas – conversión solar pico a electricidad neta de más del 30%</li> <li>Modularidad</li> <li>Integra de la forma más efectiva el almacenamiento térmico en una central grande</li> <li>Experiencia operativa de primeros proyectos de demostración</li> <li>Fácil fabricación y producción en serie de piezas disponibles</li> <li>No requiere agua para refrigerar el ciclo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ya disponible</li> <li>Pueden adquirirse espejos planos y doblarse in situ, menos costes de fabricación</li> <li>Posible operación híbrida</li> <li>Muy alta eficiencia solar alrededor del mediodía solar.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los valores anuales de rendimiento previstos, los costes de inversión y su operación necesitan pruebas a mayor escala en operaciones comerciales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No hay ejemplos de uso comercial a gran escala</li> <li>Objetivos de costes previstos de producción en serie aún por probar</li> <li>Menor potencial de disponibilidad para integración a la red</li> <li>Receptores híbridos aún en proceso de I+D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reciente entrada en el mercado, sólo hay pequeños proyectos operativos</li> </ul>

### Sistemas de Concentradores Lineales de Fresnel (LFR).

Un conjunto de reflectores casi planos concentra la radiación solar en receptores lineales invertidos elevados. El agua que fluye por los receptores se convierte en vapor. Este sistema es de concentración lineal, similar a un canal parabólico, con la

ventaja de su bajo coste en soporte estructural y reflectores, juntas fijas del fluido, un receptor separado del sistema de reflectores, y grandes longitudes focales que permiten utilizar espejos planos. Esta tecnología es contemplada como una alternativa potencial de menor coste a la tecnología de canales parabólicos para la producción de calor de proceso solar. (figura 14.1)

#### Sistemas de Receptor Central o Torre Solar.

Un conjunto circular de heliostatos (grandes espejos con sistemas de seguimiento solar) 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 sobrecalentado para la turbina. Hasta la fecha, los fluidos de transferencia térmica que se han desarrollado incluyen agua/vapor, sales fundidas y aire. Si se utiliza aire o gas a presión a temperaturas muy elevadas de unos 1000°C o más como medio de transferencia térmica, puede también utilizarse para sustituir directamente al gas natural en una turbina de gas, lo que saca el máximo partido del magnífico ciclo (60% y más) de los ciclos combinados modernos de gas y vapor. (figura 14.2)

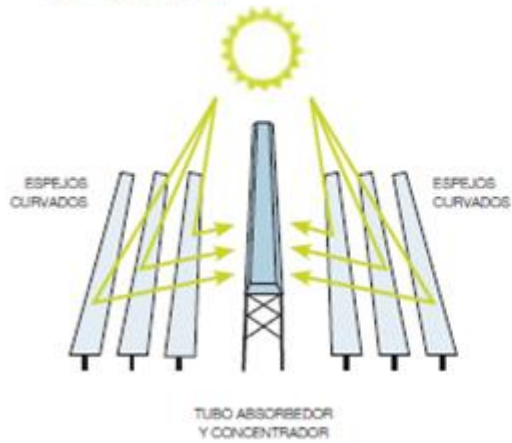
#### Sistemas de Disco Parabólico.

Un reflector parabólico en forma de disco concentra los rayos solares en un receptor situado en el punto focal de un disco. La radiación de los rayos concentrados se absorbe en el receptor para calentar un fluido o gas (aire) a unos 750°C. Este fluido o gas se utiliza para generar electricidad en un pequeño pistón o motor Stirling o una micro turbina, conectada al receptor. (figura 14.3)

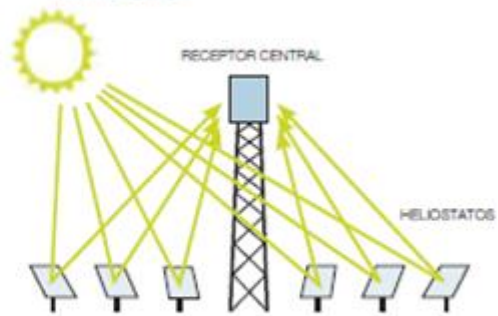
#### Canales Parabólicos.

Se utilizan reflectores de espejo en forma cilindro parabólico para concentrar la luz solar en tubos receptores térmicamente eficientes ubicados en la línea focal de la parábola. Normalmente los canales están diseñados para seguir el sol en un eje, predominantemente norte-sur. Se hace circular por esos tubos un fluido de transferencia térmica, como aceite térmico sintético. El fluido se calienta a unos 400°C mediante los rayos solares concentrados y se bombea por una serie de intercambiadores térmicos para producir un vapor sobrecalentado, que se convierte en energía eléctrica en un generador de turbinas de vapor convencional que puede formar parte de un ciclo de vapor convencional o integrarse en un ciclo combinado de turbinas de vapor y gas. (figura 14.4) [14]

14.1 SISTEMAS DE CONCENTRADORES LINEALES DE FRESNEL (LFR)



14.2 SISTEMAS DE RECEPTOR CENTRAL O TORRE SOLAR



14.3 SISTEMAS DE DISCO PARABÓLICO



14.4 CANALES PARABÓLICOS

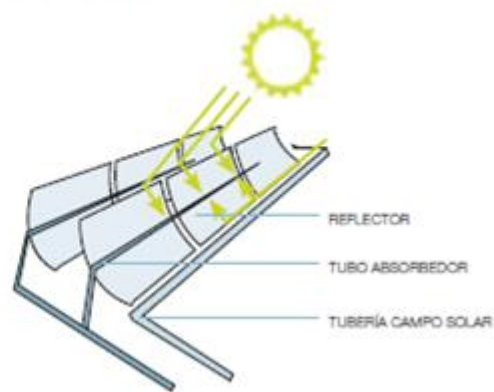


Figura 16 Sistemas de Concentradores Lineales de Fresnel (LFR), Sistemas de receptor central o torre solar, Sistemas de Disco Parabólico, Canales parabólicos [14]

### 3.1.1 Factor de concentración

El factor de concentración del área está dado con respecto a la concentración geométrica como la relación entre el área de apertura ( $A_a$ ) y el área del receptor ( $A_r$ ) (ver figura 15). [8]

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad \text{Ec. 1}$$

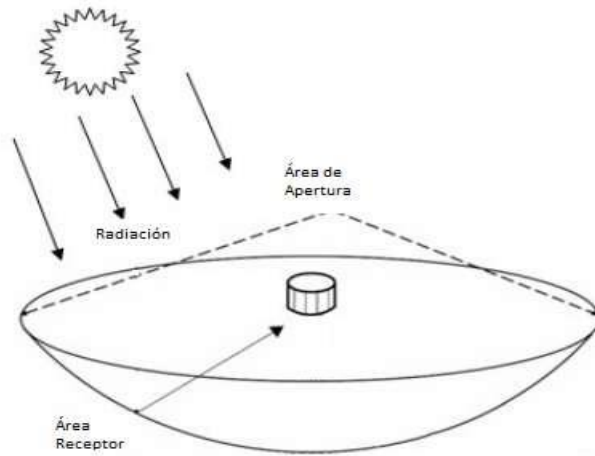


Figura 17 Área de apertura y del receptor del paraboloide. [8]

### 3.1.2 Ángulo de apertura.

Es el rango en el cual se encuentran los ángulos de incidencia de los rayos solares que son aceptados por el receptor solar sin necesidad de orientar el colector solar. [8]

### 3.2 Diseño de un Concentrador Solar parabólico de revolución.

Para calcular el área del paraboloide en revolución es necesario conocer la ecuación que describe la figura geométrica. [8]

$$x^2 = 4py \quad \text{Ec. 2}$$

Sin embargo, para facilitar los cálculos se hizo uso de las coordenadas polares, en tal caso se muestra en la figura 16:



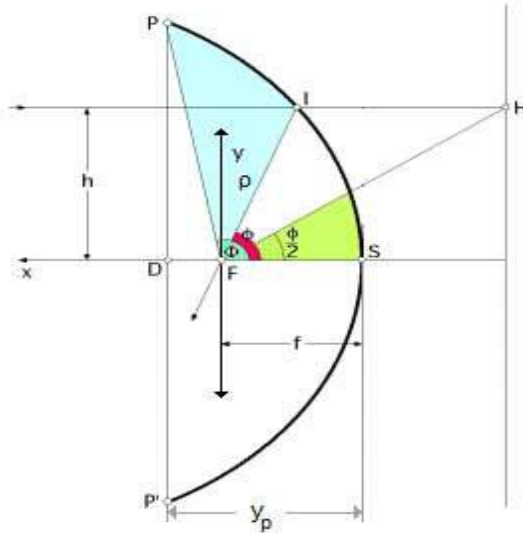


Figura 18 Geometría de una parábola en coordenadas polares. [8]

Para conocer la ecuación de la parábola en coordenadas esféricas, es necesario recordar el concepto de excentricidad,  $\tau$  el cual si bien para función cónica es uno, establece la relación entre un punto de la función y el foco, y una recta fija y que está dada por.

$$\tau = \frac{\overline{IF}}{\overline{IH}} = \frac{\rho}{2f - \rho \cos \phi} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde,  $\rho$  es la distancia entre el punto focal (F) y un punto cualquiera de la parábola (I),  $f$  es la distancia focal,  $\phi$  es el ángulo de apertura de  $\rho$ , H es un punto de la recta directriz, S es el vértice de la parábola, P es el punto final de la parábola, D es la distancia entre los puntos finales y h es la altura del punto I.

