



Instituto Politécnico Nacional

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA

UNIDAD QUERÉTARO

POSGRADO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

“GENERACIÓN DE CARBÓN VEGETAL MEDIANTE ENERGÍA SOLAR”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

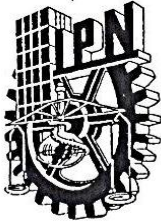
PRESENTA
David Alejandro Pérez Márquez

Director de Tesis:
Dr. Gonzalo Alonso Ramos López

Querétaro, Qro. Junio del 2011



Carta cesión de derechos



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Santiago de Querétaro, Qro. el día 30 del mes Mayo del año 2011, el (la) que suscribe David Alejandro Pérez Márquez alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro A090077, adscrito a CICATA-QRO, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Gonzalo Alonso Ramos López y cede los derechos del trabajo intitulado GENERACIÓN DE CARBÓN VEGETAL MEDIANTE ENERGÍA SOLAR, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección dapm99@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


David Alejandro Pérez Márquez

Nombre y firma

Acta de revisión de tesis


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Querétaro Qro. siendo las 12:00 horas del día 27 del mes de Mayo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-QRO para examinar la tesis titulada:
GENERACIÓN DE CARBÓN VEGETAL MEDIANTE ENERGÍA SOLAR

Presentada por el alumno:

Pérez
 Apellido paterno

Márquez
 Apellido materno

David Alejandro
 Nombre(s)

Con registro:


A	0	9	0	0	7	7
---	---	---	---	---	---	---

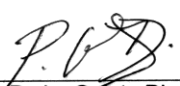
aspirante de: Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis


 Dr. Gonzalo Alonso Ramos López


 Dr. Pedro Quinto Diez

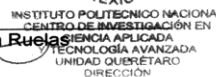

 Dr. Martín de Jesús Nieto Pérez


 Dr. Reynaldo Carlos Pless Elling


 Dr. Juan Bautista Hurtado Ramos

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


 Dr. Jorge Adalberto Huerta Ruelas



Contenido

Carta cesión de derechos	II
Acta de revisión de tesis.....	III
Contenido	IV
Índice de ilustraciones.....	VII
Índice de tablas	X
Nomenclatura.....	XI
Resumen.....	XII
Abstract	XIII
Introducción	XIV
1 Capítulo I Marco Teórico.....	1
1.1 El Sol.....	1
1.2 Relación geométrica solar.....	5
1.3 Dispositivos de medición solar.....	8
1.4 Sistemas de captación térmica solar	10
1.5 Concentradores solares estáticos y semiestáticos	12
1.5.1 Concentrador de receptor móvil	12
1.5.2 Concentrador de canal con lente refractor	13
1.5.3 Concentrador de canal parabólico doble.....	13
1.5.4 Concentrador solar para calentamiento de aire.....	14
1.5.5 Concentrador solar propuesto por Tao	15
1.6 Carbón Vegetal.....	15
1.6.1 Obtención de carbón vegetal a partir de madera.....	16
1.6.2 Hornos tradicionales	17
1.6.3 Hornos de combustión externa	22
1.6.4 Rendimiento y calidad del carbón	23
1.6.5 Recuperación de subproducto de la carbonización.....	23
2 Capítulo II Materiales y métodos.....	25
2.1 Materiales	25
2.1.1 Madera empleada.....	25
2.1.2 Mufla.....	26

2.1.3	Balanza analítica	26
2.1.4	Solar SK-14	27
2.1.5	Contenedor	27
2.1.6	Registrador de datos (data logger)	28
2.1.7	Piranómetro	28
2.1.8	Sensor inteligente de velocidad de viento.....	29
2.1.9	Termómetro Digital.....	29
2.1.10	OptiCAD.....	30
2.1.11	SolidWorks	31
2.1.12	SolidWorks Flow Simulation	32
2.1.13	Tubo evacuado tricapa.....	33
2.2	Métodos.....	34
2.2.1	Determinación de la humedad de la madera	34
2.2.2	Determinación del tiempo mínimo para la obtención de carbón vegetal.....	35
2.2.3	Análisis termo gravimétricos	35
3	Capítulo III Resultados	37
3.1	Medición de humedad residual	37
3.1.1	Determinación del tiempo mínimo de carbonización en mufla	38
3.2	Determinación de la eficiencia en masa del proceso de carbonización	39
3.2.1	Determinación de la energía acumulada por el concentrador solar SK-14	41
3.3	Carbonización con el concentrador solar SK-14	43
3.4	Experimentación con concentrador solar SK-14 fijo en una sola posición.....	45
3.5	Desarrollo de Simulación	46
3.6	Cálculo para el posicionamiento de fuentes de luz.	46
3.6.1	Posicionamiento para Equinoccio.....	46
3.6.2	Posicionamiento en solsticio.....	48
3.7	Validación de simulación	49
3.7.1	Prueba del concentrador SK-14	50
3.8	Pruebas gráficas de diversas geometrías.....	52
3.9	Simulación del desempeño del concentrador diseñado.....	54
3.9.1	Situación 1.- Equinoccio	54
3.9.2	Situación 2 solsticio.....	56
3.10	Diseño del prototipo	58
3.11	Construcción del prototipo	63

3.12	Pruebas de concentrador diseñado	65
3.13	Simulación de temperatura en el absorbedor	66
3.14	Simulación de temperatura para el tubo evacuado	68
3.15	Prueba de temperatura con tubo evacuado.....	70
3.16	Prueba de concentrador solar para producir carbón vegetal.....	71
4	Capítulo IV Conclusiones.....	73
	Bibliografía.....	74

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1-1 Vista esquemática del interior del Sol</i>	1
<i>Ilustración 1-2 Espectro de radiación solar</i>	2
<i>Ilustración 1-3 Regiones del espectro electromagnético donde se muestra a detalle el espectro solar</i>	2
<i>Ilustración 1-4 Capas de la atmósfera</i>	3
<i>Ilustración 1-5 Perihelio y afelio de la tierra (No dibujado a escala)</i>	4
<i>Ilustración 1-6 Geometría Sol-Tierra (No dibujado a escala)</i>	5
<i>Ilustración 1-7 Descripción del movimiento aparente del Sol durante equinoccios y solsticios en una latitud de 21°</i>	6
<i>Ilustración 1-8 Descripción de la declinación solar (δ)</i>	7
<i>Ilustración 1-9 Piranómetro</i>	8
<i>Ilustración 1-10 Pirheliómetro</i>	9
<i>Ilustración 1-11 Radiación global anual promedio para la República Mexicana.</i>	9
<i>Ilustración 1-12 A) captador de tubos evacuados B) captador plano</i>	10
<i>Ilustración 1-13 A) concentrador de canal parabólico, B) CPC</i>	11
<i>Ilustración 1-14 A) Concentrador de Fresnel, B) Concentrador parabólico de revolución,</i>	11
<i>Ilustración 1-15 Concentrador de receptor móvil</i>	12
<i>Ilustración 1-16 Concentrador de canal con lente refractor</i>	13
<i>Ilustración 1-17 Concentrador de canal parabólico doble</i>	13
<i>Ilustración 1-18 Concentrador solar para calentamiento de aire</i>	14
<i>Ilustración 1-19 Concentrador solar propuesto por Tao</i>	15
<i>Ilustración 1-20 Hornos de tierra tipo fosa (izquierda) y tipo parva (derecha)</i>	17
<i>Ilustración 1-21 Diferentes tipos de horno de ladrillo: colmena (izquierda) y media naranja (derecha)</i>	19
<i>Ilustración 1-22 Hornos Missouri</i>	19
<i>Ilustración 1-23 Una carbonera media naranja apenas terminada</i>	20
<i>Ilustración 1-24 Horno metálico transportable tipo TPI</i>	21
<i>Ilustración 1-25 ICPS</i>	22
<i>Ilustración 2-1 imágenes de árboles correspondientes a cada tipo de madera</i>	25
<i>Ilustración 2-2 Mufla eléctrica</i>	26
<i>Ilustración 2-3 Concentrador solar SK-14</i>	27
<i>Ilustración 2-4 Contenedor</i>	27
<i>Ilustración 2-5 Registrador de datos (data logger)</i>	28
<i>Ilustración 2-6 Piranómetro S-LIB-M003</i>	28
<i>Ilustración 2-7 Sensor inteligente de velocidad de viento (Anemómetro)</i>	29
<i>Ilustración 2-8 Termómetro digital</i>	29
<i>Ilustración 2-9 OptiCAD 10</i>	30
<i>Ilustración 2-10 SolidWorks</i>	31
<i>Ilustración 2-11 Solid Works Flow Simulation</i>	32
<i>Ilustración 2-12 Esquema del tubo evacuado tricapa</i>	33
<i>Ilustración 2-13 Diagrama de componentes del tubo evacuado</i>	34
<i>Ilustración 3-1 Muestra expuesta por 6 horas</i>	38
<i>Ilustración 3-2 Muestra expuesta por 4 horas</i>	38
<i>Ilustración 3-3 Muestras pulverizadas de cada especie</i>	40
<i>Ilustración 3-4 Captador en concentrador solar SK-14</i>	43
<i>Ilustración 3-5 Colocación del piranómetro en el concentrador solar SK-14</i>	43
<i>Ilustración 3-6 Resultado del segundo experimento con Delonix regia (113g)</i>	44

<i>Ilustración 3-7 Resultado de Primer experimento con Acacia farnesiana (40g)</i>	44
<i>Ilustración 3-8 Resultado del tercer experimento con Pino ayacahuite (272g)</i>	45
<i>Ilustración 3-9 Resultado del cuarto experimento con Delonix regia (147g)</i>	45
<i>Ilustración 3-10 Resultado de experimento de concentrador solar en una sola posición</i>	45
<i>Ilustración 3-11 Captura de imagen de la hoja de cálculo con las coordenadas para posicionar las fuentes de luz en OptiCAD</i>	47
<i>Ilustración 3-12 Posicionamiento de fuentes de luz en OptiCAD</i>	47
<i>Ilustración 3-13 Descomposición de la pirámide cuadrada para realizar la ecuación 3-1</i>	48
<i>Ilustración 3-14 Comportamiento del Sol y el captador en el solsticio</i>	48
<i>Ilustración 3-15 Captura de hoja de cálculo con las coordenadas para posicionar las fuentes de luz para pruebas en solsticio</i>	48
<i>Ilustración 3-16 Film de 1 m² en OptiCAD simulando piranómetro</i>	49
<i>Ilustración 3-17 Modelo virtual del concentrador SK-14</i>	50
<i>Ilustración 3-18 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:00</i>	50
<i>Ilustración 3-19 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:10</i>	51
<i>Ilustración 3-20 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:30</i>	51
<i>Ilustración 3-21 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:20</i>	51
<i>Ilustración 3-22 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:50</i>	51
<i>Ilustración 3-23 Simulación a la 12 PM</i>	52
<i>Ilustración 3-24 Simulación a las 9 AM</i>	52
<i>Ilustración 3-25 Simulación de canal elíptico a las 12 Hrs</i>	52
<i>Ilustración 3-26 Simulación de canal elíptico a las 13 Hrs</i>	
<i>Ilustración 3-27 Simulación de canal elíptico a las 14 Hrs.</i>	53
<i>Ilustración 3-28 Simulación de canal elíptico a las 15 Hrs.</i>	
<i>Ilustración 3-29 Simulación de canal parabólico a las 16 Hrs</i>	53
<i>Ilustración 3-30 Simulación del canal parabólico a las 12 Hrs.</i>	54
<i>Ilustración 3-31 Simulación del canal parabólico a las 11 Hrs.</i>	54
<i>Ilustración 3-32 Simulación del canal parabólico a las 9 Hrs.</i>	55
<i>Ilustración 3-33 Simulación del canal parabólico a las 10 Hrs.</i>	55
<i>Ilustración 3-34 radiometría captada por el film a las 8 Hrs.</i>	55
<i>Ilustración 3-35 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 11 Hrs.</i>	57
<i>Ilustración 3-36 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 12 Hrs.</i>	57
<i>Ilustración 3-37 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 10Hrs.</i>	57
<i>Ilustración 3-38 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 9</i>	57
<i>Ilustración 3-39 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 8 Hrs.</i>	58
<i>Ilustración 3-40 Desempeño del concentrador seleccionado en equinoccio</i>	60
<i>Ilustración 3-41 Desempeño del concentrador seleccionado en solsticio</i>	60
<i>Ilustración 3-42 Dimisiones del concentrador seleccionado</i>	61
<i>Ilustración 3-43 Diseño de la estructura del concentrador</i>	61
<i>Ilustración 3-44 Tubo Absorbedor</i>	62
<i>Ilustración 3-45 Armado del prototipo</i>	63
<i>Ilustración 3-46 Armado del prototipo</i>	63
<i>Ilustración 3-47 Guía de enfoque</i>	64
<i>Ilustración 3-48 Base para piranómetro</i>	64
<i>Ilustración 3-49 Sistema de posicionamiento</i>	64
<i>Ilustración 3-50 Pegado de lámina</i>	64
<i>Ilustración 3-51 Prueba de temperatura con tubo de acero inoxidable</i>	65
<i>Ilustración 3-52 Comportamiento térmico del tubo de acero inoxidable absorbedor con viento</i>	66
<i>Ilustración 3-53 Comportamiento térmico del tubo de acero inoxidable absorbedor sin viento</i>	67
<i>Ilustración 3-54 Comportamiento térmico del tubo evacuado con radiación de 700 W</i>	68
<i>Ilustración 3-55 Comportamiento térmico del tubo evacuado con radiación de 450 W</i>	69

<i>Ilustración 3-56</i> Concentrador con tubo evacuado _____	70
<i>Ilustración 3-57</i> concentrador solar orientado al sur con inclinación de 32° _____	71
<i>Ilustración 3-58</i> Medición de temperatura interna del tubo _____	72
<i>Ilustración 3-59</i> Carbón obtenido con el concentrador diseñado _____	72

Índice de tablas

<i>Tabla 1-1 Valor calorífico de algunos combustibles</i>	16
<i>Tabla 1-2 Rendimiento de subproductos del ácido piroleñoso (en proporción a madera seca al aire)</i>	24
<i>Tabla 2-1 Características de la madera</i>	26
<i>Tabla 2-2 Características del concentrador SK-14</i>	27
<i>Tabla 2-3 Características del contenedor</i>	27
<i>Tabla 2-4 Características del Piranómetro S-LIB-M003</i>	28
<i>Tabla 2-5 Características</i>	29
<i>Tabla 2-6 Características principales del termómetro digital</i>	29
<i>Tabla 2-7 Características del tubo evacuado tricapa</i>	34
<i>Tabla 3-1 Ejemplo de cálculo energético para un solo valor</i>	42
<i>Tabla 3-2 Resultados obtenidos en experimento realizado con radiación solar</i>	44
<i>Tabla 3-3 Cálculo energético de concentrador SK14</i>	58
<i>Tabla 3-4 Comparación de diferentes colectores modificando la distancia focal en el solsticio</i>	59
<i>Tabla 3-5 Comparación de diferentes concentradores modificando la distancia focal en el equinoccio</i>	59
<i>Tabla 3-6 Características del tubo absorbedor</i>	62
<i>Tabla 3-7 Mediciones de primera prueba</i>	65
<i>Tabla 3-8 Datos de entrada para el simulador</i>	66
<i>Tabla 3-9 Datos arrojados por el simulador</i>	66
<i>Tabla 3-10 Datos de entrada para el simulador</i>	67
<i>Tabla 3-11 Datos arrojados por el simulador</i>	67
<i>Tabla 3-12 Datos de entrada para el simulador</i>	68
<i>Tabla 3-13 Datos arrojados por el simulador</i>	68
<i>Tabla 3-14 Datos de entrada para el simulador</i>	69
<i>Tabla 3-15 Datos arrojados por el simulador</i>	69
<i>Tabla 3-16 Resultado de mediciones ambientales para prueba del concentrador solar con tubo evacuado</i>	70
<i>Tabla 3-17 Resultado de mediciones ambientales</i>	72

Nomenclatura

°C	Grado Celsius
AlN/AlN-SS/Cu	Nitruro de aluminio/ nitruro de aluminio-acero inoxidable /cobre
CO ₂	Bióxido de carbono
g/ml	Gramo por mililitro
K	Grado Kelvin
kg	Kilogramo
kJ/kg	Kilo joule por kilogramo
km/h	Kilometro por hora
kW/m ²	Kilowatt metro cuadrado
m/s	Metros por segundo
n	Día del año
nm	Nanómetro (10 ⁻⁹ metros)
W	Watt
W/m ²	Watt por metro cuadrado
μm	Micrómetro (10 ⁻⁶ metros)
φ	Latitud
δ	Declinación solar
ω	Ángulo horario
γ	Azimut

Resumen

El carbón es una fuente de energía, para estufas y calderas, relativamente barata. Una ventaja importante del carbón es ser un recurso renovable y como tal no incrementa el inventario de CO₂ en la atmósfera. El proceso convencional para producir carbón vegetal es a través de métodos tales como fosas de tierra u hornos de ladrillos de media naranja. En estos casos, la energía necesaria para producir la carbonización es obtenida por medio de la combustión de una parte de la leña, lo cual lleva a una considerable disminución en la producción neta de carbón aunado a que la temperatura de combustión es incontrolable, lo que lleva a obtener productos de menor calidad y un rendimiento máximo de 200 a 300 Kg por tonelada de leña utilizada (FAO, 1983).