Por lo que la ecuación que describe la parábola en coordenadas polares

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \phi} = \frac{f}{\cos^2 \frac{\phi}{2}} \quad \text{Ec. 4}$$

Igualmente de la figura 16 se obtiene la relación para el ángulo  $\phi$ . [8]

$$\tan \frac{\phi}{2} = \frac{h}{2f} \quad \text{Ec. 5}$$

Considerando el máximo ángulo de apertura ( $\phi_{\max} = \phi$ ), se tiene que el diámetro de toda la parábola es  $D = 2h$ , por lo que éste en términos de la distancia focal es: [8]

$$D = 4f \tan \frac{\phi}{2} \quad \text{Ec.6}$$

El área de apertura del paraboloide (ver figura (15)) es la superficie que se forma con el diámetro mayor de la parábola, es de forma circular y se halla a partir de la siguiente ecuación.

$$Aa = \frac{\pi}{4} D^2 \quad \text{Ec.7}$$

Reemplazando el diámetro en la anterior ecuación, se tiene que finalmente el área de apertura es:

$$Aa = 4\pi f^2 \tan^2 \frac{\phi}{2} \quad \text{Ec.8}$$

Sin embargo, se hace importante conocer el área del paraboloide en revolución, el cual se halla a partir del primer teorema de Pappus-Guldin, tal como lo indica la figura (17), donde se establece, que si se tiene una curva de longitud  $L$  y se hace girar alrededor de un eje, se genera una superficie de revolución de área  $A_\phi$  para hallar esta área basta con multiplicar la distancia recorrida por el centroide de la curva ( $C$ ), por la longitud de la misma.

$$A_\phi = \int_0^\phi 2\pi \bar{y} dl \quad \text{Ec.9}$$

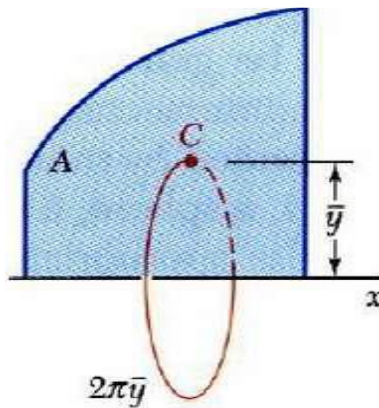


Figura 19 Primer teorema de Pappus –Guldin

Para el caso de la parábola en revolución la coordenada  $\bar{y}$  es igual a:

$$\bar{y} = \rho \sin \phi \quad \text{Ec. 10}$$

Reemplazando el valor de  $\rho$  obtenido anteriormente se tiene:

$$\bar{y} = \frac{f \sin \phi}{\cos^2 \frac{\phi}{2}} \quad \text{Ec. 11}$$

Para el cálculo del diferencial de longitud, se deriva la ecuación de la parábola (ecuación 2)

$$d\rho = \frac{\left(-2f \cos \frac{\phi}{2}\right) \left(-\sin \frac{\phi}{2}\right) d\phi}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} \quad \text{Ec. 12}$$

Simplificando la anterior ecuación

$$d\rho = \frac{f \sin \frac{\phi}{2}}{\cos^3 \frac{\phi}{2}} d\phi \quad \text{Ec. 13}$$

Reemplazando la Ec. 13 en el diferencial de longitud para coordenadas polares:

$$dl^2 = d\rho^2 + (\rho d\phi)^2 \quad \text{Ec 14}$$

$$dl^2 = \left( \frac{f \sin \frac{\phi}{2}}{\cos^3 \frac{\phi}{2}} d\phi \right)^2 + \left( \frac{f}{\cos^2 \frac{\phi}{2}} d\phi \right)^2 \quad \text{Ec 15}$$

Factorizando la anterior expresión se tiene:

$$dl^2 = \frac{f^2 d\phi^2}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} \left( \frac{\sin^2 \frac{\phi}{2}}{\cos^2 \frac{\phi}{2}} + 1 \right) \quad \text{Ec 16}$$

Aplicando la siguiente identidad trigonométrica:

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad \text{Ec. 17}$$

$$dl^2 = \frac{f^2 d\phi^2}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} \left( \frac{1}{\cos^2 \frac{\phi}{2}} \right) \quad \text{Ec. 18}$$

Reorganizando la anterior ecuación y sacando raíz cuadrada a ambos lados, se tiene que el diferencial de longitud ( $dl$ ) de la curva que describe la parábola es:

$$dl = \frac{f d\phi}{\cos^3 \frac{\phi}{2}} \quad \text{Ec. 19}$$

Retomando la ecuación del área de la parábola (Ec. 9) y remplazando las expresiones encontradas anteriormente (Ec. 11 y Ec. 19) se obtiene:

$$A_\phi = 2\pi \int_0^\phi \frac{f^2 \sin \phi}{\cos^5 \frac{\phi}{2}} d\phi \quad \text{Ec. 20}$$

Usando la identidad trigonométrica de suma de ángulos:

$$\sin(\phi) = 2 \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\phi}{2} \quad \text{Ec. 21}$$

Sustituyendo Ec. 21 en la Ec. 20

$$A_\phi = 4\pi f^2 \int_0^\phi \frac{\sin \frac{\phi}{2}}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} d\phi \quad \text{Ec. 22}$$

Usando el método de integración por partes y separando la integral:

$$u = \frac{1}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} ;$$

$$dv = \sin \frac{\phi}{2} d\phi$$

$$du = \frac{2 \sin \frac{\phi}{2}}{\cos^5 \frac{\phi}{2}} d\phi ;$$

$$v = -2 \cos \frac{\phi}{2} d\phi$$

$$\int_0^{\varphi} \frac{\sin \frac{\phi}{2}}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} d\phi = -\frac{2}{\cos^3 \frac{\phi}{2}} + 4 \int_0^{\varphi} \frac{\sin \frac{\phi}{2}}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} d\phi$$

Ec.

23

Sumando las integrales de ambos lados

$$4 \int_0^{\varphi} \frac{\sin \frac{\phi}{2}}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} d\phi - \int_0^{\varphi} \frac{\sin \frac{\phi}{2}}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} d\phi = \frac{2}{\cos^3 \frac{\phi}{2}}$$

Ec. 24

Por lo que la integral queda:

$$\int_0^{\varphi} \frac{\sin \frac{\phi}{2}}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} d\phi = \frac{2}{3 \cos^3 \frac{\phi}{2}}$$

Ec.25

Reemplazando en la Ec. 22 la Ec. 17

$$A_{\varphi} = 4\pi f^2 \frac{2}{3 \cos^3 \frac{\phi}{2}} \Big|_0^{\varphi}$$

Ec. 26

Finalmente, el área de la parábola luego de evaluar la anterior ecuación es:

$$A_{\varphi} = \frac{8\pi f^2}{3} \left( \frac{1}{\cos^3 \frac{\varphi}{2}} - 1 \right)$$

Ec. 27

A partir de esta ecuación 27 se puede calcular el área de la parábola al determinar el foco ( $f$ ) y del ángulo de apertura ( $\phi$ ), los cuáles serán seleccionados buscando determinar una parábola que sea la más conveniente, para diseñar un concentrador solar tipo parabólico. [8]

### 3.2.1 Área del paraboloides, altura y foco.

Para calcular la altura de la parábola, es necesario recurrir nuevamente a la figura 16, de la cual resulta la siguiente relación: [8]

$$y_p = f + \rho \cos(180 - \phi) \quad \text{Ec.28}$$

Usando la siguiente identidad trigonométrica:

$$\cos(a - b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b \quad \text{Ec. 29}$$

Se tiene para  $y_p$ :

$$y_p = f - \rho \cos(\phi) \quad \text{Ec.30}$$

Reemplazando la ecuación 4 en la ecuación 30.

$$y_p = f \left( 1 - \frac{\cos \phi}{\cos^2 \frac{\phi}{2}} \right) \quad \text{Ec. 31}$$

En este capítulo, se establecieron las ecuaciones correspondientes al diseño geométrico y óptico, con el fin de definir los parámetros que definirán el tamaño del paraboloides, su foco y su altura. Los valores resultantes de estas ecuaciones se usarán en los siguientes capítulos como parámetros de cada simulación y así resolver el modelo matemático que determine la concentración necesaria para llegar a la temperatura de arranque para la reacción química que producirá Hidrógeno.