En el presente trabajo se aborda el diseño de un horno solar capaz de producir carbón vegetal a partir de leña. Se describe la metodología empleada, tanto para la caracterización de la leña como para el diseño del horno solar, su construcción y su evaluación posterior en campo. En el estudio preliminar se vio que un horno solar con seguimiento era inconveniente, por lo que se optó por un diseño que no requiriera seguimiento a lo largo del día.

El prototipo construido, con una superficie de captación de 1.37 m² permite obtener 70 g de carbón vegetal a partir de 180 g de leña, en cinco horas aprox., en un día soleado con una irradiancia promedio de 800 W/m², sin seguimiento solar durante todo el día.

Abstract

Carbon is an Energy source commonly used for stoves and boilers, relatively cheap. One of its main advantages is the fact that it is a renewable resource and as such does not contribute to the increase of atmospheric CO₂ inventory. The conventional process to produce charcoal consists of ground pits or brick kilns. In those cases, the energy required to carbonize the biomass is obtained from the partial combustion of the wood, which entails a substantial decrement on the net carbon yield of the system, in addition to the fact that the process temperature is difficult to control, resulting in a lower quality product and a maximum yield between 0.2 and 0.3 (FAO, 1983).

In the present work, the design of a solar oven capable of producing charcoal from wood is presented. The work methodology is described, both for the characterization of the wood and the design, construction and field test of the solar oven. In the preliminary study it was evident that a tracking solar concentrator was impractical, so it was opted for a design that did not require tracking of the sun.

The constructed prototype, with a surface of 1.37 m², allows to obtain 70 g of charcoal from 180 g of wood in 5 hours on a sunny day with an irradiance value of 800 W/m², without solar tracking during the day.

Introducción

La biomasa, y en especial la leña, es un recurso energético cuya explotación no se ha realizado de manera ordenada, pero de gran importancia para un sinnúmero de comunidades alrededor del país, donde la quema de este recurso es la única fuente energética fácilmente disponible. La explotación descontrolada ha traído como consecuencia problemas como la deforestación, erosión del suelo y efectos negativos en la fauna nativa. Por otra parte, su uso con poca tecnificación puede conllevar daños a la salud debido a quema ineficiente, incompleta y a la inhalación de vapores y gases de combustión.

Muchas comunidades comercializan tanto la leña como carbón vegetal, teniendo este segundo un mayor valor agregado y ventajas importantes sobre el primero al producir una combustión más limpia.. Este producto se obtiene de la pirólisis lenta de madera en ausencia de oxígeno, y la calidad varía de acuerdo con la temperatura alcanzada. Habitualmente el carbón vegetal se obtiene de manera tradicional en hornos de fosa. La eficiencia en masa de este proceso es típicamente del 20% para producir carbón vegetal a partir de leña, pues parte de la materia prima se consume para alcanzar y mantener la temperatura adecuada en el horno. La baja eficiencia hace que estos sistemas propicien una mayor tala , una mayor generación de efluentes, o en las comunidades cuyos cortes son regulados por las autoridades correspondientes, un bajo aprovechamiento económico del recurso disponible..

En el presente se propone el diseño y construcción de un horno para al obtención de carbón vegetal empleando energía solar, empleando un concentrador óptico, con miras a mejorar la eficiencia en masa de la conversión leña-carbón, y con ello pueda contribuir a disminuir la tala de árboles utilizados para dicha práctica.

1 Capítulo I Marco Teórico

1.1 El Sol

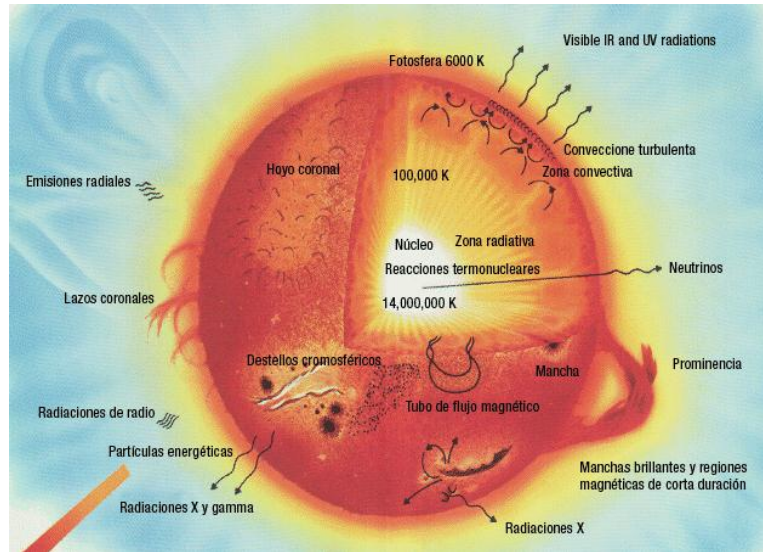


Ilustración 1-1 Vista esquemática del interior del Sol
Fuente: (ANMCT, 2010).

El Sol es la fuente de energía de nuestro planeta. Sin ella la vida como la conocemos simplemente no podría sustentarse. El Sol está conformado en su mayoría por hidrógeno, en un 92.1 %, y por helio, en un 7.8 %. El porcentaje restante se conforma de otros elementos. Tiene un radio aproximado de 700 000 km. Es alimentado en su interior por reacciones nucleares de fusión. Gracias a la alta temperatura y presión dentro del núcleo, los átomos de hidrógeno se fusionan entre sí, formando helio, ya que el núcleo de helio tiene una masa menor, que la suma de los cuatro núcleos de hidrógeno. Por esta razón, al formarse el nuevo átomo de helio se libera una gran cantidad de energía; esta energía escapa del núcleo del Sol, hasta llegar a la fotosfera del mismo. Se estima que el Sol podría seguir quemando hidrógeno de manera estable por 5000 millones de años. La temperatura en la fotosfera es de 6000 K aproximadamente y se estima que en la región del centro se encuentra a 15×10^6 K (HARPER, 2007 pág. 9) Ilustración 1-1.

Desde la fotosfera del Sol que se encuentra a unos 6000 K, se emiten radiaciones electromagnéticas en todas las direcciones y en diferentes longitudes de onda, abarcando desde el ultravioleta, pasando por la luz visible, hasta llegar al infrarrojo. La intensidad de la radiación solar varía según la longitud de onda, alcanzando un máximo alrededor de $0.5 \mu\text{m}$, que corresponde al espectro de la luz visible. El ojo humano saludable percibe esta longitud de onda como de color verde.

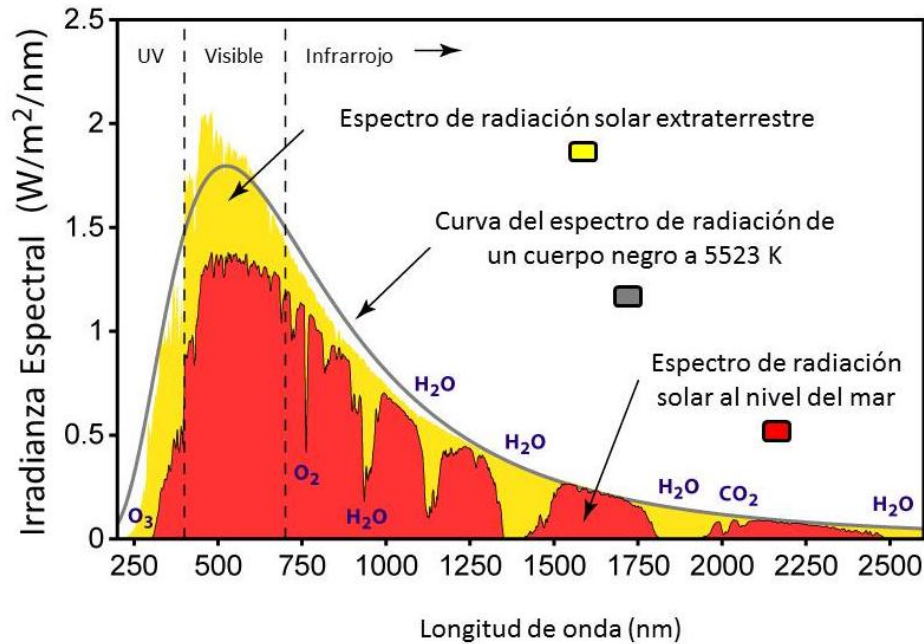


Ilustración 1-2 Espectro de radiación solar
Fuente: (MacKay, 2010)

El espectro electromagnético emitido por el Sol, corresponde a lo que en la Ilustración 1-2 se describe como la curva de radiación extraterrestre. Éste a su vez, se aproxima mucho al espectro electromagnético emitido por un cuerpo negro a 5523 K (Herrero Alvarez, 2009). Cuando la radiación solar pasa a través de la atmósfera, sufre un cambio en su espectro electromagnético, esto en función de la absorción parcial de radiación, debido al oxígeno en el aire y partículas de agua en la atmósfera. Para efectos de simulación de la radiación solar se emplea habitualmente el espectro de radiación solar a nivel del mar (curva roja en la Ilustración 1-2) (Zekai, 2008).

Como se puede observar en la ilustración anterior, el agua tiene un efecto muy importante sobre la radiación solar a nivel del mar. Adicionalmente, para días nublados la radiación solar se ve enormemente disminuida en todas las longitudes de onda. Para cuantificar la radiación solar que llega a la tierra, se utilizan las unidades W/m^2 (watt por metro cuadrado) y para cuantificar la radiación solar total se utiliza el Wh/m^2 (watt por hora por metro cuadrado), (Duffie, 1980). En la Ilustración 1-3 se muestran las longitudes de onda abarcadas por el espectro solar; comprendiendo desde el infrarrojo, pasando por luz visible hasta el ultravioleta.

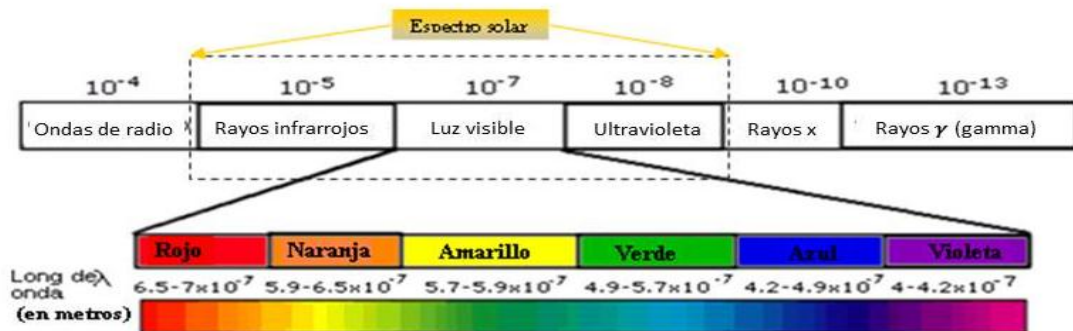


Ilustración 1-3 Regiones del espectro electromagnético donde se muestra a detalle el espectro solar



Ilustración 1-4 Capas de la atmósfera
Fuente: (Duran, 2010)

La atmósfera terrestre está constituida por una masa gaseosa estratificada. La variación vertical de la temperatura permite distinguir distintas regiones: tropósfera, estratósfera, mesósfera, termósfera, y exósfera (Ilustración 1-4). Fuera de la atmósfera, sobre cada m^2 inciden 1367 Watts de potencia solar en promedio (95 W/m^2 en el ultravioleta, 640 W/m^2 en el visible y 618 W/m^2 en el infrarrojo); este valor recibe el nombre de constante solar extra-terrestre (MANRIQUE, 1984), (Juárez, 2007).

El Sol emite radiación caracterizada por su espectro, esta radiación es absorbida por la atmósfera terrestre, que a su vez se calienta y emite una radiación en distinta longitud de onda a la absorbida, por esta razón es que el cielo tiene un peculiar color azul durante el día. En energía solar se distinguen la radiación solar directa, la que llega a la superficie de la tierra en una ángulo sólido muy pequeño de la dirección del Sol, y la radiación difusa, que cae a la superficie de la tierra después de ser dispersada por la atmósfera, en ángulos mayores que típicamente 0.53° (Myers, 2008). La radiación indirecta o radiación difusa tiene origen por este mismo fenómeno, aunque su mayor efecto lo podemos observar en los días nublados, cuando la atmosfera contiene una gran acumulación de partículas de agua. (P. Hinojosa, 2010)

Todas las moléculas de agua que se encuentran concentradas en la proximidad de la superficie terrestre, así como el bióxido de carbono, influyen fuertemente en la irradiación disponible a nivel del mar (Ilustración 1-3), ya que estas moléculas absorben fuertemente la radiación solar en las regiones infrarrojas. El ozono con ayuda del oxígeno, tiene una función fundamental para la absorción de los rayos ultravioleta, por lo que bloquean longitudes de onda menores de 280 nm. La capa de ozono bloquea, de esta manera, por completo los rayos ultravioleta de onda corta (UVC), que son altamente perjudiciales para la salud, y sólo parcialmente los rayos ultravioleta de onda intermedia (UVB), que son los causantes de las quemaduras de Sol (Lucas, y otros, 2006). De la radiación solar extraterrestre solamente la comprendida entre 290 nm y 2300 nm llega con atenuaciones a la superficie de la tierra, y es la que puede ser aprovechada. (MANRIQUE, 1984).

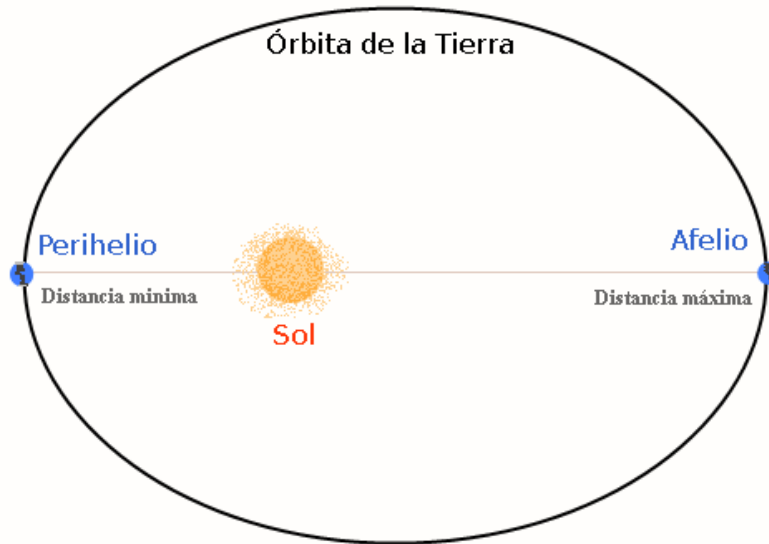


Ilustración 1-5 Perihelio y afelio de la tierra (No dibujado a escala)

Los cambios de estaciones que sufre la tierra, son provocados por los movimientos de translación y rotación. El movimiento de translación, se refiere al movimiento que realiza la tierra alrededor el Sol, este movimiento se realiza durante un año aproximadamente; la trayectoria que describe este movimiento se asemeja a una elipse. En la Ilustración 1-5 (Sánchez, 2009) se muestra como el Sol está en uno de los focos de la elipse. El punto en el que la Tierra se encuentra más cerca del Sol se le llama Perihelio (unos 147.5 millones de km), esto sucede en los primeros días de enero. Afelio es el punto cuando La Tierra se encuentra más alejada del Sol (152.6 millones de km aprox.); esto sucede, en los primeros días del mes de junio (MANRIQUE, 1984).

El movimiento de rotación, se refiere al movimiento que realiza la Tierra sobre su propio eje. Gracias a esto, en la superficie de la Tierra se puede observar el día y la noche. Sin embargo, el eje de la Tierra no es perpendicular al plano de translación, pues forma un ángulo de 23.45° . Esta inclinación ocasiona fundamentalmente los cambios de estaciones ya que el ángulo en que incide la radiación solar a la Tierra varía a lo largo del año, siendo rasante en invierno y más perpendicular en verano. Esto se muestra esquemáticamente en Ilustración 1-6.

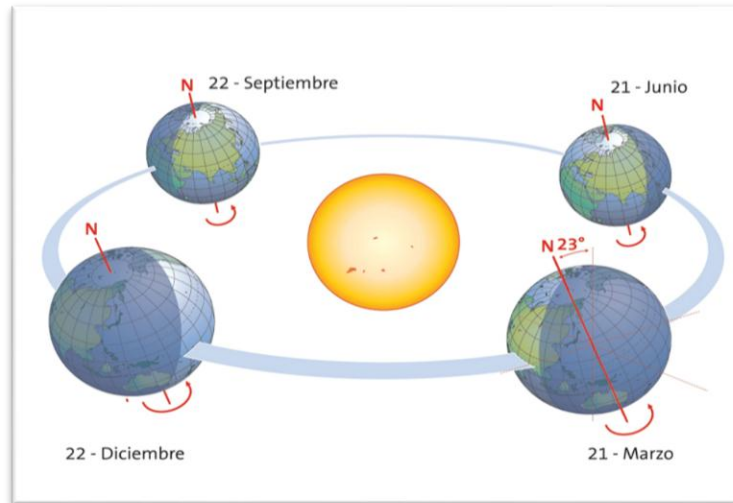


Ilustración 1-6 Geometría Sol-Tierra (No dibujado a escala)

1.2 Relación geométrica solar

Desde la época de Copérnico, se sabe que la Tierra gira alrededor del Sol en un año (movimiento de traslación). No obstante, para ciertos cálculos solares es más conveniente emplear la concepción Ptolemaica, considerando a la Tierra como fija y describiendo el movimiento del Sol como un *movimiento aparente*. Desde este punto de vista, el Sol está restringido a moverse con dos grados de libertad en el espacio. En consecuencia, su posición en el firmamento quedaría descrita mediante dos variables angulares: la altura solar y el acimut solar.

Es necesario tomar en cuenta el movimiento del Sol para conocer la dirección de la radiación directa que incide sobre un plano dado en cualquier instante, esto es importante, en especial para los dispositivos solares que requieren de seguimiento solar. Para aplicaciones que no requieren de seguimiento solar también es conveniente conocer el movimiento aparente del Sol a lo largo de un año para así poder elegir la orientación más conveniente de ese dispositivo y evitar problemas de interferencia de objetos circundantes, como la proyección de sombras, entre otros. En la Ilustración 1-7, se describe cómo es el movimiento del Sol en el equinoccio, manteniéndose el Sol en una posición perpendicular al observador. En el solsticio de verano, el Sol tiene una inclinación más hacia el norte y en el solsticio de invierno hacia el sur.

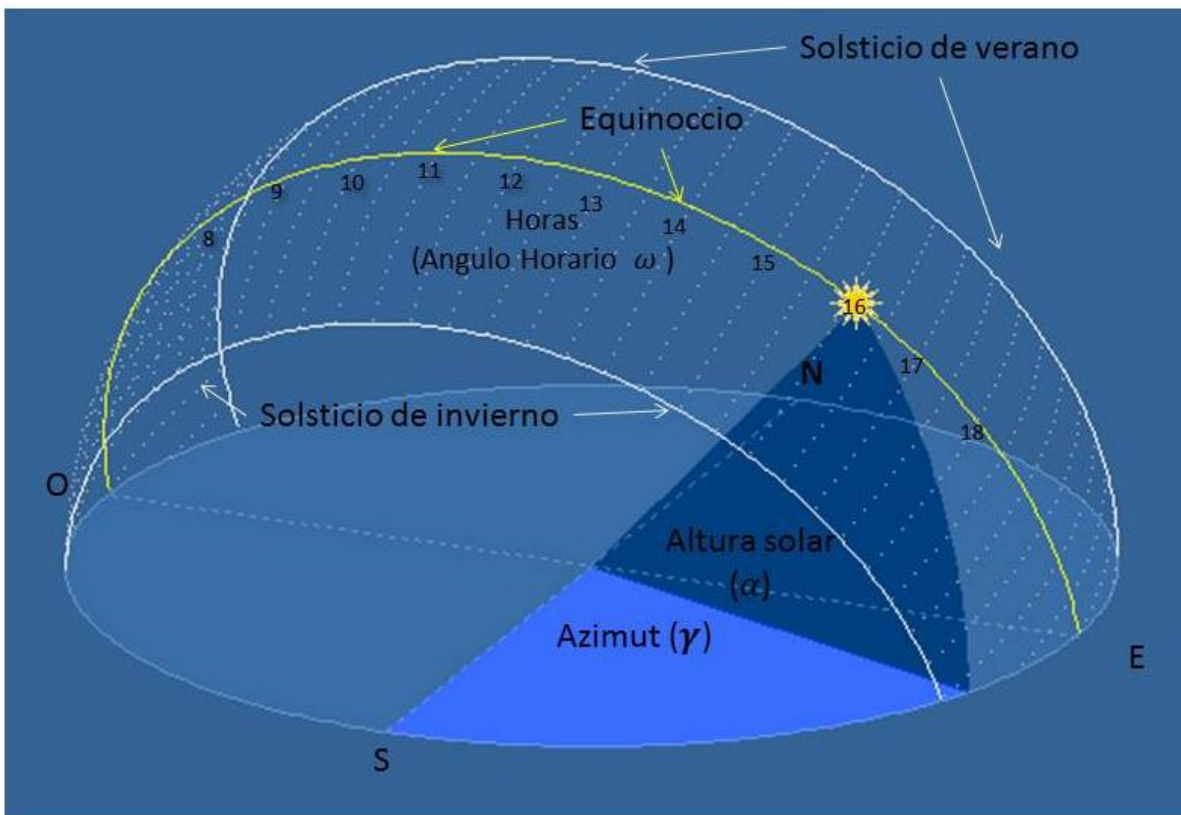


Ilustración 1-7 Descripción del movimiento aparente del Sol durante equinoccios y solsticios en una latitud de 21°.

A continuación se definirán los conceptos para describir la relación geométrica solar (MANRIQUE, 1984) (P. Hinojosa, 2010) (Duffie, 1980).

Latitud φ : se define como el ángulo que determina el lugar de interés sobre la tierra, con respecto al plano del Ecuador. Es positivo si se mide respecto al norte y negativo respecto al sur.

La declinación δ : define la posición angular del Sol al mediodía solar, (el momento en que el Sol está más alto en el firmamento con respecto al plano del ecuador). Es el índice de alejamiento de norte a sur (Ilustración 1-8) y depende del día del año (n). Puede calcularse mediante:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 * \frac{284 + n}{365} \right) \quad 1-1$$

Ángulo horario ω : es igual a cero al mediodía solar y adquiere un valor de 15° de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo por las tardes. Así, ω es, por ejemplo, igual a +30 a las 10:00, y ω es igual a -15 a las 13:00 horas.

Altura solar α : se define como el ángulo entre la horizontal y la línea del Sol. Se puede calcular mediante:

$$\alpha = \sin^{-1}(\cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega) + (\text{sen} \varphi * \text{sen} \delta) \quad 1-2$$

Azimut γ : define la desviación de los rayos del Sol con respecto al sur verdadero (se mide con relación al sur):

$$\gamma = \sin^{-1}\left(\cos \delta * \frac{\text{sen} \omega}{\text{sen} \alpha}\right) \quad 1-3$$

Haciendo uso de las expresiones anteriores y considerando que al amanecer y atardecer la altura solar es cero, puede calcularse el número de horas de asoleamiento diario. Haciendo $\alpha=0$ en la ecuación 1-2 se obtiene que:

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \varphi * \tan \delta) \quad 1-4$$

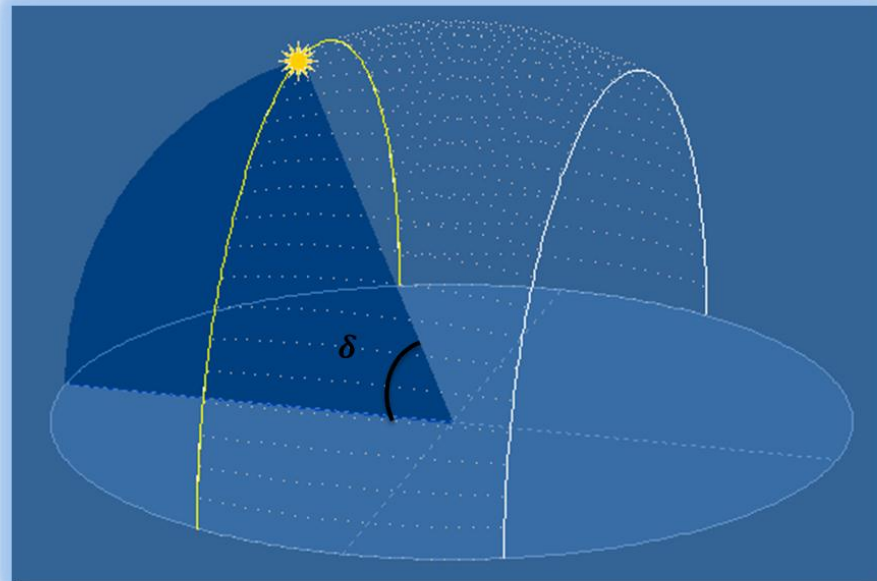


Ilustración 1-8 Descripción de la declinación solar (δ)

1.3 Dispositivos de medición solar

Para predecir o evaluar el funcionamiento de cualquier sistema de conversión de energía solar, es necesario considerar adicionalmente efectos meteorológicos. Como ya hemos visto con anterioridad debido a la presencia de la atmosfera terrestre, tenemos la radiación solar directa y la radiación solar difusa. Sin embargo, la presencia de nubes no se puede calcular, por lo que es necesario determinar experimentalmente la radiación solar instantánea en una determinada localidad geográfica. Con base en estos datos, se pueden crear modelos que predigan la insolación diaria promedio esperada para una localidad en determinada época del año. Para ello se han desarrollado dos instrumentos para la medición de la radiación solar: el piranómetro, para la radiación solar total y el pirheliómetro, para la radiación solar directa. Ambos instrumentos tienen transductores que entregan señales eléctricas proporcionales a la radiación solar.

El instrumento más difundido es el Piranómetro (solarímetro o actinómetro). Es el instrumento para medir la irradiación global o flujo de radiación en W/m^2 sobre una superficie horizontal. Su sensor está habitualmente construido con base en una termopila, la que transforma la temperatura de la superficie activa en una señal eléctrica. La radiación incide a través de dos cúpulas semiesféricas de vidrio sobre el sensor. En la Ilustración 1-9, se muestra un Piranómetro y un esquema ilustrando la incidencia de la radiación solar. El sensor en forma de disco tiene sectores de color blanco y negro debajo de los cuales está montada la termopila. Al incidir la radiación solar en los sectores de diferente color se produce un diferencial de temperatura que es proporcional a la radiación incidente.



Ilustración 1-9 Piranómetro

El Pirheliómetro (ilustración 1-9), mide la intensidad de la radiación solar directa. Consta de un tubo largo que limita el ángulo de aceptación de la radiación y un sensor al extremo de éste. Estos instrumentos se diseñan con un ángulo de aceptación de típicamente 1° . El sensor construido con base en una termopila tiene forma de disco, de color negro para absorber toda la radiación incidente. En la Ilustración 1-10, se muestra un Pirheliómetro y un esquema de la incidencia de la radiación pasando por el tubo de metal y llegando a la termopila.

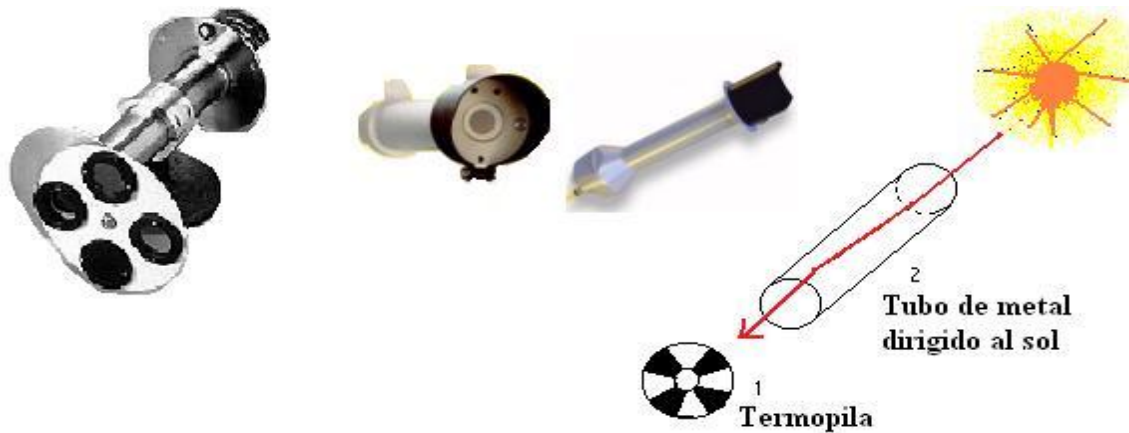


Ilustración 1-10 Pirheliómetro

En muchas estaciones meteorológicas se incluyen hoy en día mediciones de radiación solar. Muchas cuentan con sistemas automatizados de registro y comunicación a centros de acopio de información. Con estas mediciones se han elaborado mapas de radiación promedio. La Ilustración 1-11, presenta los datos de radiación global anual promedio para la República Mexicana. Podemos observar que la radiación promedio más baja en el país es de 5 kW/m^2 .

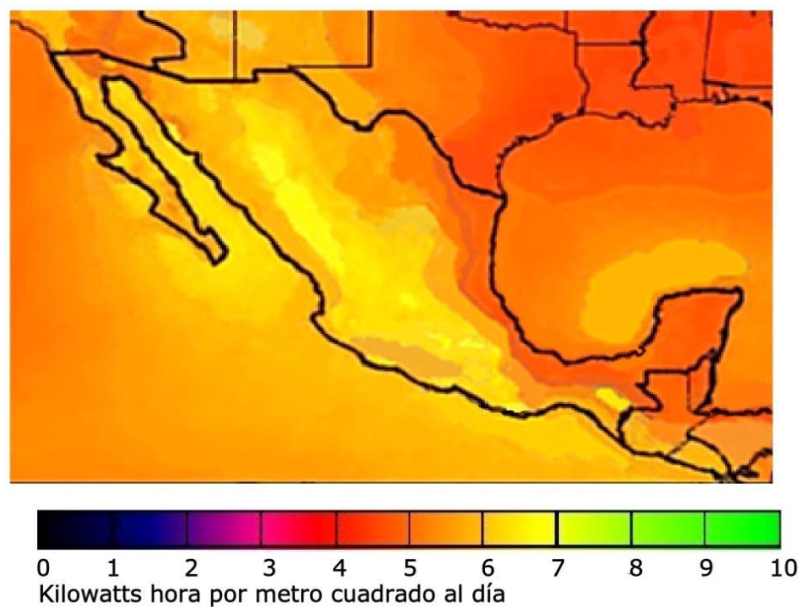


Ilustración 1-11 Radiación global anual promedio para la República Mexicana.
Fuente: (Ecoefecto, 2008)

1.4 Sistemas de captación térmica solar



A)



B)

Ilustración 1-12 A) captador de tubos evacuados B) captador plano

Se requiere de sistemas apropiados para transformar la energía solar en calor útil que a su vez se emplee para las actividades del hombre. La función de los colectores solares térmicos, es la de absorber eficientemente la radiación solar incidente y transferir la energía, típicamente a un fluido de trabajo. Existe una gran variedad de colectores solares, los cuales se clasifican según su grado de concentración, o según el nivel de temperatura que producen del fluido calor-portador (baja, media o alta temperatura) (Martínez, 2008).