## Capítulo 4 Desarrollo del Proyecto

### Diseño térmico de un concentrador parabólico

#### 4.1 Balance de energía Térmica en la generación de Hidrógeno usando un reactor como absorbedor en el punto focal

Para conocer el desempeño térmico del concentrador parabólico (figura 18), se considera que el sistema termodinámico a evaluar será el absorbedor colocado en el punto focal, que en este caso corresponde al reactor de lecho catalítico, para lo cual se utiliza un balance de energía o la primera Ley de la Termodinámica en forma temporal, la cual establece que la diferencia de los flujos de energía, es decir la suma de la entrada ( $\dot{Q}_{in}$ ) menos las de salida ( $\dot{Q}_{out}$ ), es igual al cambio de la energía neta del sistema por unidad de tiempo [8]

$$\sum \dot{Q}_{in} - \sum \dot{Q}_{out} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \text{Ec.32}$$

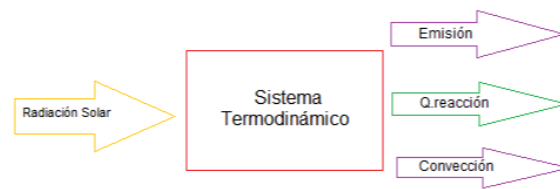


Figura 20 Balance de energías. [8]

El término  $\Delta E$  se refiere al cambio temporal de energía interna del sistema, por lo que escrito de otra manera, la Ec.32 se convierte en:

$$\sum \dot{Q}_{in} - \sum \dot{Q}_{out} = (m_{mezcl} c_{mezcl} + m_{reac} c_{reac}) \frac{dT}{dt} \quad \text{Ec.33}$$

Donde  $m_{mezcl}$  y  $c_{mezcl}$  hacen referencia a la masa y calor específico del reactor, mientras que  $m_{reac}$  y  $c_{reac}$  la masa y calor específico de los componentes de la reacción a calentar,  $dT$  es el diferencial de temperatura del sistema termodinámico (reactor), mientras que  $dt$  es de tiempo.

Existen muchas herramientas matemáticas para solucionar la ecuación diferencial que se presenta en la Ec.33. Con fines prácticos y convenientes el método empleado para encontrar su correspondiente función, es el de diferencias finitas, el cual se puede resolver por dos maneras. La primera me permite conocer la temperatura actual dado un valor de temperatura un intervalo de tiempo antes. [8]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_j - T_{(j-i)}}{\Delta t} \quad \text{Ec.34}$$

La segunda predice a partir de la temperatura actual, un valor de la misma después de un instante de tiempo, lo que permite estimar teóricamente la temperatura que alcanzaría el reactor.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{(j+i)} - T_j}{\Delta t} \quad \text{Ec.35}$$

Reemplazado en la Ec.33 la Ec.35 y reorganizando, se obtiene la Ec.36, la cual nos permite calcular el incremento de la temperatura inicial del sistema  $T_j$  después de un tiempo  $\Delta t$ , hasta alcanzar la temperatura final  $T_{(j+1)}$ , que dependerá fundamentalmente de las características del concentrador parabólico (pérdidas de calor e incremento de la energía interna) y de la radiación solar del momento.

$$T_{(j+1)} = T_j + \frac{\Delta t}{(m_{mezcl}c_{mezcl} + m_{reac}c_{reac})} \left( \sum \dot{Q}_{in} - \sum \dot{Q}_{out} \right) \quad \text{Ec.36}$$

#### 4.1.1 Ganancias de energía en un proceso termoquímico de calentamiento.

Para el cálculo de las ganancias de energía, se debe considerar nuevamente la aplicación del modelo matemático, el cual describe la potencia de un concentrador solar parabólico para calentar el reactor en determinado tiempo, por lo que la expresión depende de la capacidad para transformar la radiación solar y concentrarla en la región donde se ubicará el absorbedor- receptor, tal como se indica en la figura 19.

$$\sum \dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{rad} = \alpha R I A_p \quad \text{Ec.37}$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción del reactor, el cual depende del material con que fue construida,  $R$  el coeficiente de reflexión de la película que cubre la superficie del disco parabólico de revolución,  $I$  la irradiación solar y  $A_p$  área superficial del concentrador.



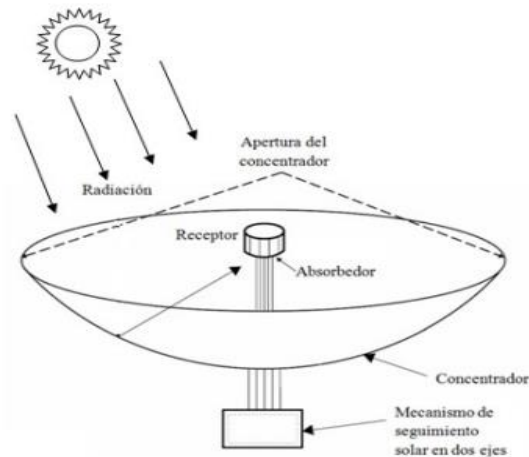


Figura 21 Colector de concentración de disco parabólico [15]

#### 4.1.2 Pérdidas de energía en un proceso termoquímico de calentamiento.

Las pérdidas de calor del receptor se pueden reducir operando el colector cerca de la temperatura ambiente (por ejemplo, con los colectores de placa plana de baja temperatura) o mediante la construcción del colector de tal manera que la pérdida de calor a temperaturas elevadas sea reducido. La forma más común de reducir la pérdida de calor en el receptor a temperaturas elevadas es reducir el tamaño de la superficie caliente (es decir, el receptor), ya que la pérdida de calor es directamente proporcional a su área. Los colectores con concentración reducen la superficie del receptor mediante la reflexión (o refracción) de la luz que incide sobre un área grande (la abertura del colector) en un receptor de área pequeña. Con la pérdida de calor reducida, los colectores de concentración pueden funcionar a temperaturas elevadas y todavía proporcionar cantidades significativas de energía térmica útil.

Para cada nivel de concentración, hay teóricamente un sinnúmero de superficies posibles para obtener buenos rendimientos energéticos, tanto en lo que se refiere a los absorbentes como a los reflectores; lo importante es minimizar las pérdidas de energía en cada una de las fases de este proceso, manteniendo el costo del sistema lo más bajo posible. [16]

Las pérdidas de energía del colector hacia el ambiente ocurren por conducción a través de la estructura de soporte del colector y a través del aislamiento de las partes que no están siendo irradiadas, y por convección y radiación infrarroja a través del receptor. [17]

### 4.1.2.1 Convección, Emisión, conducción, Energía de reacción.

#### Convección.

Las pérdidas por convección es uno de los factores que más influyen en el desempeño del dispositivo, debido a que esta funciona, fundamentalmente con radiación solar directa la cual está en función de  $h_{ca}$  quien es el coeficiente de transferencia de calor por convección del material que se expone al medio,  $T_e$  y  $T_o$  la temperatura de absorbedor y el ambiente y  $A_{reac}$  área superficial del reactor, como se evidencia en la siguiente relación: [8]

$$\sum \dot{Q}_{out} = A_{reac} h_{ca} (T_e - T_o) \quad \text{Ec.38}$$

El coeficiente de convección  $h_{ca}$  depende de la velocidad del viento del lugar además, su cálculo está influenciado por el acabado de la superficie del absorbedor y la incidencia de la corriente de aire. (Jürges).

Para la aplicación planteada, la corriente de aire será perpendicular a la superficie de recepción donde  $v_{aire}$  es la velocidad media de aire a una temperatura  $T$  (K) y donde se ha considerado 0.5 (m/s)

$$h_{ca} = 16.9 v_{aire}^{0.45} \quad \text{Ec.39}$$

#### Emisión

El cálculo de la radiación del sistema se puede determinar a partir de la ecuación de Stefan Boltzman, la cual establece que la energía que un cuerpo emite al medio, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E = \sigma \xi T^4 \quad \text{Ec.40}$$

Donde  $\sigma$  es llamada la constante de Stefan Boltzman y tiene un valor de  $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ ,  $\xi$  es el coeficiente de emisividad del material, el cual es un numero adimensional entre 0 y 1 y  $T$  la temperatura del cuerpo.

Sin embargo, la ecuación anterior es un caso ideal, en realidad todo cuerpo emite y absorbe energía simultáneamente, por lo que el flujo de energía, depende a su vez del área superficial  $A_{reac}$  del material que se analice y la diferencia neta entre las cuartas potencias de temperatura de los elementos en consideración, así la ecuación de Stefan Boltzman queda de la siguiente manera:

$$\sum \dot{Q}_{emi} = A_{react} \sigma \epsilon (T_e^4 - T_0^4) \quad \text{Ec.41}$$

Con  $T_e$  y  $T_0$  la temperatura absoluta de un cuerpo respecto a otro. Las pérdidas del flujo de energía por este factor se expresan al ambiente en forma de ondas electromagnéticas, debido a que este se encuentra a una temperatura inferior.

## Conducción

La conducción de calor o pérdidas de calor por conducción se dan cuando dos cuerpos entran en contacto y aquel que tiene mayor temperatura transfiere el calor al cuerpo de menor temperatura para así llegar al equilibrio térmico. En el caso del absorbedor, las pérdidas de calor son despreciables debido a que el área de contacto entre el reactor y la estructura de sujeción es mínima, por lo que estas no se tendrán en cuenta, pues el área expuesta es directamente proporcional a las pérdidas por conducción, tal como se muestra en la Ec.42. [8]

$$\sum \dot{Q}_{cond} = \frac{\lambda A_{react} (T_e - T_{est})}{d} \quad \text{Ec.42}$$

Siendo  $\lambda$  la conductividad térmica del absorbedor,  $A_{react}$  área de contacto,  $T_e$  la temperatura del absorbedor,  $T_{est}$  la temperatura de la estructura y  $d$  su espesor. [8]

## Energía de Reacción.

Es la energía necesaria para activar la reacción y comenzar a producir Hidrógeno, está considerada dentro de las temperaturas de 600°C y 800°C, en laboratorio se utiliza un par de resistencias de 600W cada una, por lo tanto en la simulación del concentrador parabólico se debe suplir esta pérdida a fin de solo utilizar energía limpia.

$$Q_{reacción} = 1200 \text{ W}$$

En este capítulo se desarrollaron las ecuaciones para el diseño térmico absorbedor. Un análisis de pérdidas y ganancias de energía a fin de obtener una temperatura útil para que la reacción arrancara. Las ecuaciones definidas anteriormente servirán para la simulación del absorbedor colocado en el punto focal y determinar su temperatura a través del tiempo en un determinado día y en una determinada ciudad, para este cálculo se desarrolló una hoja de Excel con parámetros geométricos y ópticos del capítulo tres, más las ecuaciones de este capítulo cuatro y datos puntuales de la zona donde se colocara el concentrador solar.

## Capítulo 5. Resultados

Estudio numérico de un concentrador paraboidal para la producción termoquímica de hidrógeno para las ciudades de Hermosillo y ciudad de México.

### 5.1 Bases de datos meteorológicos utilizados.

Los datos meteorológicos utilizados para el modelo térmico del reactor, fueron obtenidos del sistema de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA con datos puntuales de las ciudades de: Hermosillo Sonora y Ciudad de México durante el mes de Junio y Septiembre respectivamente, siguiendo el "Tiempo Universal Coordinado" (UTC). Entre los datos obtenidos están irradiación solar cada 10 minutos, lo mismo que la velocidad del viento y temperatura ambiente, tal como lo evidencian las tablas 3 y 4.

*Tabla 3 Datos proporcionados por Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), del 18 de Junio de 2018, Estación Hermosillo Sonora, día escogido arbitrariamente.*

	Estación	Fecha-Tiempo	SR(W/m <sup>2</sup> )	Km/h	T0
			Irradiación Solar	Vel viento	Temperatura ambiente
7am	Hermosillo	2018-06-18 13:00	72	4.3	20
	Hermosillo	2018-06-18 13:10	33	3.7	20
	Hermosillo	2018-06-18 13:20	29	5.8	20.6
	Hermosillo	2018-06-18 13:30	33	9.1	21.2
	Hermosillo	2018-06-18 13:40	37	7.7	22
	Hermosillo	2018-06-18 13:50	40	6	23.1
8am	Hermosillo	2018-06-18 14:00	46	4.2	24.3
	Hermosillo	2018-06-18 14:10	308	2.1	25.7
	Hermosillo	2018-06-18 14:20	154	0	26.6
	Hermosillo	2018-06-18 14:30	383	0	27.5
	Hermosillo	2018-06-18 14:40	419	2.4	27.8
	Hermosillo	2018-06-18 14:50	454	2.2	28.5
9am	Hermosillo	2018-06-18 15:00	491	2.5	29.6

	Hermosillo	2018-06-18 15:10	526	4.4	30.1
	Hermosillo	2018-06-18 15:20	561	4	29.8
	Hermosillo	2018-06-18 15:30	596	3.7	29.9
	Hermosillo	2018-06-18 15:40	627	2.1	29.5
	Hermosillo	2018-06-18 15:50	662	3	30.3
10am	Hermosillo	2018-06-18 16:00	697	3.9	30.6
	Hermosillo	2018-06-18 16:10	730	3.8	30.9
	Hermosillo	2018-06-18 16:20	760	3.4	32
	Hermosillo	2018-06-18 16:30	789	4.2	33.1
	Hermosillo	2018-06-18 16:40	815	5.3	33.9
	Hermosillo	2018-06-18 16:50	841	5.9	34.2
11am	Hermosillo	2018-06-18 17:00	867	4.8	34.8
	Hermosillo	2018-06-18 17:10	889	5.3	35.6
	Hermosillo	2018-06-18 17:20	910	6	35.7
	Hermosillo	2018-06-18 17:30	929	5.9	34.9
	Hermosillo	2018-06-18 17:40	940	4.6	35.8
	Hermosillo	2018-06-18 17:50	964	6.6	36
12pm	Hermosillo	2018-06-18 18:00	970	10.2	36.4
	Hermosillo	2018-06-18 18:10	985	5.3	36
	Hermosillo	2018-06-18 18:20	989	6.1	36.5
	Hermosillo	2018-06-18 18:30	994	5.8	37.2
	Hermosillo	2018-06-18 18:40	1012	7.7	36.8
	Hermosillo	2018-06-18 18:50	1012	6.8	37.2
1pm	Hermosillo	2018-06-18 19:00	1015	5.2	37
	Hermosillo	2018-06-18 19:10	1015	6.8	37.1
	Hermosillo	2018-06-18 19:20	1023	6.3	37.8
	Hermosillo	2018-06-18 19:30	1030	6.1	37
	Hermosillo	2018-06-18 19:40	1045	7.8	37.6
	Hermosillo	2018-06-18 19:50	1038	6.7	37.7
2pm	Hermosillo	2018-06-18 20:00	1042	7.4	38
	Hermosillo	2018-06-18 20:10	1033	6.6	38.9
	Hermosillo	2018-06-18 20:20	1034	6.4	38
	Hermosillo	2018-06-18 20:30	1022	6	38.5
	Hermosillo	2018-06-18 20:40	1020	5.4	38.5
	Hermosillo	2018-06-18 20:50	1009	5.5	38.6
3pm	Hermosillo	2018-06-18 21:00	987	4.5	38.6
	Hermosillo	2018-06-18 21:10	972	5.4	39.1
	Hermosillo	2018-06-18 21:20	951	4.1	38.9
	Hermosillo	2018-06-18 21:30	935	7.4	38.9
	Hermosillo	2018-06-18 21:40	918	4.3	38.7
	Hermosillo	2018-06-18 21:50	886	6.2	39

4pm	Hermosillo	2018-06-18 22:00	859	7.4	39.2
	Hermosillo	2018-06-18 22:10	835	4.1	39.2
	Hermosillo	2018-06-18 22:20	813	5.6	39
	Hermosillo	2018-06-18 22:30	785	5.7	38.8
	Hermosillo	2018-06-18 22:40	754	5.5	39.1
	Hermosillo	2018-06-18 22:50	727	4.3	38.6
5pm	Hermosillo	2018-06-18 23:00	694	5.9	39.1
	Hermosillo	2018-06-18 23:10	664	5.3	38.8
	Hermosillo	2018-06-18 23:20	630	3.1	38.5
	Hermosillo	2018-06-18 23:30	592	3.4	38.8
	Hermosillo	2018-06-18 23:40	555	3	38.9
	Hermosillo	2018-06-18 23:50	519	1.8	38.7
6pm	Hermosillo	2018-06-19 00:00	486	0	38.2
	Hermosillo	2018-06-19 00:10	447	0	38.1
	Hermosillo	2018-06-19 00:20	408	0	38.3
	Hermosillo	2018-06-19 00:30	374	0	37.9
	Hermosillo	2018-06-19 00:40	337	2.8	37.7
	Hermosillo	2018-06-19 00:50	299	4.4	37.5
7pm	Hermosillo	2018-06-19 01:00	261	1.6	36.9
	Hermosillo	2018-06-19 01:10	224	3.9	35.8
	Hermosillo	2018-06-19 01:20	187	5.7	35.3
	Hermosillo	2018-06-19 01:30	150	3.8	35.2
	Hermosillo	2018-06-19 01:40	116	3.2	34.9
	Hermosillo	2018-06-19 01:50	82	5.3	34.5
8pm	Hermosillo	2018-06-19 02:00	12	7.5	34.1

Tabla 4 Datos proporcionados por Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), del 21 de Septiembre de 2018, Estación Ciudad de México, día escogido arbitrariamente.