Los colectores solares de baja temperatura, son típicamente aquellos que no tienen concentración como los captadores solares planos o de tubos evacuados, y que en promedio alcanzan temperaturas del orden de 60 a 90°C. Este tipo de captadores, son muy utilizados para el calentamiento de agua o de aire. Habitualmente estos sistemas son fijos, es decir, no tienen seguimiento solar y son orientados de acuerdo a la latitud en que se encuentren (Ilustración 1-12) (P. Hinojosa, 2010).

Los colectores solares de media temperatura, alcanzan temperaturas entre 100°C y 500°C. Estos dispositivos cuentan con algún tipo sistema de concentración, por ejemplo de canal parabólico. Este tipo de concentradores requieren de seguimiento solar, lo que implica muchas veces mover grandes espejos, lo que a su vez requerirá de un mayor costo de operación. En algunos dispositivos como los Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC) (Ilustración 1-13), se reduce el nivel de seguimiento solar o incluso se elimina por completo. Sin embargo se sacrifican en gran medida la energía recolectada, así como la relación de concentración. Esto trae como consecuencia directa, una disminución considerable en la temperatura máxima alcanzable por este tipo de arreglos ópticos (P. Hinojosa, 2010).

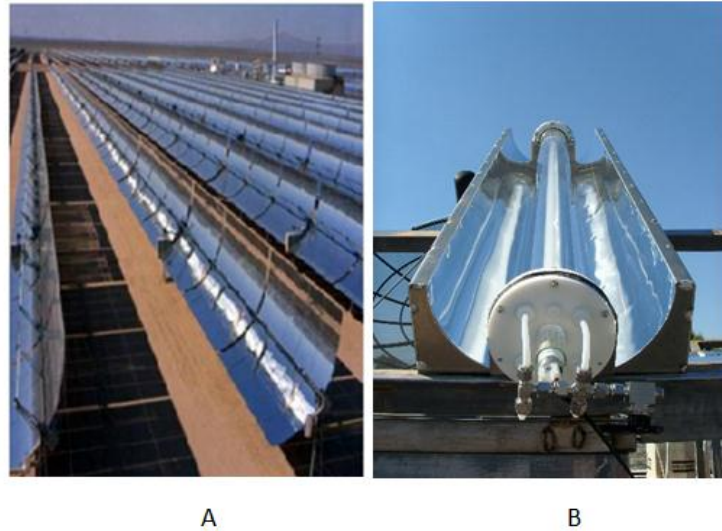


Ilustración 1-13 A) concentrador de canal parabólico, B) CPC

Los colectores solares de alta temperatura, son aquellos que logran temperaturas superiores a los 500°C. Para ello se requieren sistemas con una alta relación de concentración que se puede alcanzar empleando lentes de Fresnel, concentradores parabólicos de revolución o concentradores de torre central. Esta clase de concentradores, pueden alcanzar relaciones de concentración muy altas, y para ello requieren de sistemas de seguimiento solar muy precisos (Mills, 2004). En estos sistemas habitualmente es necesario utilizar grandes estructuras móviles que soporten los dispositivos reflejantes, mismos que requieren de una gran cantidad de energía para su operación. Este aspecto también incide en su elevado costo (Ilustración 1-14).

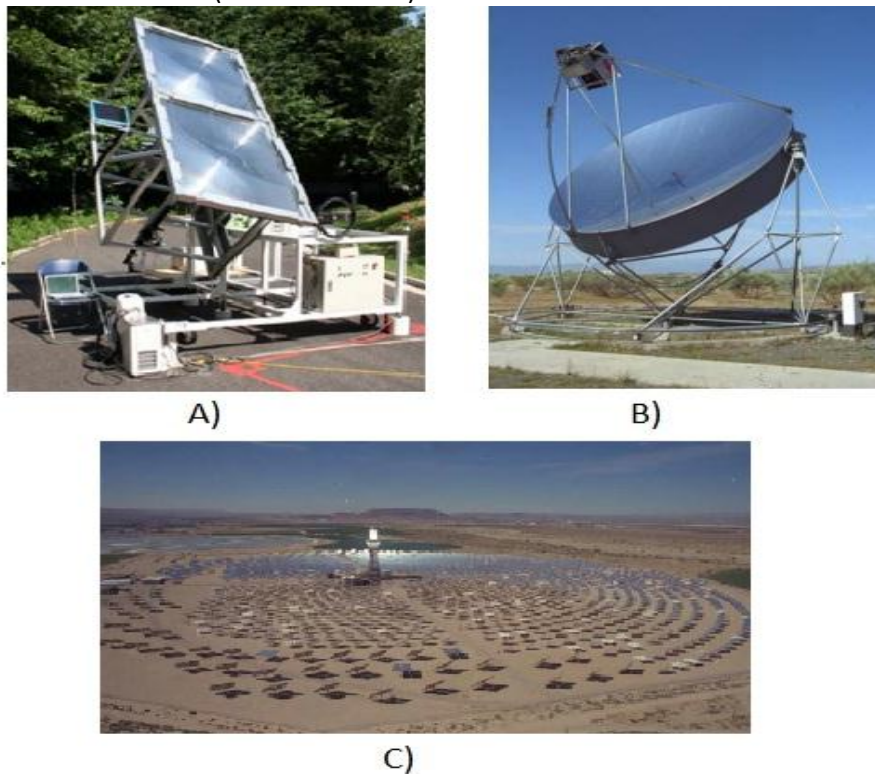


Ilustración 1-14 A) Concentrador de Fresnel, B) Concentrador parabólico de revolución,

C) Concentrador de torre central.

1.5 Concentradores solares estáticos y semiestáticos

Los concentradores estáticos son aquellos que no necesitan movimiento (seguimiento) para captar la energía solar. Los concentradores semiestáticos son aquellos que requieren únicamente ajustes esporádicos (por ejemplo una vez cada mes). Desde la década de los setenta se han desarrollado prototipos de estos concentradores, aunque por su baja relación de concentración sus aplicaciones son limitadas. A continuación se describen algunos de estos diseños.

1.5.1 Concentrador de receptor móvil

Este concentrador solar, diseñado a principios de 1970, cuenta con espejo estático semiesférico y un captador móvil que sigue el foco que se mueve de posición cuando el Sol hace su movimiento aparente. Este prototipo utilizaba agua como fluido de transferencia térmica, la cual alcanzaba temperaturas de salida de 80°C sobre la temperatura ambiente. Aunque fue probado nunca fue optimizado; uno de los problemas encontrados fue que la distribución de energía recolectada por el captador no era uniforme. (Imadojemu, 1994)

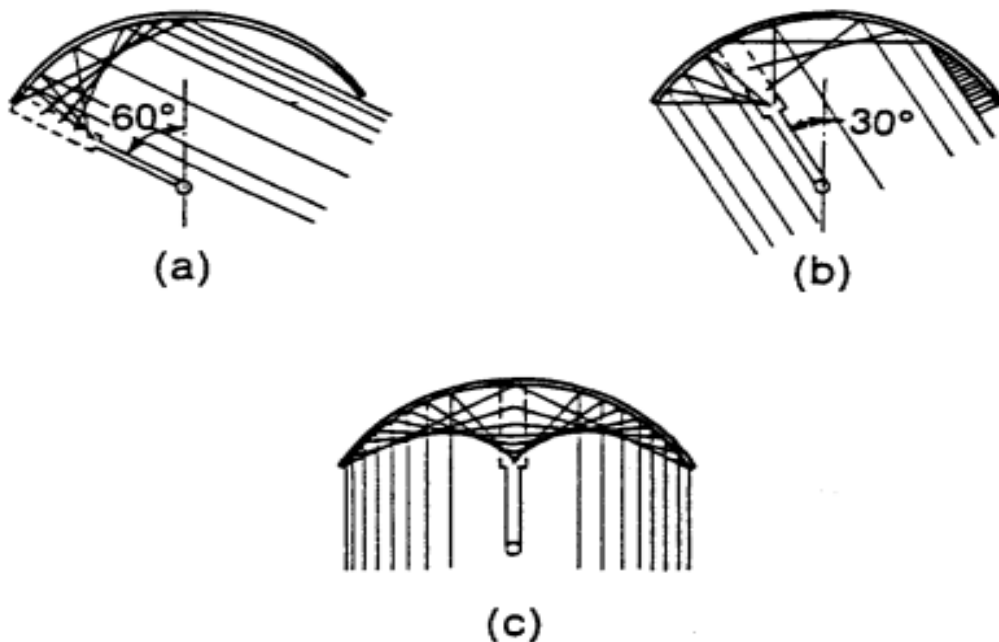


Ilustración 1-15 Concentrador de receptor móvil
Fuente: (Imadojemu, 1994)

1.5.2 Concentrador de canal con lente refractor

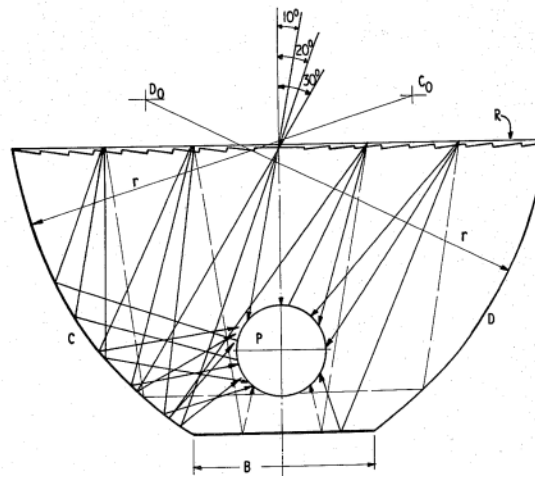


Ilustración 1-16 Concentrador de canal con lente refractor
Fuente: (Szulmayer, 1980)

Este diseño fue patentado en 1980 y consiste de un reflector de tipo canal, compuesto de una base plana (B) y unos segmentos circulares (C y D). Además de esto, el concentrador cuenta con una lente refractora (R), la cual aumenta el ángulo de aceptación del sistema hasta 30°. La energía concentrada llega hasta el captador (P), el cual es un tubo conteniendo un fluido de transporte térmico, como agua o aceite, y alcanza temperaturas de hasta 130 °C. Esta energía puede ser empleada en refrigeradores o sistemas de aire acondicionado por absorción o para la generación de electricidad. (Szulmayer, 1980)

1.5.3 Concentrador de canal parabólico doble

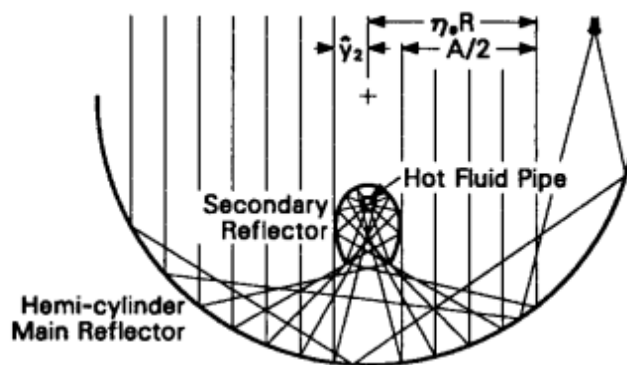


Ilustración 1-17 Concentrador de canal parabólico doble
Fuente: (Richter, 1996)

Este concepto de concentrador solar de canal, está compuesto por dos espejos reflejantes. El primero es un canal semi-cilíndrico estacionario, mientras el segundo es un pequeño concentrador de canal parabólico que sigue la luz semiconcentrada del primer espejo reflector. El segundo espejo es movido de acuerdo al movimiento del Sol, siguiendo la energía semiconcentrada por el primer espejo para finalmente ser concentrada en un tubo receptor. El ángulo de aceptación del primer espejo es muy amplio aunque la concentración final depende del sistema de movimiento del segundo concentrador, el cual cuenta con un ángulo de aceptación optimizado de 1° . Este concentrador puede ser orientado tanto de este a oeste o de sur a norte, no obstante su desempeño óptimo se encuentra al orientarlo de norte a sur, y dando una inclinación al espejo semiesférico igual a la latitud donde se encuentre. El receptor es un tubo donde el fluido de transporte puede ser agua o aceite (Richter, 1996)

1.5.4 Concentrador solar para calentamiento de aire

En la Ilustración 1-18 se muestra el diseño de un concentrador solar para calentamiento de aire. Está formado primeramente por una lente transparente que funciona como refractor, que refracta la luz aumentando el ángulo de aceptación del sistema en aproximadamente 10° , dándole a todo el sistema un ángulo de aceptación total de 23.73° . Una vez que la luz pasa a través de esta lente, es enviada hacia un arreglo de espejos de Canal Parabólico Compuesto (CPC), de donde, un vez que es concentrada, es enviada a un segundo arreglo de espejos en forma de canal parabólico, donde de nuevo es reflejada hacia los absorbedores colocados a un costado del segundo arreglo de CPC's. Este concentrador puede alcanzar temperaturas superiores a los 100°C , y tiene aplicaciones para calentamiento de aire para secado, baños saunas y aire acondicionado. Este sistema es orientado de este a oeste y puede ser completamente estático. Actualmente los prototipos que se han construido no cuentan con la lente refractora, por lo que necesitan ser reorientados al paso de los días (Rincón, y otros, 2009).

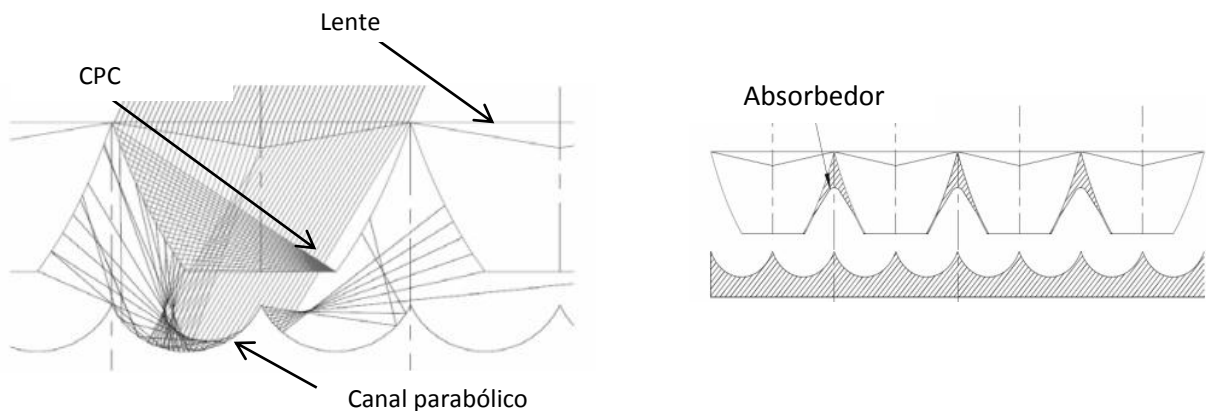


Ilustración 1-18 Concentrador solar para calentamiento de aire

Fuente: (Rincón, y otros, 2009)

1.5.5 Concentrador solar propuesto por Tao

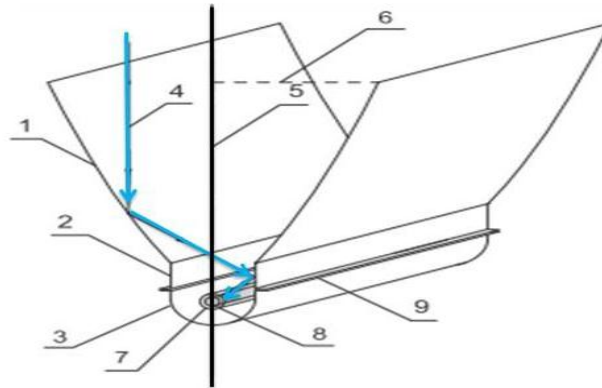


Ilustración 1-19 Concentrador solar propuesto por Tao
Fuente: (Tao, y otros, 2011)

Este diseño consiste de una superficie reflectora tipo parabólico (1), un espejo secundario plano (2), un concentrador de canal parabólico en la parte baja (3) y un captador de alta temperatura (8). Este diseño de concentrador aún es teórico y se encuentra en fase de optimización, pero sus diseñadores lo ofrecen como una alternativa a los concentradores de canal parabólico convencional para subsanar algunas deficiencias, como son el hecho de que el receptor mismo proyecte sombra sobre el espejo, el que al estar el receptor elevado es más proclive a pérdidas por convección del viento, el que se requiere un sistema de seguimiento muy preciso y que si el sistema de seguimiento se desenfoca tan sólo una fracción de grado, este pierde toda la energía concentrada. (Tao, y otros, 2011)

De acuerdo a la Ilustración 1-19; la luz (4) entra en una dirección con simetría axial (5), la superficie (1) del reflector parabólico refleja la luz (4) al espejo secundario (2); la luz después es reflejada por el espejo secundario (2) para finalmente llegar al captador (8). Un tubo de vidrio al vacío (7) envuelve al captador para reducir la pérdida de calor. Además, tiene un concentrador de canal parabólico en la parte baja (3) conectado con el espejo secundario (2) por medio de una brida (9), éste funciona cuando la luz reflejada por el espejo secundario (2) no incide en el captador (8), entonces la luz llega al concentrador de canal parabólico de la parte baja (3) y es reflejado hacia el captador (8). Por lo tanto el captador puede aceptar el reflejo de la radiación solar de ambos lados de una forma eficiente.

1.6 Carbón Vegetal

La leña, como parte de la biomasa, es probablemente el recurso energético más antiguo empleado por el hombre. Posteriormente, especialmente durante la edad de hierro, el carbón se volvió fundamental en la metalurgia. Es de pensarse que el carbón de origen vegetal haya jugado un papel muy importante en esa época, puesto que las elevadas temperaturas que se requieren para fundir los minerales no pueden alcanzarse utilizando simplemente madera (Syred, y otros, 2005). En la actualidad el uso de carbón vegetal como combustible en la metalurgia ha sido casi sustituido por completo por otros combustibles como el coque metalúrgico. La revolución industrial incrementó la demanda de carbón tanto mineral como vegetal, y por mucho tiempo, el carbón fue el motor de la actividad industrial

hasta la aparición del petróleo. En los países en vías de desarrollo, el carbón vegetal continúa siendo un recurso energético primordial en muchas comunidades, donde los combustibles industrializados no están disponibles. Curiosamente, en los países industrializados el consumo de carbón vegetal se ha incrementado en años recientes, ya que es usado comúnmente para la cocción de alimentos de forma tradicional, en fiestas y reuniones (Menéndez, 2007).

Una ventaja considerable del carbón vegetal sobre la madera, es su mayor poder *calorífico* (Tabla 1-1). Además su combustión arroja comparativamente menor cantidad de contaminantes, lo que es una ventaja cuando es usado para calentar viviendas o cocinar en lugares con una ventilación deficiente.

Tabla 1-1 Valor calorífico de algunos combustibles

Combustible	Poder calorífico kJ/kg
Madera verde	15 000
Madera seca	19 000
Carbón vegetal	31 000
Carbón mineral (coke)	30 000
Carbón bituminoso	27 000
combustóleo	44 000
Keroseno	46 000
Alquitrán de madera	20 000
Gas natural	45 000
Gas de madera gasificada	5 000

Fuente: (FAO, 1983)

1.6.1 Obtención de carbón vegetal a partir de madera

La madera tiene tres componentes principales: celulosa, lignina y agua. En madera fresca el contenido de agua puede ser de 50% o superior, dependiendo del tipo. Un secado al aire reduce el contenido de agua a típicamente 12-18%, este paso previo para la obtención del carbón vegetal ahorra una gran cantidad de energía. Una vez seca, se calienta fuera del contacto con el aire, en primer lugar, la humedad contenida por la madera es extraída y hasta que ésta es completamente eliminada, la madera se mantendrá a una temperatura de entre 100 y 110 °C, una vez que se ha secado por completo, su temperatura aumenta hasta llegar a los 275°C. En esta fase, la madera se empieza a descomponer en subproductos de la carbonización. Estas sustancias, se liberan gradualmente a medida que aumenta la temperatura y se completa a los 450 °C. En esta etapa, el residuo sólido es principalmente carbón (alrededor de 70%) con sustancias alquitranosas.

La carbonización es un proceso que implica un gasto energético considerable y tradicionalmente se realiza dentro de grandes hornos, éstos pueden tener paredes de metal, ladrillo o incluso tierra, éstas evitan que la leña entre en contacto con el aire en forma masiva, sin embargo, se deja entrar algo de aire al horno, para que parte de la madera se queme y provea el calor necesario. En esto radica la baja eficiencia en la producción del carbón vegetal ya que se puede requerir eventualmente un alto

porcentaje de leña para proveer el calor necesario. En los hornos tradicionales en donde la combustión es interna, ésta puede ser regulada dependiendo de la cantidad de aire que se deje ingresar al horno y esto se hace de forma empírica, de tal manera que en los hornos tradicionales se pueden tener eficiencias de conversión leña a carbón de entre 40% y 12% dependiendo de cuánta leña se consumió para generar calor. En la actualidad existen hornos donde la combustión se realiza de manera externa, éstos tienen una eficiencia mucho mayor ya que prácticamente toda la madera destinada para hacer carbón es aprovechada.

1.6.2 Hornos tradicionales

1.6.2.1 Horno de tierra

Quizás el horno de estructura de tierra sea el sistema más antiguo para obtener carbón. Aún en la actualidad se emplea para producir probablemente más carbón vegetal que por cualquier otro método. Existen dos métodos principales para la construcción de los hornos de tierra: el de fosa y el de pila o parba. En el primero se excava una fosa, se rellena de leña y se tapa con tierra para aislar la cámara. El segundo consiste en formar una pila de madera al ras de piso y cubrirla con tierra (horno de parba). La Ilustración 1-20 muestra los dos tipos de diseño de horno de tierra en operación.



Ilustración 1-20 Hornos de tierra tipo fosa (izquierda) y tipo parva (derecha)

El horno de fosa, requiere una capa de suelo profundo con tierra liviana. La inversión de capital es mínima: sólo se necesitan palas, hachas y una fuente de ignición; sin embargo, es un método que desperdicia mucho los recursos, puesto que es difícil controlar la circulación de los gases en la fosa. Mucha de la madera se quema quedando en cenizas debido al exceso de aire, otra parte importante queda sólo parcialmente carbonizada si no se seca y calienta correctamente. Un problema más es la inhomogeneidad en el producto, ocasionada por el hecho de que la carbonización en una fosa comienza en un extremo y progresa hacia el otro. Esto, ocasiona que el carbón del comienzo de la quema, habiendo sido calentado por más tiempo, tenga un contenido de volátiles mucho menor que el carbón del otro extremo. Un problema adicional es la reabsorción del ácido piroleñoso, que tiende a condensarse en la tierra usada para tapar la fosa. Si caen fuertes lluvias, el ácido piroleñoso viaja de la tierra hacia el carbón y puede afectar sus características como combustible.

En el horno de parva el proceso es el mismo que en el de fosa. Es una opción más atractiva que el horno de fosa para suelos rocosos, duros o delgados, o donde la capa freática esté cerca de la superficie. El método da buenos resultados cuando no se producen infiltraciones de aire en la envoltura. En la práctica son frecuentes los bajos rendimientos de carbón de leña, puesto que es difícil obtener una parva con un buen empaque. Con grandes trozos de leña esparcidos en la pila, la circulación del gas es errática y como resultado se tienen grandes cantidades de madera no carbonizada, parecido al caso del horno de fosa.

El sellado de este tipo de horno es difícil y las reparaciones estructurales, una vez encendida la parva, pueden ser peligrosas para el trabajador. Esto trae como consecuencia que las infiltraciones de aire no sean controladas y el carbón se reduzca a cenizas en algunas partes de la pila, antes de que el resto haya sido carbonizado correctamente. Este tipo de hornos se construyen manualmente; de querer mecanizar esta técnica, es necesario considerar los altos costos asociados con la operación y mantenimiento de la maquinaria (gasolina, capacitación de operarios, refacciones), que por regla general no se recuperan con la venta del producto terminado.

Los hornos a base de tierra generalmente son utilizados en operaciones pequeñas, como el autoconsumo de un pequeño pueblo o aldea, o una microempresa dedicada a la manufactura de carbón vegetal. La obtención de carbón vegetal a mayor escala, utiliza hornos ya sea de ladrillo o metálicos, que permiten un mejor control del flujo de gases en el sistema, una mayor homogeneidad en las temperaturas y estructuras reutilizables de mayor volumen. Los hornos de ladrillo construidos y operados correctamente, representan sin duda uno de los métodos más efectivos para la producción de carbón vegetal.

1.6.2.2 Hornos de ladrillo

Los hornos tradicionales de ladrillo han sido mejorados a lo largo de los siglos de manera prácticamente empírica. Recién en el siglo XX se han realizado estudios sistemáticos para mejorar su eficiencia, tanto energética como económica. Este es el caso del horno “*colmena*” en Brasil, el horno “*media naranja*” en Argentina (Ilustración 1-21) y el horno “*Missouri*” en los Estados Unidos de América (EUA) (Ilustración 1-22).

El horno Missouri desarrollado en EUA está hecho comúnmente de cemento armado o bloques perforados de cemento. Tiene chimeneas y grandes puertas de acero, que permiten el uso de equipos mecánicos para carga y descarga. Tiene dos desventajas para su empleo en países en vía de desarrollo: requiere de una cierta cantidad de acero y cemento en su construcción, siendo ambos materiales costosos y frecuentemente de importación, y no es tan fácil de enfriar como los otros hornos.



Ilustración 1-21 Diferentes tipos de horno de ladrillo: colmena (izquierda) y media naranja (derecha)

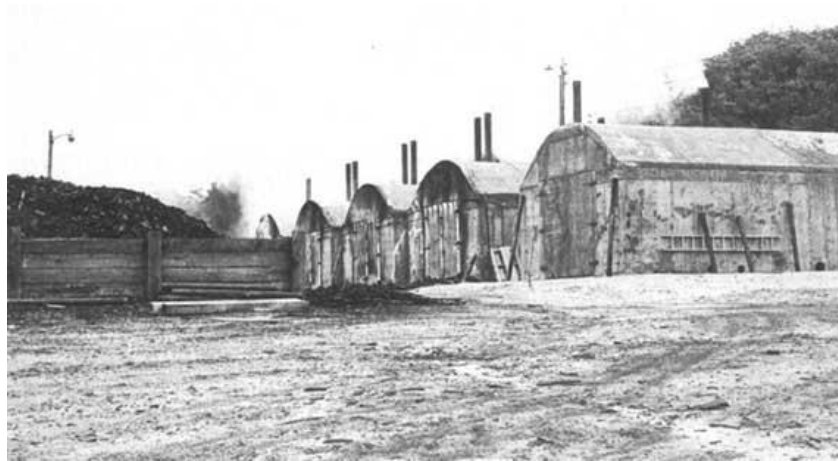


Ilustración 1-22 Hornos Missouri

El horno de media naranja tiene dos grandes aberturas diametralmente opuestas una de la otra; la línea de las aberturas debe ser perpendicular a la dirección de los vientos predominantes. La altura de cada abertura es de 160 - 170 cm con un ancho de 1.10 m en la base y de 0.70 m en la parte superior. Se usa una para cargar el horno con leña, mientras que la otra se usa para la descarga del carbón vegetal. Las aberturas del horno se cierran con ladrillos y barro que se levantan después de completar la carga y ambas se abren cuando ha terminado la carbonización. Se trata de una operación sencilla, que se repite cada vez que se carga la “carbonera”, que consiste simplemente en colocar un ladrillo sobre otro y recubrir luego con barro.



Ilustración 1-23 *Una carbonera media naranja apenas terminada*

Se usan alrededor de 100 ladrillos por abertura y pueden volverse a usar hasta que se rompan por el uso. La parte superior del horno tiene un agujero (llamado "chimenea") que mide alrededor de 0.22 a 0.25 m de diámetro. Para la construcción de este tipo de hornos, se requiere de un total de 5500 a 6000 ladrillos. Los hornos de colmena de Brasil son muy similares a los de media naranja, aunque tienen un mayor número de chimeneas (regularmente 6) con un diámetro de 10 cm cada una.

Las ventajas de los hornos de media naranja y brasileños son:

- Pueden ser construidos en tamaños medianos a grandes.
- Se construyen totalmente con ladrillos hechos localmente con arcilla/arena de cocción liviana y argamasa de barro.
- Son robustos y no son dañados fácilmente. No pueden ser fácilmente dañados por exceso de temperatura; pueden quedar expuestos sin protección al Sol y a la lluvia, sin corrosión o efectos negativos, y tener una vida útil de 5 a 8 años.
- Los ladrillos asentados sobre barro pueden ser reciclados y usados de nuevo cuando se reubican los hornos.
- El control de la quema es relativamente sencillo, especialmente en el caso del horno de media naranja.
- Los hornos pueden ser enfriados fácilmente.
- Se sellan fácilmente con el uso de arcilla viscosa que se seca rápidamente.
- Ambos sistemas funcionan en grupo (baterías) de hornos y han sido bien investigados y normalizados, de manera que se ha llevado al máximo la eficacia de la mano de obra y del uso de la materia prima.
- El carbón vegetal producido se adapta a todos los usos, inclusive para el hogar, metalúrgico y para la producción de carbón activado.

La mayor desventaja de estos dos tipos de horno es que no permiten la recuperación o quema reciclada de ningún subproducto, ya sea alquitrán o gases, con lo que aumenta la contaminación del aire y reduce la eficiencia termal. Sin embargo, debe hacerse notar que ningún diseño de horno a base de ladrillos exclusivamente es capaz de recuperar alquitrán sin recurrir a componentes de acero, con el consecuente aumento en el costo y la complejidad.

1.6.2.3 Hornos metálicos



Ilustración 1-24 Horno metálico transportable tipo TPI

Un tercer tipo de horno para carbonización de madera, es el horno metálico transportable, desarrollado originalmente en Inglaterra y muy utilizado en Europa en la década de 1930. Esta tecnología fue transferida a los países en vías de desarrollo a fines de los años 60, en particular a Uganda. Existe un diseño optimizado para este tipo de horno, desarrollado por el *Tropical Products Institute (TPI)*, (ver Ilustración 1-24).

El horno metálico, puede fabricarse a partir de tambores estándar de 45 galones de aceite (aprox. 180 l). Este método ha funcionado bien cuando se utiliza materia prima que quema rápido, como la madera de palma de coco, cáscaras de coco y basura de madera. Sin embargo, cuando se trata de hacerlo funcionar con madera de latifoliadas densas, es difícil obtener una completa carbonización. Aún con materiales de baja densidad, el contenido volátil del carbón vegetal producido es algo elevado, lo que no es un inconveniente serio para un combustible doméstico de uso local. Si el carbón debe ser producido para exportación, entonces se requiere el uso de hornos metálicos más apropiados (FAO, 1983).

1.6.3 Hornos de combustión externa

1.6.3.1 ICPS (*Improved Charcoal Production System*)

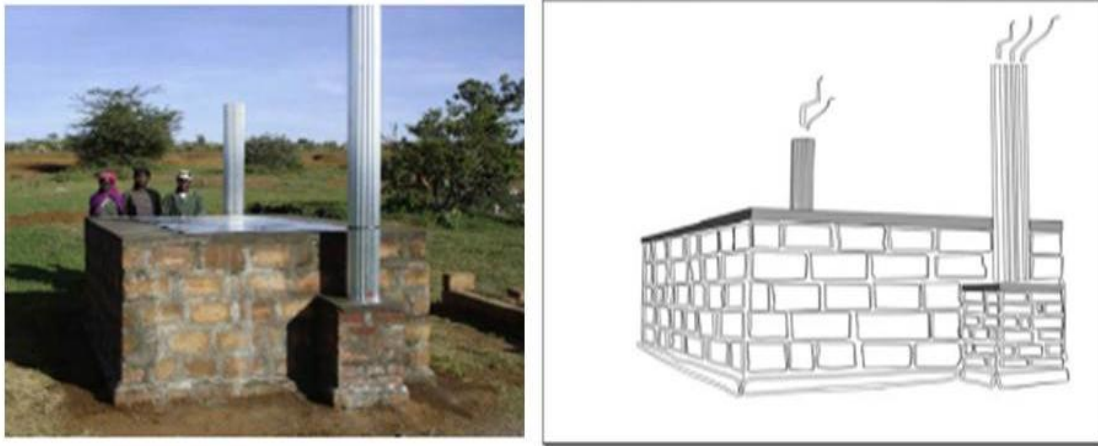


Ilustración 1-25 ICPS

El ICPS (Sistema de producción de carbón mejorado, por sus siglas en inglés) (Adam, 2009) es un sistema de combustión externa, construido con una capa doble de ladrillos, lo que provee un buen aislamiento térmico, por lo que la pared exterior sólo llega a calentarse a unos 50°C. La parte superior removible, es fabricada con 4 tapas de aislante térmico especializado y una delgada lamina de metal, la cual tiene como objetivo enfriar al horno rápidamente ya que una vez terminada la etapa de carbonización, la tapa es retirada y el horno se puede enfriar en 12 horas (Ilustración 1-25).