	Estación	Fecha-Tiempo	SR(W/m <sup>2</sup> )	Km/h	T0
			Irradiación Solar	Vel viento	Temperatura ambiente
7am	Ciudad de México	2018-09-21 13:00	49	4.3	14.9
	Ciudad de México	2018-09-21 13:10	54	3.7	15
	Ciudad de México	2018-09-21 13:20	71	5.8	15.2
	Ciudad de México	2018-09-21 13:30	104	9.1	15.4
	Ciudad de México	2018-09-21 13:40	87	7.7	16
	Ciudad de México	2018-09-21 13:50	93	6	15.8
8am	Ciudad de México	2018-09-21 14:00	130	4.2	15.4
	Ciudad de México	2018-09-21 14:10	133	2.1	15.3

	Ciudad de México	2018-09-21 14:20	203	0	15.5
	Ciudad de México	2018-09-21 14:30	286	0	15.9
	Ciudad de México	2018-09-21 14:40	474	2.4	16.5
	Ciudad de México	2018-09-21 14:50	543	2.2	17.4
9am	Ciudad de México	2018-09-21 15:00	562	2.5	18.5
	Ciudad de México	2018-09-21 15:10	573	4.4	19.2
	Ciudad de México	2018-09-21 15:20	610	4	19.7
	Ciudad de México	2018-09-21 15:30	600	3.7	19.9
	Ciudad de México	2018-09-21 15:40	665	2.1	20
	Ciudad de México	2018-09-21 15:50	740	3	20
10am	Ciudad de México	2018-09-21 16:00	711	3.9	20.3
	Ciudad de México	2018-09-21 16:10	741	3.8	20.8
	Ciudad de México	2018-09-21 16:20	721	3.4	20.4
	Ciudad de México	2018-09-21 16:30	780	4.2	20.7
	Ciudad de México	2018-09-21 16:40	848	5.3	21.7
	Ciudad de México	2018-09-21 16:50	855	5.9	21.7
11am	Ciudad de México	2018-09-21 17:00	842	4.8	22.4
	Ciudad de México	2018-09-21 17:10	917	5.3	22.8
	Ciudad de México	2018-09-21 17:20	971	6	22.5
	Ciudad de México	2018-09-21 17:30	972	5.9	23
	Ciudad de México	2018-09-21 17:40	961	4.6	22.3
	Ciudad de México	2018-09-21 17:50	940	6.6	22.7
12pm	Ciudad de México	2018-09-21 18:00	855	10.2	23.4
	Ciudad de México	2018-09-21 18:10	867	5.3	23.3
	Ciudad de México	2018-09-21 18:20	996	6.1	23
	Ciudad de México	2018-09-21 18:30	900	5.8	23.7
	Ciudad de México	2018-09-21 18:40	924	7.7	24.2
	Ciudad de México	2018-09-21 18:50	930	6.8	24.1
1pm	Ciudad de México	2018-09-21 19:00	895	5.2	24.6
	Ciudad de México	2018-09-21 19:10	878	6.8	24.6
	Ciudad de México	2018-09-21 19:20	854	6.3	25.2
	Ciudad de México	2018-09-21 19:30	288	6.1	24.9
	Ciudad de México	2018-09-21 19:40	890	7.8	25
	Ciudad de México	2018-09-21 19:50	729	6.7	25.5
2pm	Ciudad de México	2018-09-21 20:00	1018	7.4	26.1
	Ciudad de México	2018-09-21 20:10	244	6.6	25.7
	Ciudad de México	2018-09-21 20:20	862	6.4	25.1
	Ciudad de México	2018-09-21 20:30	990	6	25
	Ciudad de México	2018-09-21 20:40	947	5.4	25.8
	Ciudad de México	2018-09-21 20:50	288	5.5	25.8
3pm	Ciudad de México	2018-09-21 21:00	812	4.5	25.3

	Ciudad de México	2018-09-21 21:10	752	5.4	25.6
	Ciudad de México	2018-09-21 21:20	726	4.1	25.6
	Ciudad de México	2018-09-21 21:30	722	7.4	25.5
	Ciudad de México	2018-09-21 21:40	134	4.3	25.3
	Ciudad de México	2018-09-21 21:50	573	6.2	25
4pm	Ciudad de México	2018-09-21 22:00	684	7.4	25.5
	Ciudad de México	2018-09-21 22:10	633	4.1	25.6
	Ciudad de México	2018-09-21 22:20	151	5.6	25.4
	Ciudad de México	2018-09-21 22:30	191	5.7	24.9
	Ciudad de México	2018-09-21 22:40	342	5.5	25.1
	Ciudad de México	2018-09-21 22:50	165	4.3	24.7
5pm	Ciudad de México	2018-09-21 23:00	132	5.9	24.5
	Ciudad de México	2018-09-21 23:10	90	5.3	24.4
	Ciudad de México	2018-09-21 23:20	61	3.1	24.1
	Ciudad de México	2018-09-21 23:30	51	3.4	24
	Ciudad de México	2018-09-21 23:40	36	3	23.9
	Ciudad de México	2018-09-21 23:50	22	1.8	23.8
6pm	Ciudad de México	2018-09-22 00:00	14	0	23.4
	Ciudad de México	2018-09-22 00:10	7	0	23.1
	Ciudad de México	2018-09-22 00:20	3	0	22.9
	Ciudad de México	2018-09-22 00:30	0	0	22.8
	Ciudad de México	2018-09-22 00:40	0	2.8	22.3
	Ciudad de México	2018-09-22 00:50	0	4.4	21.3
7pm	Ciudad de México	2018-09-22 01:00	0	1.6	20.8
	Ciudad de México	2018-09-22 01:10	0	3.9	20.5
	Ciudad de México	2018-09-22 01:20	0	5.7	20
	Ciudad de México	2018-09-22 01:30	0	3.8	19.5
	Ciudad de México	2018-09-22 01:40	0	3.2	19.3
	Ciudad de México	2018-09-22 01:50	0	5.3	19.1
8pm	Ciudad de México	2018-09-22 02:00	0	7.5	19

## 5.2 Algoritmo de resolución del modelo matemático y condiciones iniciales utilizadas.

Para resolver el modelo matemático desarrollado en el capítulo anterior, se utilizó una hoja de Excel para albergar los datos puntuales proporcionado por las



Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS). Así como la evaluación de los parámetros cada 10 minutos a fin de resolver las ecuaciones planteada en el capítulo anterior (figura 20).

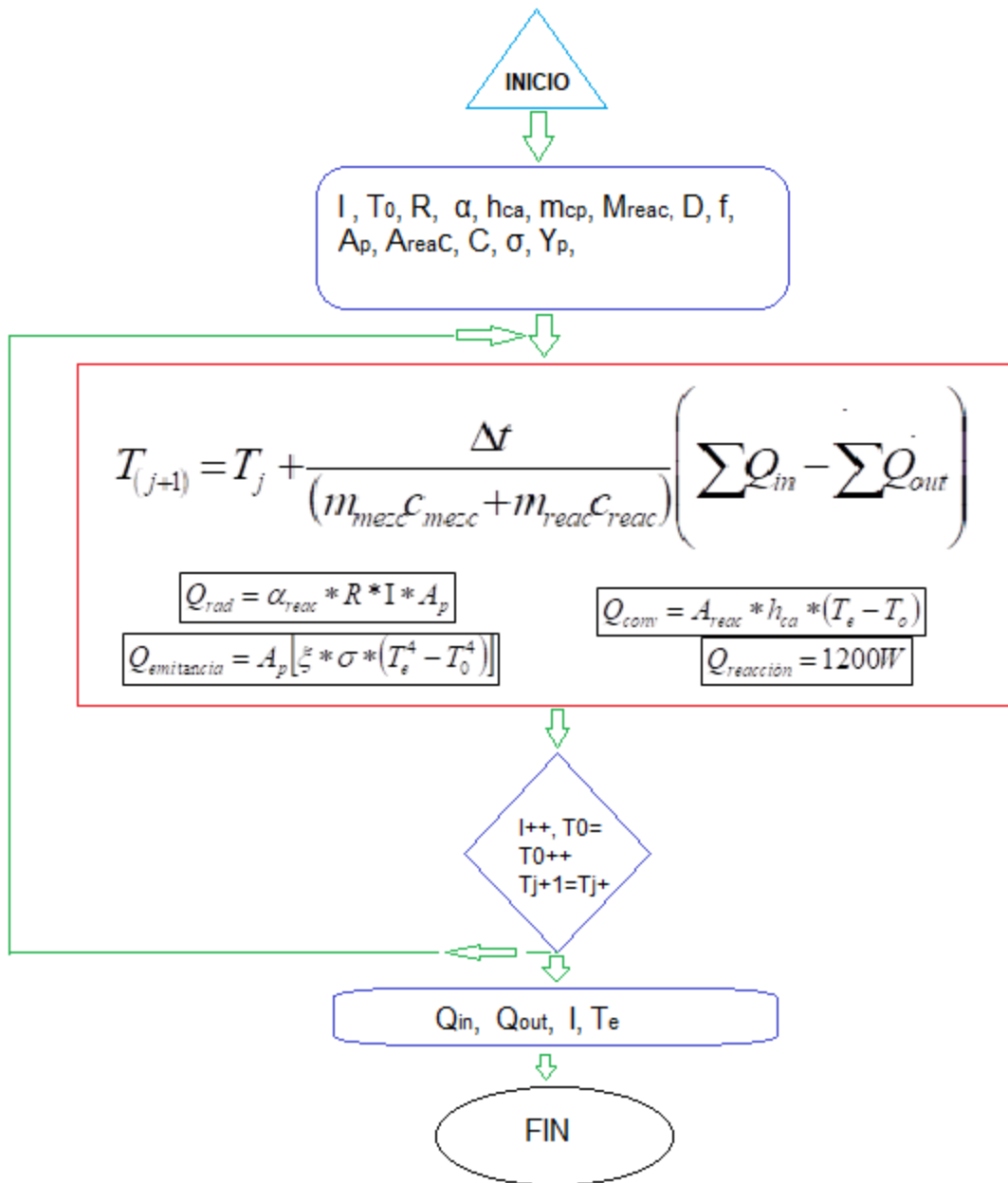


Figura 22 Diagrama de flujo del código empleado para la simulación del balance Termodinámico del reactor.

### 5.3 Análisis dinámico del comportamiento térmico del absorbedor

Para el análisis del comportamiento térmico del absorbedor, se emplearon datos puntuales de cada ciudad. Se logró caracterizar un perfil de temperatura del reactor contra tiempo, simulando el concentrador parabólico puesto por un día, evaluado cada hora en la ciudad de: Hermosillo Sonora, Ciudad de México, Cuernavaca Morelos y Morelia Michoacán.

En la figura 21 se observan los distintos perfiles de temperatura del reactor para las distintas ciudades, entonces para la ciudad de Hermosillo Son. de color Azul, la cual muestra un perfil de temperatura amplio que llega hasta los 800°C y que se mantiene casi constante desde las 12 h hasta las 15 h, lo cual es necesario para aportar los 600°C de temperatura para la reacción y comenzar a producir Hidrogeno. Mientras que en las otras ciudades este perfil se torna disparejo con solo un corto periodo dentro de la temperatura de reacción rango dentro de los limites maximo de 800°C (color negro) y minimo 600°C (color rojo).

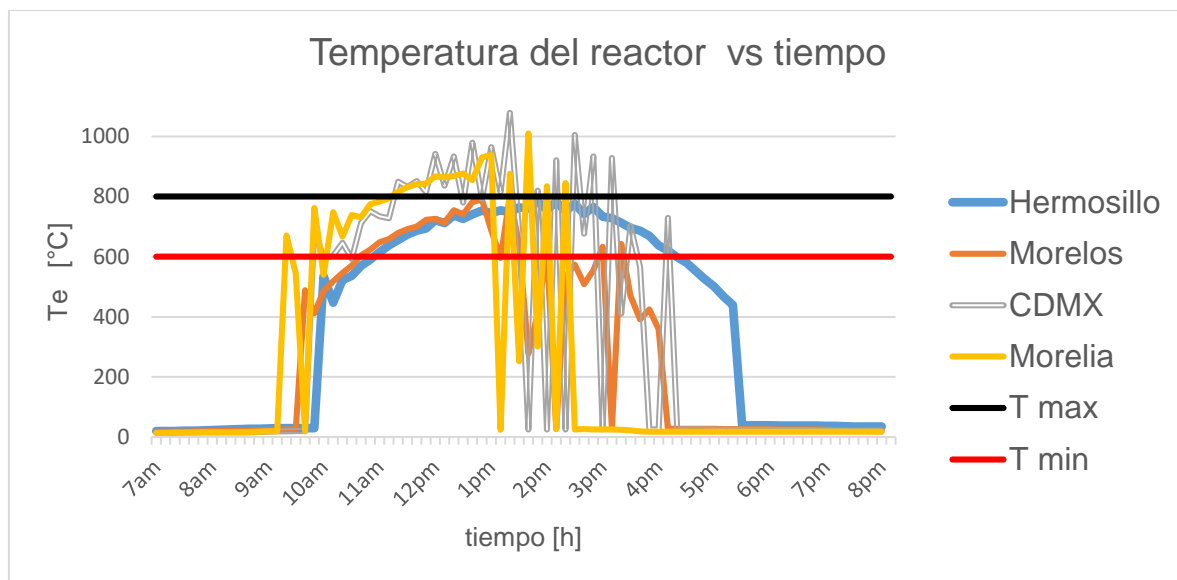


Figura 23 Perfil de temperatura del reactor evaluado en cuatro ciudades

En las siguientes gráficas, (figuras 22 a 25), se muestran días mas favorables para la producción de Hidrógeno en distintas ciudades de la república mexicana. Esto es, utilizando una concentración de 210 Soles, una Irradiación global promedio (color rojo) y temperatura ambiente de lugar (color azul). Estos datos proporcionados por las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS). Así como la solución del modelo matemático que es la Temperatura del reactor (color verde).

En la figura 22 se observa el día 20/06/2018 de la ciudad de Hermosillo Son. En ella se analiza Calentamiento reacción vs tiempo vs Irradiación. Con parámetros como una  $T_e$  máxima de  $857^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{\text{max}}$  de  $1045 \text{ W/m}^2$ . Se aprecia que el concentrador parabólico logra generar una temperatura superior a los  $600^{\circ}\text{C}$  en su foco y así proporcionar la energía de arranque necesaria para la reacción que producirá Hidrógeno, durante un tiempo aproximado de 7 horas.

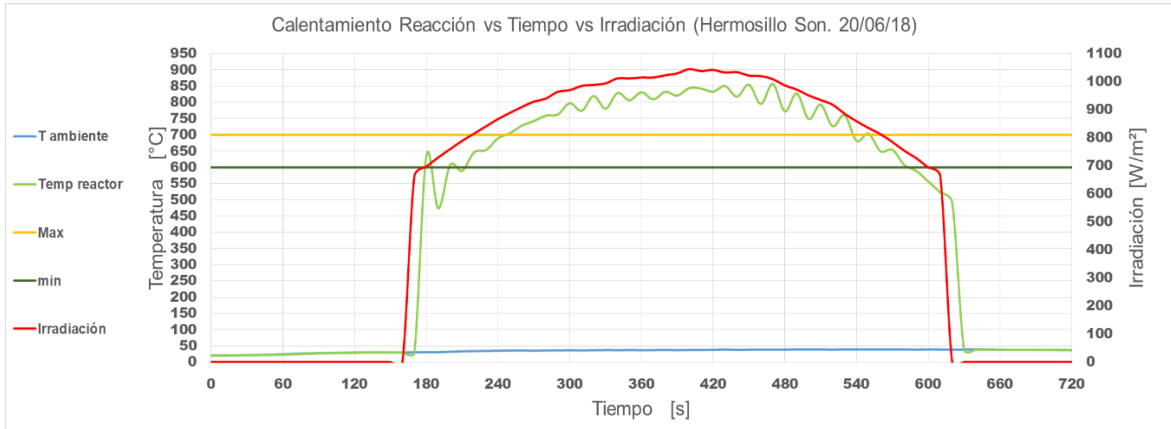


Figura 24. Perfil de temperatura día favorable Hermosillo Sonora.

En la figura 23, se observa el día 19/09/2018 de la ciudad de Cuernavaca Morelos. Con parámetros como  $T_e$  max  $922^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{\text{max}}$  de  $1073 \text{ W/m}^2$ , se aprecia que el concentrador parabólico logra generar una temperatura superior a los  $600^{\circ}\text{C}$  (color verde) en su foco y así proporcionar la energía de arranque necesaria para la reacción que producirá Hidrógeno, durante un tiempo aproximado de 5 horas.

En este caso si es necesario aumentar el número de horas, se recomienda aumentar la concentración solar o cambiar el día en que utilizara el concentrador parabólico, con el fin de aumentar el número de horas útiles para la producción de Hidrógeno.



Figura 25 Perfil de temperatura día favorable ciudad de Cuernavaca Morelos.

En la figura 24, se observa el día 21/09/2018 de la Ciudad de México. Con parámetros como  $T_{e\ max} 1154^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{\max}$  de  $1083\ \text{W}/\text{m}^2$ , se aprecia que el concentrador parabólico logra generar una temperatura superior a los  $600^{\circ}\text{C}$  en su foco y así proporcionar la energía de arranque necesaria para la reacción que producirá Hidrógeno, durante un tiempo aproximado de 4 horas. Y como en el caso anterior, si se requiere aumentar el número de horas con temperaturas superiores a los  $600^{\circ}\text{C}$

En este caso se recomienda aumentar la concentración solar, con el fin de tener un concentrador más grande y así aumentar el número de horas útiles para la producción de Hidrógeno.