Otra característica del ICPS es que funciona en dos fases. Durante la primera fase de operación (secado), que dura aproximadamente 4 horas, por la chimenea sale únicamente vapor de agua. Una vez concluida esta fase el vapor cambia de color, tornándose amarillo. Esta señal se usa como indicador de que se inicia el proceso de pirolisis y la segunda fase está por iniciar. En este momento los gases de la chimenea se redirigen a la cámara de combustión, donde todos los gases de la madera son quemados y el calor generado es aprovechado. Este sistema además de ofrecer un alto rendimiento, también tiene la ventaja de disminuir la duración del proceso de 6 a 7 semanas (para el sistema de parba) a sólo 24 horas, de las cuales la mitad del tiempo es empleado para enfriar el horno para posteriormente extraer el carbón vegetal (Adam, 2009).

1.6.4 Rendimiento y calidad del carbón

El rendimiento y la calidad del carbón, dependen de los materiales volátiles ajenos al agua que se encuentran en el carbón vegetal. Estos residuos líquidos que no fueron eliminados completamente durante el proceso de carbonización determinan el rendimiento y la calidad del producto. A bajas temperaturas (300°C), es posible obtener un rendimiento de casi el 50% respecto al peso original de la madera seca. Con temperaturas de carbonización de entre 500 y 600°C se alcanza un rendimiento del 30%. A temperaturas de 1000°C el contenido de sustancias volátiles es casi cero, pero el rendimiento cae alrededor del 2%.

El carbón con alto contenido de sustancias volátiles es fácil de encender, pero al quemarse produce humo. El carbón con poca cantidad de volátiles tiene una combustión muy limpia, pero tiene dificultades al encenderse. Un carbón vegetal comercial que se obtiene a partir de leña con un rendimiento de entre 30-40%, tiene una cantidad ligeramente superior al 30% de sustancias volátiles. El carbón con muchas sustancias volátiles es menos quebradizo que el que tiene poca cantidad de volátiles, aunque el carbón vegetal con poca cantidad de volátiles puede ser usado como materia prima para posteriormente convertirlo en carbón activado (FAO, 1983) (Menéndez, 2007).

1.6.5 Recuperación de subproducto de la carbonización

En el proceso habitual de carbonización, se usa la energía interna de la madera, quemando parte de la misma y parte de los subproductos. Los subproductos no quemados escapan a la atmósfera en forma de humo. Sin embargo, estos subproductos pueden ser recuperados pasando los gases liberados a través de una serie de condensadores de agua, obteniendo el llamado ácido piroleñoso y el gas de la madera. El gas de la madera, puede ser usado sólo como combustible y se compone típicamente de 17% de metano, 2% de hidrógeno, 23% de monóxido de carbono, 38% de bióxido de carbono, 2% de oxígeno y 18% de nitrógeno. El gas tiene un valor calorífico de alrededor de 10,8 Mega Joules (MJ) por m³, o sea, alrededor de un tercio del valor calorífico del gas natural; desgraciadamente con los métodos tradicionales es casi imposible recuperar el gas de madera, ya que, normalmente es quemado durante el proceso de carbonización.

1.6.5.1 Ácido piroleñoso

Ácido piroleñoso es el nombre de condensado en bruto y se compone mayoritariamente de agua. Es un líquido sumamente contaminante, nocivo y corrosivo, que debe eliminarse por medio de la quema con la ayuda de otros combustibles. Sin embargo, tratado de una manera correcta puede ser utilizado como insecticida o como abono. Aunque se pueden recuperar los subproductos para su venta, en la práctica esto resulta muy costoso.

Los componentes de ácido piroleñoso, además del agua son: alquitranes de madera, tanto solubles e insolubles en agua, ácido acético, metanol, acetona y otros complejos químicos en menores cantidades. Si se deja en reposo, el ácido piroleñoso se separa en dos capas consistentes; la primera capa es la capa insoluble en agua, que comúnmente es llamada "alquitrán de madera", que es usado como antiséptico veterinario o como preservador de madera. La segunda capa es acuosa y contiene los alquitranes solubles en agua que son un complejo de productos químicos alquitranosos, ácido acético, metanol, acetona, metilacetona y pequeñas cantidades de ácidos más complejos y otras sustancias.

Tabla 1-2 Rendimiento de subproductos del ácido piroleñoso (en proporción a madera seca al aire)

Alquitrán de madera	4%
Ácido acético	5%
Metanol	16%
Acetona y metilacetona	8%
Agua	67%

Fuente: (FAO, 1983)

2 Capítulo II Materiales y métodos

En este capítulo se detallan los materiales y métodos por separado, que fueron necesarios para el desarrollo de este trabajo. En la sección de *Métodos* se describirán los procedimientos, para determinar la temperatura mínima que inicia el proceso de carbonización, así como el tiempo mínimo para dicho proceso.

2.1 Materiales

En esta sección, se describe el tipo de madera usado para la fase de experimentación, así como el equipo necesario para llevar a cabo sus diferentes etapas. Igualmente, se describen los equipos de medición que se utilizan y por último las características técnicas de los componentes que conforman el concentrador solar que fue resultado de este trabajo.

2.1.1 Madera empleada

El tipo de madera fue escogido por su fácil acceso a ellos ya que pertenecen a árboles que crecen en el centro de la República Mexicana, además de que crecen en distintos climas. Tal es el caso de la Acacia farnesiana que pueden soportar climas muy secos y su abundancia es tal que en algunos lugares se le considera una plaga. La Delonix regia también soporta climas secos, además puede crecer en lugares con mucho contenido de sal. Su adaptación en el continente americano fue tal que es muy común ver este tipo de árbol. En el caso del Pinus ayacahuite crece en lugares montañosos donde el agua es más abundante, su crecimiento es muy rápido y puede alcanzar alturas de hasta 50 m.

Otra razón importante para escoger diferentes tipos de madera fue comprobar si existía alguna diferencia significativa en la obtención de carbón vegetal que pudiera ser un impedimento para realizar este proceso con energía solar. Las características de dicha madera son mostradas en la Tabla 2-1

Pino ayacahuite
(Pino vikingo)



Delonix regia
(Framboyán)



Acacia farnesiana
(Huizache)



Ilustración 2-1 imágenes de árboles correspondientes a cada tipo de madera

Tabla 2-1 Características de la madera

	Pino ayacahuite	Delonix regia	Acacia farnesiana
Nombre común	Pino Vikingo	Framboyán	Huizache
Densidad	0.528 g/ml	1.0503 g/ml	1.0819 g/ml
Crecimiento	Rápido	Rápido	Rápido
Tolerancia a la sequía	Bajo	Alta	Muy alta
Requerimiento nutricional	Medio	Poco	Poco
Altura promedio	30-45 m	10 a 15 m	1-3 m
Altura máxima	50 m	18 m	7 m
Lugar de origen	Zona montañosa de México	Madagascar	Norte américa y Centro américa

2.1.2 Mufla

Una mufla eléctrica (Ilustración 2-2) es un horno para temperaturas elevadas (hasta 1200°C). En contraste con la mufla de gas, aquella tiene la ventaja de no contaminar las muestras con los gases de combustión. Además de esto la mufla eléctrica cuenta con un control electrónico el cual controla la temperatura interna del horno de manera precisa. La mufla eléctrica se utilizó para el secado de madera así como para determinar la temperatura y el tiempo necesario para carbonizar las muestras de madera.



Ilustración 2-2 Mufla eléctrica

2.1.3 Balanza analítica

La balanza analítica es un instrumento utilizado en el laboratorio que sirve para medir la masa. Su característica más importante es que posee muy poca incertidumbre, lo que la hace ideal para utilizarse en mediciones muy precisas. El modelo utilizado fue el APX-200 y tiene una capacidad máxima de 200 g con una resolución de 0.0001 g.

Con la balanza analítica se puede hacer una relación entre la masa perdida por cada una de las muestras al efectuar cada uno de los experimentos, con el objetivo de conocer la cantidad de sustancias volátiles que se extrajeron durante la experimentación a realizar, con esto también se pudo conocer la calidad del carbón obtenido al final de la investigación.

2.1.4 Solar SK-14

El concentrador parabólico de revolución SK-14 (Ilustración 2-3), fue diseñado con el propósito de ser una cocina solar, a este tipo de cocinas solares se les denomina cocinas solares por concentración, en ellas se puede cocinar casi todo tipo de comida, debido a las altas temperatura que pueden alcanzar. Este modelo puede ser utilizado con recipientes de hasta 12 litros, abasteciendo de comida hasta 20 personas, su superficie reflejante está conformado por una serie de espejos en forma triangular que al ser colocados en la estructura forman una parábola de revolución. Sus principales características se encuentran en la Tabla 2-2 (EG-SOLAR, 2009).

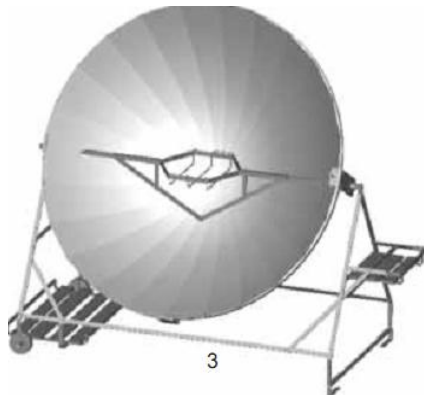


Ilustración 2-3 Concentrador solar SK-14

Tabla 2-2 Características del concentrador SK-14

Marca	Eg-solar
Diámetro	1400 mm
Peso	20 Kg
Estructura	Aluminio
Superficie reflectora	Aluminio anodizado
Potencia con radiación Directa de 750 Watt/m²	700 Watts

Este concentrador es utilizado para comprobar la posibilidad de realizar la conversión de la madera a carbón vegetal. Cabe mencionar que para la utilización de este concentrador, es necesario realizar seguimiento solar manual ya que no cuenta con ningún sistema autónomo para realizar esta tarea. Por lo que es necesario realizar los ajustes para re-enfocar el concentrador cada 15 minutos durante cada uno de los experimentos

2.1.5 Contenedor

El contenedor y receptor utilizado en este experimento, es un accesorio del concentrador solar SK-14 de la marca EG-Solar (EG-SOLAR, 2009), el cual es utilizado en cocinas solares. Cuenta con un recubrimiento de peltre negro que absorbe la energía solar y la convierte en calor útil para cocinar. Además, cuenta con una tapa que evita la entrada de aire y que impide que la madera se queme durante los experimentos.



Ilustración 2-4 Contenedor

Tabla 2-3 Características del contenedor

Marca	EG-Solar
Diámetro	14 cm
Color Exterior	Negro
Capacidad	1 Litro

2.1.6 Registrador de datos (data logger)

Es un dispositivo electrónico que registra datos en función del tiempo por medio de instrumentos y sensores de medición conectados externamente, el modelo “HOBO Micro Station” puede funcionar a la intemperie y en condiciones climáticas hostiles gracias a su carcasa de plástico rígido. Este modelo puede registrar cuatro mediciones distintas hasta por un año, ya que cuenta con una memoria de 512 Kb que puede almacenar 50 000 mediciones para su posterior análisis (MicroDAQ, 2011).

4 conexiones para sensores inteligentes
Puede registrar datos de: temperatura, humedad, humedad , precipitación, presión barométrica, humedad del suelo, la velocidad del viento, dirección del viento y radiación solar.
1 año de duración de la batería por medio de 4 pilas alcalinas AA.
512K de memoria puede almacenar más de 500 000 mediciones.
Memoria EEPROM que conserva los datos incluso si fallan las baterías.



Ilustración 2-5 Registrador de datos (data logger)

2.1.7 Piranómetro

El Piranómetro inteligente con sensor de silicio (Ilustración 2-6) mide la radiación solar en el rango espectral de 300 a 1100 nm. El sensor cuenta con una carcasa de aluminio anodizado, cuenta con una resolución de 1.25 W/m² y está calibrado para usarse en luz natural. Sus características principales se muestran en la Tabla 2-4. (MicroDAQ, 2011) Con el objetivo de obtener una relación energética, se utilizó el pirómetro para medir la irradiación solar a la que será expuesta la madera a lo largo del experimento.



Ilustración 2-6 Piranómetro S-LIB-M003

Tabla 2-4 Características del Piranómetro S-LIB-M003

Rango de medición	0-1280 W/m²
Temperatura de operación	de -40°C a 75°C
Precisión	±10.0 W/m ² o ±5% adicionalmente temperatura afecta su medición en 0.38 W/m ² /°C desde los 25°C
Resolución	1.25 W/m ²
Drift	<±2% por año
Rango espectral	300 a 1100 nm
Dimensiones	41mm de largo x 32mm de diámetro

2.1.8 Sensor inteligente de velocidad de viento

El Sensor inteligente de velocidad de viento (Ilustración 2-7), mide la velocidad del viento, así como las ráfagas de viento usando un anemómetro de 3 aspas. Este dispositivo tiene la capacidad de conectarse con facilidad al Registrador de datos (data logger) para posteriormente analizar los datos y determinar, la influencia del viento con los resultados obtenidos en los experimentos realizados. (MicroDAQ, 2011)



Ilustración 2-7 Sensor inteligente de velocidad de viento (Anemómetro)

Tabla 2-5 Características

Parámetros de medición	Velocidad media del viento
Rango de medición	Ráfagas de viento por más de 2 segundos Desde 0 hasta 25 m/s (0 a 160 km/h)
Precisión	de $\pm 1,1$ m / s (3.8 km /h) o 4% de la lectura que sea mayor
Resolución	0.38 m / s (1.3 km /h)
Medición inicial	apartir de 1 m / s (3.5 km /h)
Velocidad máxima del viento	54 m / s (193 km/h)

2.1.9 Termómetro Digital

El termómetro HI93530N es un termómetro a prueba de agua que usa un potente microprocesador para linealizar la respuesta del termopar para mejorar su precisión y resolución. Este instrumento puede medir en rangos de -149.9 a 999.9 en °C y de -24.9 a 999.9 en °F con una precisión de 0.1°. Este medidor está equipado con la función HOLD que congela la actual medición en la pantalla, también cuenta con una función °C/°F que permite escoger las mediciones en grados Celsius o Fahrenheit. Además de ello dispone de una amplia gama de termopares para aplicación para agua aire y sólidos (Clarkson, 2011). Este dispositivo se utilizará para monitorear la temperatura interna del receptor a utilizar en los experimentos a realizar con el concentrador solar a diseñar.



Ilustración 2-8 Termómetro digital

Tabla 2-6 Características principales del termómetro digital

Modelo	Clarkson HI93530N
Rango	de -200.0 a 999.9 °C; 1000 a 1371 °C
Resolución	Resolución 0.1 °C (-149.9 a 999.9 °C), 0.2 °C (-200.0 a -150.0 °C),
Precisión	± 0.5 °C (-100.0 a 999.9 °C
Ambiente de trabajo	-10 °C a 50°C
Peso	235 g
Dimensiones	150 x 80 x 36 mm

2.1.10 OptiCAD

El raytracing o trazado de rayos es un algoritmo para síntesis de imágenes tridimensionales. Para simular los efectos de reflexión y refracción se trazan rayos recursivamente desde el punto de intersección que se está sombreando dependiendo de las características del material del objeto interceptado, el OptiCAD es un software que maneja este tipo de algoritmo dentro de su programación, dando la posibilidad de simular las características ópticas de distintas geometrías y materiales. Además de esto OptiCAD permite conocer las características de la luz reflejada o refractada, una de estas características importantes es la distribución de la energía respecto a su longitud de onda.

OptiCAD tiene la capacidad de realizar diseños en su propia plataforma, pues tiene componentes incluidos como:

- Lentes esféricas y cilíndricas.
- Espejos cónicos, parabólicos, elípticos, esféricos y planos.
- Cilindros y elipsoides.
- Múltiples fuentes de luz y detectores.
- Colectores de canal parabólico y elíptico.
- Lentes de Fresnel.