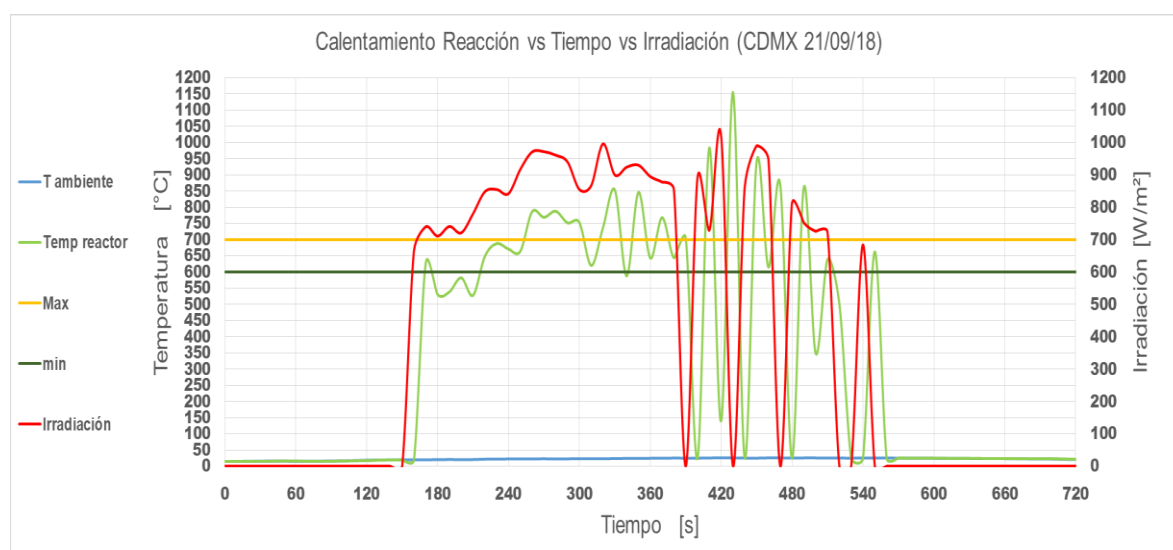


Figura 26 Perfil de temperatura día favorable Ciudad de México.

En la figura 25, se observa el día 1/10/2018 de la Ciudad de Morelia. Con parámetros como  $T_{e\ max} 1169^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{\max}$  de  $1094\ \text{W}/\text{m}^2$ , se aprecia que el concentrador parabólico logra generar una temperatura superior a los  $600^{\circ}\text{C}$  en su foco y así proporcionar la energía de arranque necesaria para la reacción que producirá Hidrógeno, durante un tiempo aproximado de 4:30 horas.

Al comparar los perfiles de temperatura se observa que la ubicación geográfica influye en el aumento de temperatura y esto a su vez en el tiempo de reacción útil. Simular el concentrador parabólico en ciudades con altos índices de Irradiación, muestra un perfil uniforme de calentamiento óptimo para la Generación de Hidrógeno. A mayor índice de Irradiación solar, mayor es el tiempo de reacción útil.



Figura 27 Perfil de temperatura día favorable Ciudad de Morelia Michoacán.

## Capítulo 6 Análisis y discusión de Resultados

Una vez analizado la diferencia de usar el concentrador en distintas ciudades, se procedió a simular para tres diferentes días escogidos al azar en la Ciudad de México a fin de encontrar un modelo que satisfaga las necesidades de calor útil para la reacción y así descartar alguno de ellos.

En la tabla 5 se dan los parámetros de entrada para simular el concentrador solar tipo parabólico para la ciudad de México.

Tabla 5 Parámetros simulación CDMX

	CDMX 21/9/18	CDMX 5/10/18	CDMX 24/10/18
Diámetro [m]	2.3	2.4	2.4
Foco [m]	0.58	0.6	0.6
Concentración	210	220	235
Área p. [m <sup>2</sup> ]	5.9	5.3	5.6
Altura (Y <sub>p</sub> ) [m]	0.56	0.58	0.60
Te Max [°C]	853	874	894
Te min [°C]	527	457	491
Irradiación [W/m <sup>2</sup> ]	996	984	937
Tiempo útil [h]	4	5	5.3

En la tabla 5 se usaron distintas concentraciones, lo cual incremento las horas de calor útil así como el área de concentración, todo esto para llegar a elegir un concentrador que funcione mayor número de horas en la ciudad de México. En este caso, el concentrador CDMX 24/10/18. Resulto con el mayor número de horas de calor útil así como el punto intermedio en cuanto área del paraboloide de los tres casos simulados.

En la figura 26 se observa el perfil parabólico del día 21/Septiembre/2018 CDMX, el cual se aprecia una altura de la parábola correspondiente a 0.56 metros, con un área de paraboloide de 5.9 m<sup>2</sup>. En esta configuración, el receptor llega a una temperatura teórica promedio máxima de 853°C, durante cuatro horas aproximadamente al ser expuesto el concentrador solar parabólico a una irradiación Global promedio de 996 W/m<sup>2</sup>, usando una concentración de 210 Soles.

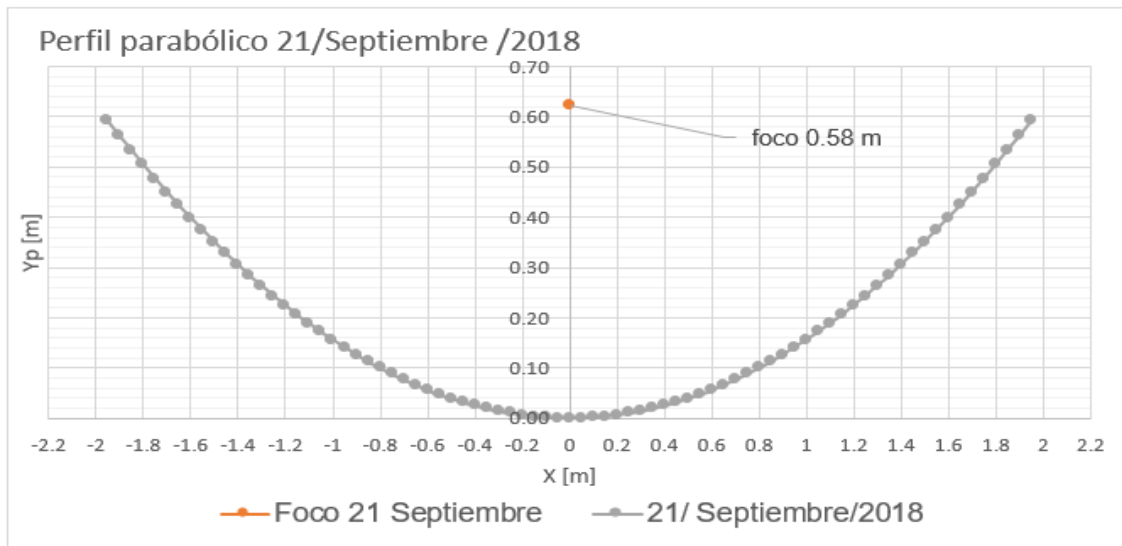


Figura 28 Perfil parabólico día 21/Septiembre/2018 CDMX

En la figura 27 se observa el perfil parabólico del día 5/Octubre/2018 CDMX, el cual se aprecia una altura de la parábola correspondiente a 0.58 metros, con un área de paraboloide de 5.3 m<sup>2</sup>. En esta configuración, el receptor llega a una temperatura teórica promedio máxima de 874°C, durante cinco horas aproximadamente al ser expuesto el concentrador solar parabólico a una irradiación Global promedio de 984 W/m<sup>2</sup>, usando una concentración de 220 Soles.

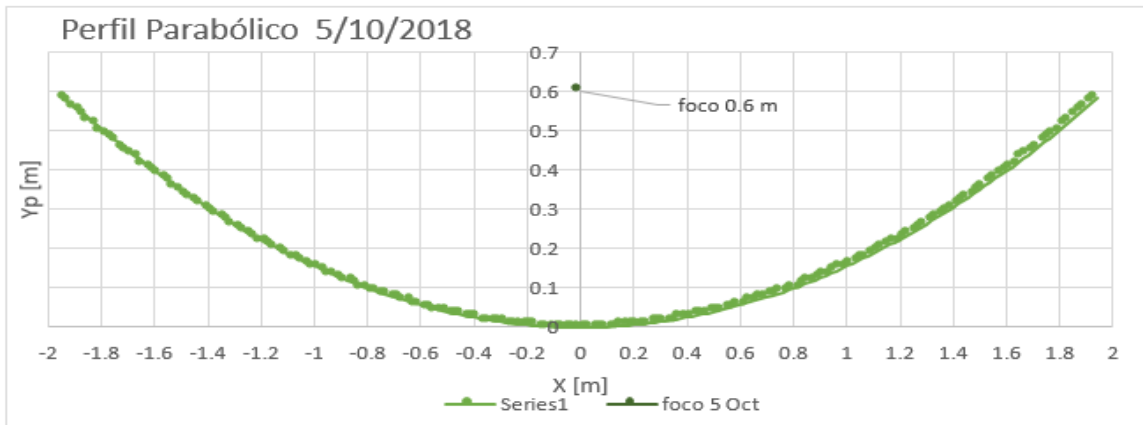


Figura 29 Perfil parabólico día 5/Octubre/2018 CDMX

En la figura 28 se observa el perfil parabólico del día 24/Octubre/2018 CDMX, el cual se aprecia una altura de la parábola correspondiente a 0.6 metros, con un área de paraboloides de 5.6 m<sup>2</sup>. En esta configuración, el receptor llega a una temperatura teórica promedio máxima de 894°C, durante cinco y media horas aproximadamente al ser expuesto el concentrador solar parabólico a una irradiación Global promedio de 937 W/m<sup>2</sup>, usando una concentración de 235 Soles.