Además de estos componentes, el software permite la importación de objetos poligonales de programas CAD y toda las superficies pueden ser modificadas en reflexión y absorción, dando como resultado una simulación con mayor exactitud.

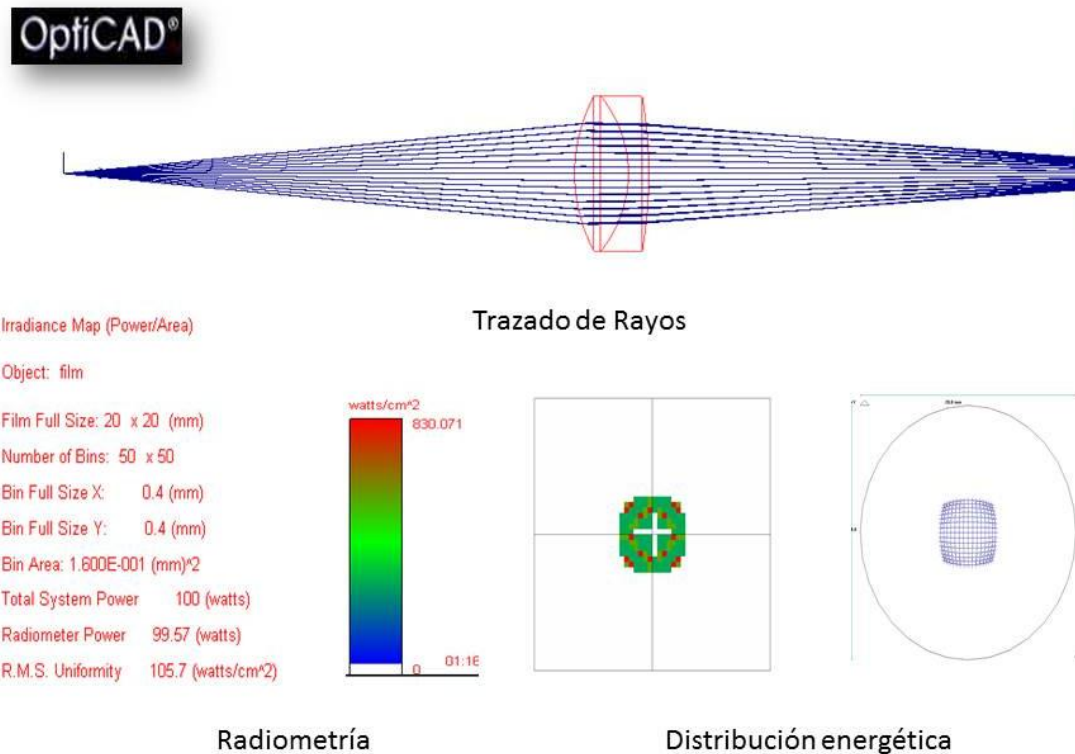


Ilustración 2-9 OptiCAD 10

2.1.11 SolidWorks

Es un software para diseño mecánico automatizado, el programa permite modelar piezas por separado, para posteriormente ensamblarlas en un nuevo modelo, permite también extraer información técnica del modelo, así como también, realizar planos de forma automática. La plataforma de SolidWorks, permite integrar una amplia gama de herramientas CAD mecánico, validación de diseños, gestión de datos de productos, comunicación de diseños y productividad de CAD. Esto permitió realizar el prototipo de una manera sencilla, extraer sus características técnicas y simular su comportamiento térmico.

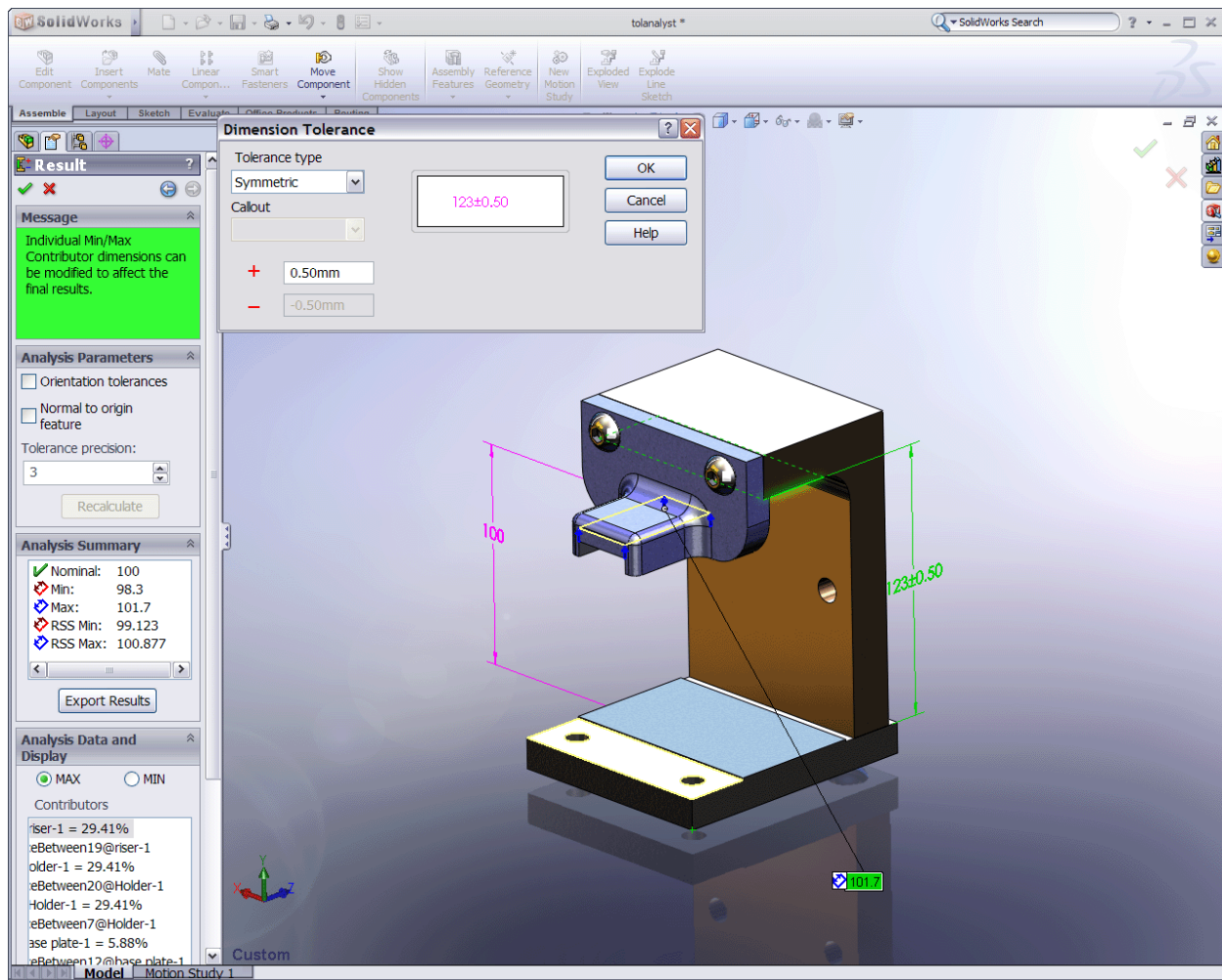


Ilustración 2-10 SolidWorks

2.1.12 SolidWorks Flow Simulation

Flow Simulation, es una herramienta de simulación para SolidWorks, que se basa en Mecánica de Fluidos Computacional (CFD). La mecánica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Flow simulation realiza millones de cálculos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas. Esta técnica permite analizar una amplia gama de problemas complejos que incluyen:

- Análisis de dos y tres dimensiones.
- Análisis de flujos internos y externos
- Análisis de flujo en estado estacionario y flujo transitorio
- Análisis de líquidos incompresibles y flujos de gas compresibles, incluyendo regímenes subsónicos, transónicos y supersónicos.
- Análisis de condensación de vapor de agua.
- Cálculo de humedad relativa de flujo en gases.
- Análisis de líquidos no newtonianos.
- Análisis de gases reales.
- Análisis de flujos multiespecies.
- Análisis de flujo con transferencia de calor entre fluidos y sólidos.
- Análisis de resistencia térmica por contacto.
- Análisis de radiación entre superficies.
- Análisis de flujo con efectos gravitacionales.
- Análisis de flujo en medios porosos.
- Análisis de flujo en paredes con superficie rugosa.

Esto nos permitió realizar una simulación térmica del captador con una mayor exactitud, observando su comportamiento térmico, al ser expuesto a la radiación solar concentrada y al mismo tiempo cómo la influía el viento en diversas situaciones.

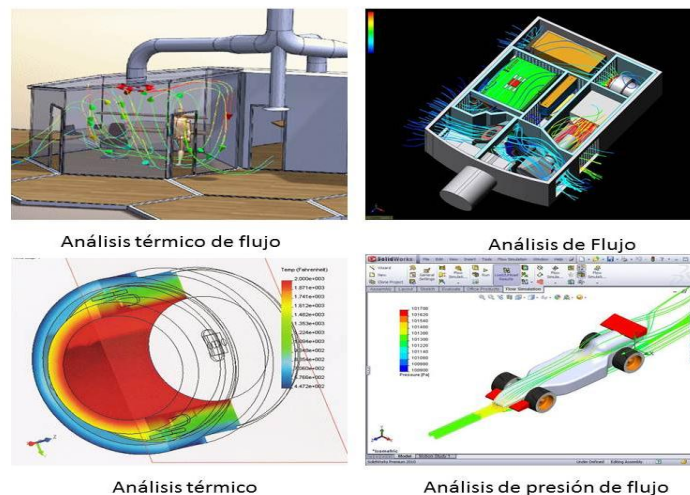


Ilustración 2-11 Solid Works Flow Simulation

2.1.13 Tubo evacuado tricapa

Un tubo evacuado se forma de dos tubos de vidrio borosilicato concéntricos, unidos por uno de los extremos. Los tubos evacuados tricapa (Ilustración 2-12), son de vidrio de borosilicato al alto vacío, con nitrato de aluminio y cobre, lo que les da el color característico “rojizo” en el interior del mismo, los cuales pueden calentarse a más de 300°C en seco (Quan, 2010).



Ilustración 2-12 Esquema del tubo evacuado tricapa

Diagrama (Ilustración 2-13)

- 1 - Tubo interior.
- 2 - Superficie absorbedora.
- 3 - Espacio entre los tubos al vacío.
- 4 - Tubo exterior.
- 5 - Retenedor (spring clip).
- 6 - Getter (elemento que ayuda a mejorar la calidad del vacío en el interior del tubo).
- 7 - Capa de bario (indicador visual del vacío en el tubo, esta película es de color plateado y se deposita dentro del tubo exterior en su extremo inferior. Esta capa se vuelve de color blanco si el tubo pierde el vacío) (Sun-Radian, 2010).



Ilustración 2-13 Diagrama de componentes del tubo evacuado

Tabla 2-7 Características del tubo evacuado tricapa

Características		
Estructura	Estructura coaxial de doble-tubo de Todo-vidrio	
Material de cristal	Alto borosilicate 3.3	
Diámetro y grueso externos del tubo	47 mm±0.7mm&=1.6mm	
Diámetro y grueso internos del tubo	37 mm±0.7mm&=1.6mm	
Longitud del tubo	1500mm±0.5mm	
Propiedad absorbente de la capa	Material	AIN/AIN-SS/CU
	Método de sedimento	Reacción de corriente directa de lanzar salpique
	Absorción especificada	As=0.90~0.93(AM1.5)
	Coefficiente de la emisión	$\sum h=0.05\sim 0.75(80^{\circ}\text{C}\pm 1.5^{\circ}\text{C})$
Grado de vacío	P≤5×10 ⁻³ Pa	
Promedio coeficiente de pérdida de calor	ULT=0.6~0.7W/(M2. °C)	
Temperatura del estancamiento (temperatura dentro de los tubos evacuados vacíos):	270-300°C	
Resistencia a granizos	25 mm	

2.2 Métodos

2.2.1 Determinación de la humedad de la madera

La determinación de la humedad residual de la madera se puede realizar por gravimetría desecando la madera en una mufla eléctrica por tiempos prolongados. En la literatura se encuentran temperaturas de proceso de 95 °C, 105 °C y 120 °C. En nuestro caso se utilizó 100°C.

Para determinar la cantidad de agua en la madera se empleará la siguiente metodología:

- Seleccionar las muestras de madera a secar.
- Pesar cada una de las muestras a secar por separado en la balanza analítica.
- Introducir las muestras a un recipiente de metal con tapa.
- Programar la mufla eléctrica a 100°C, asegurarse a que la mufla esté correctamente cerrada y esperar a que llegue a esta temperatura.

- Introducir el recipiente con la muestra en la mufla, procurando realizar la operación en el menor tiempo posible.
- Esperar 24 horas.
- Apagar la mufla eléctrica y abrir la tapa de ésta para que se enfríe.
- Una vez fría la cámara sacar el recipiente con las muestras y cerrar la tapa de la mufla eléctrica.
- Esperar a que las muestras se enfríen.
- Pesar cada una de las muestras a secar por separado en la balanza analítica.
- Anotar los resultados en la bitácora para su posterior análisis.

2.2.2 Determinación del tiempo mínimo para la obtención de carbón vegetal

Como se menciona en el capítulo 1.6.1 de la literatura (FAO, 1983) se encuentra que la temperatura de carbonización es de 275 °C. Se empleará el siguiente proceso para determinar si esta temperatura es suficiente para obtener una carbonización completa y para determinar el tiempo mínimo requerido para carbonizar completamente muestras de madera de diámetros de típicamente 1 cm.

Para determinar si la temperatura es suficiente se colocará en un recipiente cerrado una muestra de madera de 1 cm de diámetro, en mufla eléctrica, primeramente por espacio de 24 horas. Se tomará como temperatura del proceso la indicación digital de temperatura de la mufla. Después de apagada la mufla y dejar enfriar hasta temperatura ambiente el contenido se procede a verificar sí:

- (A) La superficie de la muestra se ha carbonizado a simple vista.
- (B) Si esto ha sucedido se procederá a seccionar transversalmente la muestra y se verificara si se ha carbonizado hasta el centro.

En el caso de que la muestra se hubiera carbonizado superficialmente pero no se hubiera carbonizado hasta el centro, se repetirá el procedimiento empleando tiempos más largos.

En caso de que la muestra no manifieste carbonización en su superficie o para tiempos razonablemente largos no se logre carbonizar completamente, se repetirá el procedimiento elevando paulatinamente la temperatura.

En caso de que después de la primera corrida se hubiera carbonizado totalmente la muestra se repite el procedimiento sucesivamente empleando tiempos cada vez más corto hasta que se llegue al punto en el cual la muestra esté prácticamente carbonizada salvo una pequeña región en el centro.

2.2.3 Análisis termo gravimétricos

En el análisis termo gravimétrico se coloca una muestra pequeña previamente pesada en el instrumento. Empleando un gas inerte, típicamente argón, se protege la muestra de una posible oxidación. En muchos casos la muestra tiene que ser pulverizada para ser analizada en TGA, como es el caso de las muestras de madera.

El porta-muestras cuenta con un sistema de balanza analítica capaz de analizar los cambios de masa que sufre la muestra a medida que se le va calentando, bien sea en forma lineal con la temperatura, o simplemente continuamente en el tiempo. Se registra la variación de masa en función a la temperatura y se calcula la derivada de la masa. De estos datos se obtiene información con respecto a las temperaturas en las que se inician y terminan procesos tales como descomposición o gasificación o procesos más complejos en los cuales haya variación de masa. El equipo que se empleó en las mediciones es un TGA de la marca Netsch.