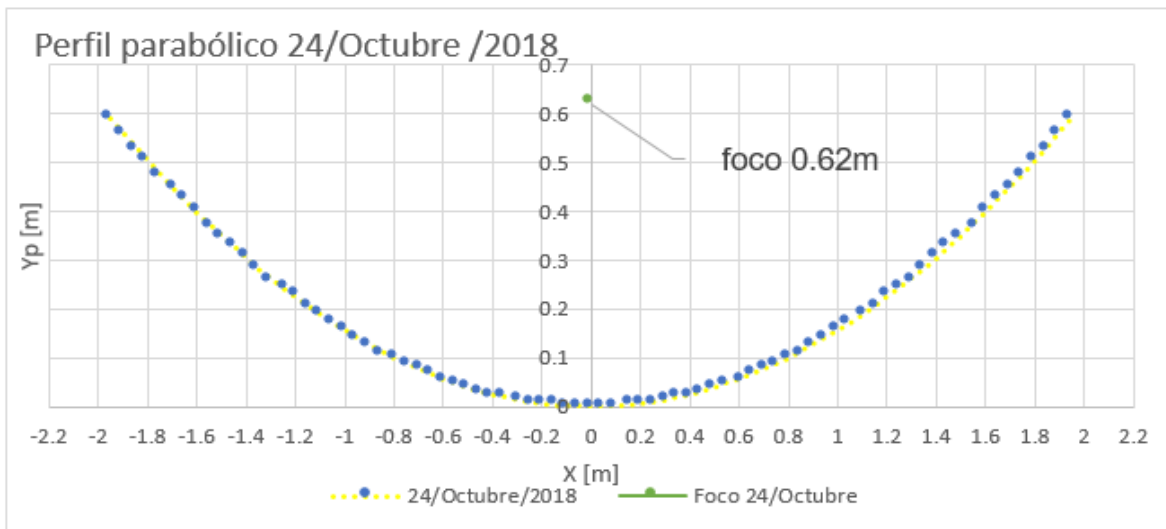


Figura 30 Perfil parabólico día 24/Octubre/2018 CDMX

En la tabla 6 se muestran los resultados de la simulación obtenidos para el día 24 de Octubre de 2018 en la Ciudad de México. Se observa que, al cambiar el valor del número de concentración empezando de 190 hasta 235 Soles, el tiempo de reacción se incrementa, generando así mayor tiempo de calor útil para realizar el proceso de generación de Hidrógeno con una concentración de 235 soles dando como resultado 4.4 horas útiles con los valores de Irradiación de ese día.

Tabla 6 Resultados Simulación 24/10/2018 CDMX

Concentración	I [W/m <sup>2</sup> ]	Te [°C]	To [°C]	D [m]	Aa [m <sup>2</sup> ]	f [m]	Ap [m <sup>2</sup> ]	Gráfica
190								
Max	937	685	26	2.2	4.7	0.56	4.6	
Min	632	11.9	11.9					
Tiempo de Reacción 2.4 horas								
220								
Max	937	817	26	2.4	4.4	0.6	5.3	
Min	632	11.9	11.9					
Tiempo de Reacción 4 horas								
230								
Max	937	866	26	2.4	4.6	0.61	5.5	
Min	632	11.9	11.9					
Tiempo de Reacción 4.1 horas								
235								
Max	937	894	26	2.4	4.7	0.62	5.6	
Min	632	11.9	11.9					
Tiempo de Reacción 4.4 horas								



## Conclusiones

Dentro del diseño de un concentrador Solar, influyen varios aspectos de los alrededores, muchos de ellos externos como la ubicación, índice de nubosidad así como la disponibilidad de horas de trabajo. En este proyecto de Integración, se determinó que para tener un mejor desempeño el principal criterio es elegir una ciudad con altos índices de irradiación, se estudiaron dos ciudades de la república a fin de mostrar un panorama de funcionamiento bajo condiciones empíricas

Al simular las configuraciones para la ciudad de México con los parámetros de entrada de la tabla 5, se obtiene que al aumentar la concentración solar, el diámetro, foco y área del paraboloide aumentan y esto a su vez aumenta la concentración de energía solar dando como resultado un aumento en la temperatura del receptor.

En otras palabras aumentar la concentración solar hace que el absorbedor llegue al rango de temperaturas óptimo para la reacción química y así producir Hidrógeno. Pero también hace que este tenga medidas más grandes en el diseño.

Con lo cual si colocamos el concentrador en la ciudad de Hermosillo Sonora, con mayor índice de Irradiación, podemos generar con menor diámetro, menor área del paraboloide la temperatura necesaria y durante mayor tiempo para la producción de hidrógeno.

Pero con el fin de llegar a un tamaño óptimo de diseño se llega a la conclusión de que, tanto la Irradiación solar de la región es fundamental para el uso y aprovechamiento de horas útiles para la producción de Hidrógeno, así como el ahorro del material para construir el concentrador ya que una ubicación con un alto índice de Irradiación solar hará que el receptor tenga más horas de calor útil.

## Referencias bibliográficas.

[1] Energía Solar Térmica de concentración

Visto en: [http://www.aperca.org/temp/pdf/concentracion\\_2009.pdf](http://www.aperca.org/temp/pdf/concentracion_2009.pdf)

Consultado el 20 febrero de 2018.

[2] Iván Rafael Martínez Cervantes, 2015, “Estudio de un reactor de lecho catalítico para la producción de hidrógeno a partir de bioetanol”. Tesis para obtener la Maestría en Ingeniería de Procesos. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

[3] Rosa María González García 2014, “Diseño mecánico del disco parabólico de un concentrador solar y la caracterización térmica del receptor”. Tesis para obtener grado de Ingeniera Mecánica. Universidad Nacional Autónoma de México.

[4] Oscar Alberto Mejía Burbano, Felipe Diego Zamora Orellana 2008, “Diseño y construcción de un sistema de generación de electricidad, a partir del uso de energía solar, mediante un concentrador parabólico de 1.8m”. Proyecto previo a la obtención del Título de ingeniero Mecánico. Escuela Politécnica de Ejército.

[5] Gustavo Zabalza 2010. “Proyecto de Generación Energía con Disco Parabólico Stirling”.

Visto.en:

[https://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/PROYECTO\\_energ%C3%ADa\\_%20solar\\_Zabalza\\_Rev%201.pdf](https://www.fing.edu.uy/if/solar/proyectos/PROYECTO_energ%C3%ADa_%20solar_Zabalza_Rev%201.pdf)

[6] La UA lidera un proyecto europeo para generar hidrógeno a partir de energía solar.

Visto en: <https://www.energynews.es/proyecto-europeo-generar-hidrogeno-energia-solar/>

Consultado el 22 febrero de 2018.

[7] Países Bajos tendrá la mayor planta de hidrógeno de Europa.

Visto en: <https://www.forbes.com.mx/paises-bajos-tendra-la-mayor-planta-de-hidrogeno-de-europa/>

Consultado el 23 febrero de 2018.

[8] Ángela M. Jaramillo Granada, Nathaly Daza Ramírez, 2015, “Diseño, construcción y evaluación de una estufa solar para la cocción de alimentos”. Tesis para obtener el título de ingeniero Físico. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

[9] México logra niveles de concentración solar únicos en el mundo gracias al LACYQS.

Visto en: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/15287-concentracion-solar-lacyqs>

Consultado el 23 febrero de 2018.

[10] Capitulo 2 “El potencial de la radiación solar”

Visto en: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf>>

[11] “Energías Renovables: 25 años de la UNAM en Temixco” / Temixco, Mor. : UNAM, Centro de Investigación en Energía, 2010.

[12] Berry, Gene D., Aceves, Salvador M., La economía del hidrógeno como solución al problema de la estabilización del clima mundial. Acta Universitaria [en línea] 2006, 16 (enero-abril): [Fecha de consulta: 8 de noviembre de 2018] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41616101>> ISSN 0188-6266

[13] Marianela Reyes Rodríguez, 2016, “Producción de hidrógeno a partir del reformado de bioetanol en un reactor catalítico de membrana”. Tesis para obtener Máster en: Ingeniería Ambiental, Instituto de Técnicas Energéticas, Barcelona, Octubre 2016.

[14] Dr. Richter Christoph, Teske Sven, Short Rebecca. “Energía Solar Térmica de concentración: Perspectiva Mundial 2009” Publicado por Greenpeace internacional, SolarPACES y ESTELA, Junio 2009

[15] Durán Medina Pino, Enciso Contreras Ernesto, Barbosa Saldaña Juan G., Jiménez Bernal José A., Sánchez Silva Florencio, “*Diseño de disco solar de pequeña modularidad*” XVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM, pp. 214-220, 2011.

[16] Rodrigo Eduardo Medina Carrasco, 2010. “Análisis del flujo energético 3d en colectores concentradores solares de diversas geometrías” Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas departamento de Ingeniería Mecánica.

[17] Kalogirou, S., 2009, *Solar energy engineering processes and systems*, Academic, New York.

## Entregables

Se entregará un reporte final del proyecto de integración que incluya dos programas de cómputo adjuntos en un cd, uno para el diseño del paraboloide y otro para el análisis térmico del absorbedor, utilizando los datos meteorológicos para dos ciudades (Ciudad de México y Hermosillo, Sonora).