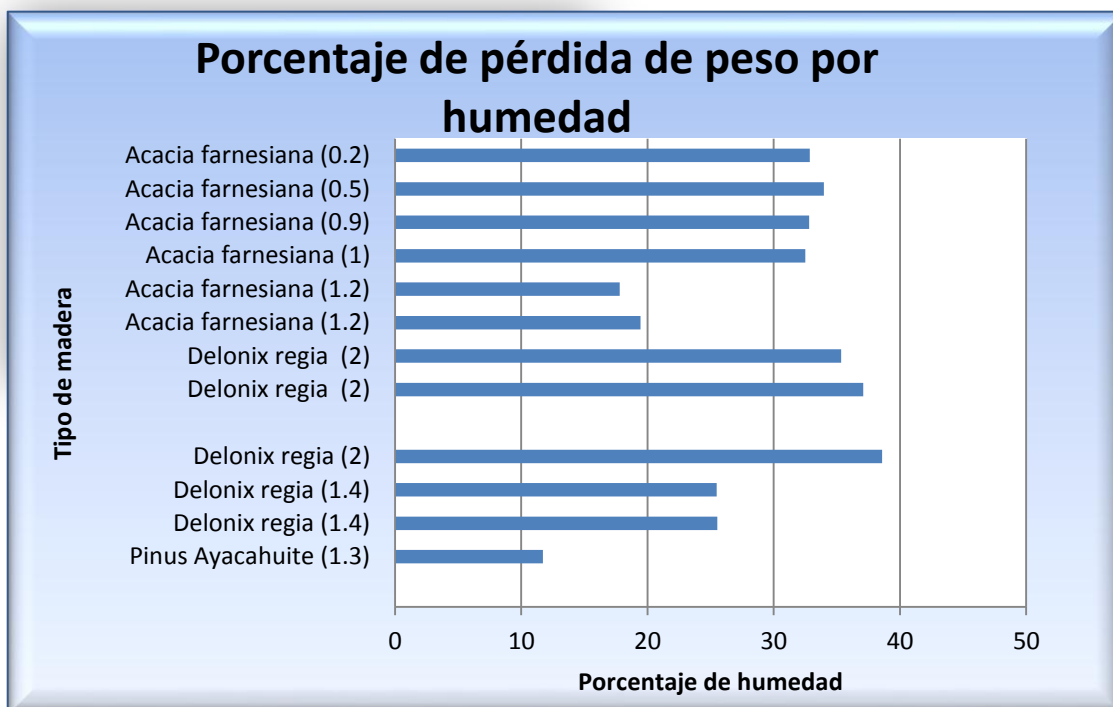
3 Capítulo III Resultados

En este capítulo, se describen y discuten los resultados obtenidos en los diferentes experimentos que se realizaron durante el desarrollo del proyecto. Debido a que no todos los resultados fueron los esperados, fue necesario realizar algunos ajustes a la estrategia inicial para continuar con el desarrollo del proyecto.

3.1 Medición de humedad residual

Con el fin de poder comparar los resultados que se obtuvieron de las maderas de las tres especies diferentes primero fue necesario cuantificar la humedad inicial de cada muestra. Para la determinación de la humedad se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 2.2.1.

En la Grafica 3-1 se muestran los resultados de los cálculos de humedad de las diferentes mediciones, en el eje vertical se enlistas los diferentes tipos de madera seca y entre paréntesis su diámetro dado en centímetros; en el eje horizontal se expresan los porcentajes perdidos de peso debido a la humedad, estos se encuentran registrados con respecto al peso total de la muestra. En la gráfica se observan los resultados de las muestras de Acacia farnesiana que presentaron humedades entre 17 y 34% de su peso. Las muestras de Delonix regia acusaban humedades de entre 25 y 38 % de su peso. Para el caso de Pinus ayacahuite sólo se midió una muestra, la misma que registró una humedad de 12 % de su peso, bastante inferior a las humedades de las dos especies anteriores.



Grafica 3-1 Porcentaje de pérdida de peso por humedad

3.1.1 Determinación del tiempo mínimo de carbonización en mufla

Para determinar el tiempo mínimo de carbonización a partir de madera se siguió la metodología descrita en el capítulo 2.2.2. Cada experimento se realizó con al menos dos muestras de los tres tipos de madera estudiados. Se introdujeron en un recipiente cerrado y se calentaron en la mufla sin interrupciones por espacio de 24 horas a 275°C. Al analizar las muestras se comprobó que todas, independientemente de la especie, quedaron completamente carbonizadas hasta su interior, así que se prosiguió a disminuir el tiempo de calentamiento a sólo 18 horas. Para ello se introdujo en la mufla un nuevo grupo de muestras con características similares al grupo anterior y se procesaron a la misma temperatura. También en este caso se observó la carbonización completa.

En los siguientes pasos se repitieron los experimentos con 8 y 4 horas de procesamiento; los resultados obtenidos del experimento con 8 horas fueron los mismos, es decir, las muestras también se carbonizaron por completo. Sin embargo, la muestra procesada durante cuatro horas mostró sólo una carbonización parcial con el centro no totalmente carbonizado, tal como se muestra en la Ilustración 3-2. Esto permitió conjeturar que el tiempo óptimo de carbonización se encontraba entre 8 y 4 horas. Para determinar el tiempo mínimo para la carbonización completa de las muestras, se sometió a las muestras de 4 horas nuevamente al proceso por un lapso de 2 horas adicionales; al analizar estas muestras se observó la carbonización completa.

Para corroborar este experimento se realizaron dos nuevos experimentos, el primero consistió en calentar dos nuevos grupos de muestras. Uno a 275°C durante 5 horas y el segundo a 6 horas. Como resultado final se observó que las muestras dejadas durante 5 horas no estaban completamente carbonizadas, en cambio el paquete que fue expuesto durante 6 horas fue completamente carbonizado. Por lo anterior, de aquí en adelante se adoptó que para la carbonización completa de la madera se requerían 6 horas de procesamiento a 275°C, para las tres especies analizadas.



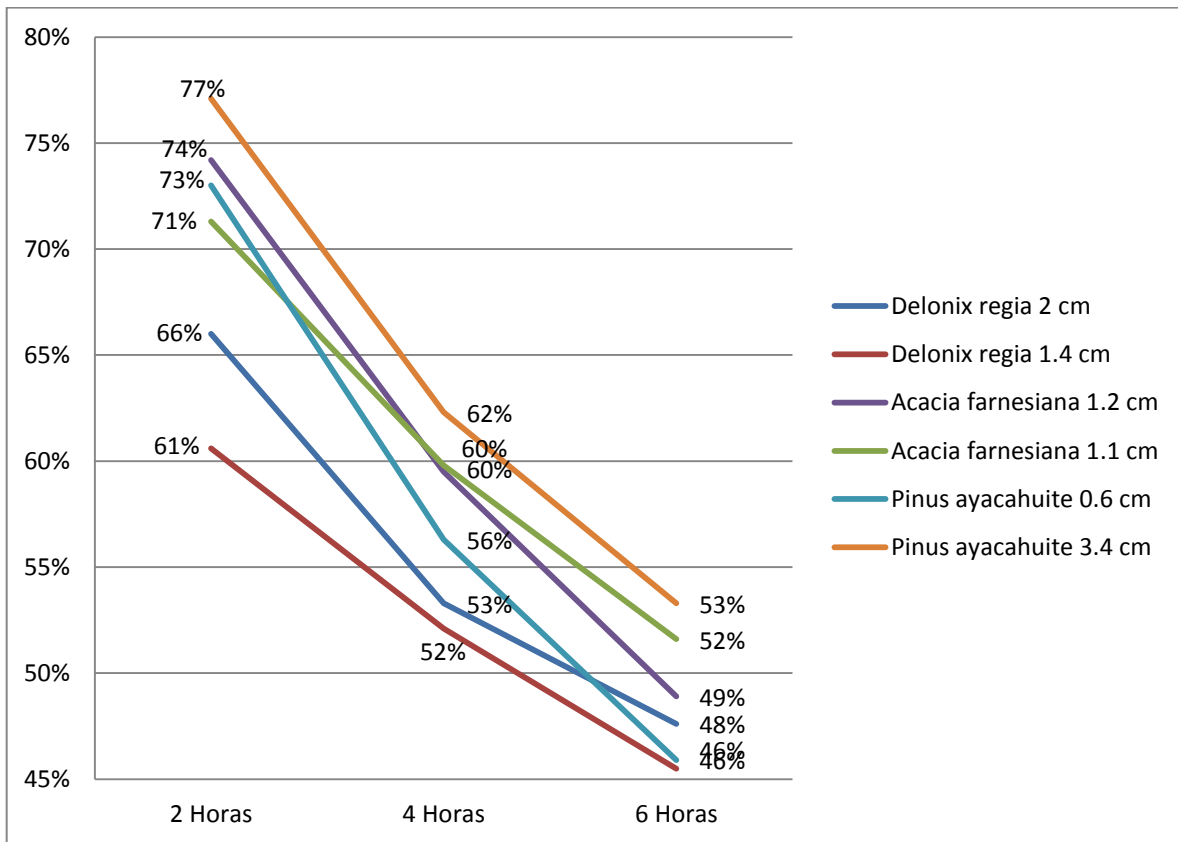
Ilustración 3-1 Muestra expuesta por 6 horas



Ilustración 3-2 Muestra expuesta por 4 horas

3.2 Determinación de la eficiencia en masa del proceso de carbonización

Como se vio en la sección anterior, a la temperatura de 275 °C se completa la carbonización con 6 horas de procesamiento, aparentemente con independencia del tipo de madera empleado. Otro aspecto importante a considerar, es el rendimiento del carbón vegetal a partir de cada tipo de madera. Para cuantificar este rendimiento se realizó un experimento que consistió en determinar el peso perdido de cada muestra en el transcurso de periodos de 2 horas. Para ello se pesaron e introdujeron a la mufla eléctrica 2 muestras de cada especie, la cuales eran extraídas y pesadas en cada periodo hasta completar 6 horas, los resultados se muestran en Grafica 3-2. Los pesos estan normalizados considerando 100% para las muestras antes de entrar a la mufla.



Grafica 3-2 Carbonizado de madera

En la Grafica 3-2 se observa que después de 2 horas de procesamiento, las muestras tienen pesos entre 61% y 77% del peso original, siendo una de las muestras de Delonix regia la que más peso perdió y la muestra de Pinus ayacahuite la que menos pérdida de peso presentó. La diferencia entre los extremos fue de 17%, lo que sugirió que el rendimiento de carbón de Pinus ayacahuite sería superior al de Delonix regia.

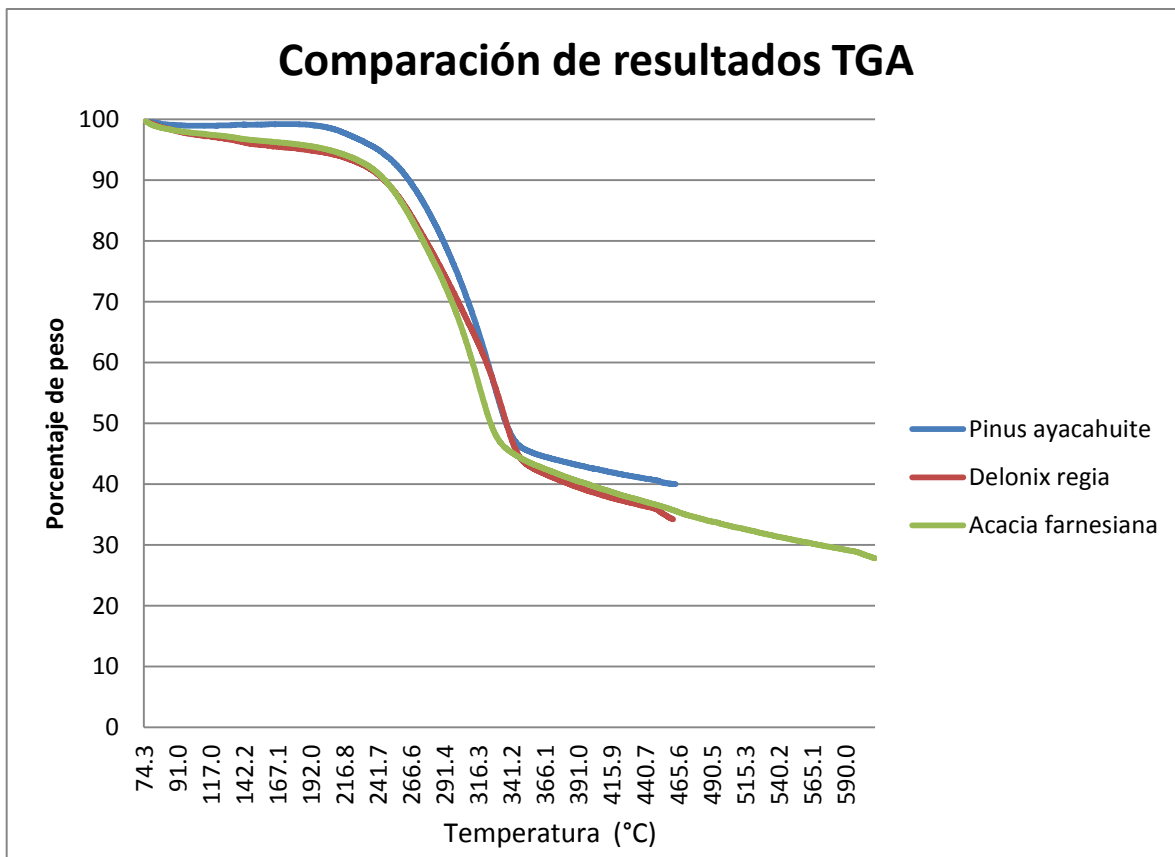
Después de 4 horas se observa una mayor pérdida de peso en todas las muestras sin embargo se conservan las tendencias registradas después de 2 horas, es decir, la muestra de Delonix regia seguía siendo la que más peso perdió (hasta ese momento sólo conservaba el 52% de su peso original) y la muestra de Pinus ayacahuite la que conservaba más de su peso original (62%). La diferencia entre los dos extremos fue de 10%.

Después de 6 horas, una vez terminado el proceso de carbonización, la diferencia entre las muestras de *Delonix regia* y *Pinus ayacahuite* fue solamente de 7%, siendo el *Pinus ayacahuite* la de mayor rendimiento con 53% de su peso original contra un 46% de la muestra de *Delonix regia*. Un aspecto que no se ha considerado hasta el momento es el diámetro de las muestras que oscila entre 0.6 y 3.4 cm, lo que puede influir grandemente en la cinética de la carbonización y de la evaporación de agua y otras sustancias.

La tendencia observada en la gráfica 3.2 sugiere que el proceso de pérdida de peso no concluye a las 6 horas y que, de continuar el experimento por tiempos mas prolongados, los rendimientos de carbón vegetal serían todavía inferiores. Para clarificar este asunto se realizaron análisis con la técnica de termo gravimetría (TGA por sus siglas en Inglés) explicada en el capítulo 2. Para ello se tomaron muestras pulverizadas de la madera de cada especie para poder ser analizadas con esta técnica . En lallustración 3-3 se muestra el aserrín obtenido de cada una de ellas de izquierda a derecha: *Pinus ayacahuite*, *Delonix regia* (framboyán) y *Acacia farnesiana*.



Ilustración 3-3 Muestras pulverizadas de cada especie



Gráfica 3-3 Resultados del Análisis Termo Gravimétrico (TGA)

En la Gráfica 3-3 de las curvas de TGA de cada una de las muestras podemos observar que todas las muestras tienen una tendencia de pérdida de peso muy similar. Al inicio, entre 77 °C y aproximadamente 200 °C las muestras sufren una ligera pérdida de peso que puede ser atribuida a la pérdida de agua. A partir de 200°C inicia un proceso de pérdida acelerada de peso en forma similar para las diferentes muestras que se puede correlacionar con el inicio de la carbonización. Este proceso se vuelve lineal entre los 240 y 320 °C; a los 320°C las curvas muestran un “hombro” y el proceso de pérdida de peso se desacelera. Esta temperatura se puede correlacionar con el fin de la primera etapa de carbonización. Observamos que a esa temperatura la pérdida de peso para las diferentes muestras es muy parecida alcanzando un peso final de 45%. La enorme coincidencia entre las curvas del TGA de las diferentes maderas permite decir que el rendimiento en peso es similar, y que las diferencias que se observaron en la Gráfica 3-2, en los pesos finales son en gran medida atribuibles a los diferentes diámetros de las muestras.

3.2.1 Determinación de la energía acumulada por el concentrador solar SK-14

En las secciones anteriores se determinó el tiempo necesario para obtener la carbonización completa a una temperatura de 275°C, así como la eficiencia de la obtención de carbón, para cada una de las especies estudiadas. A falta de un instrumento que nos permitiera cuantificar cuánta energía se requiere para la conversión de madera a carbón para una determinada masa de madera, caracterizamos el colector solar parabólico para utilizarlo con este fin.

Para calcular la energía que recibe el captador en los experimentos con el concentrador SK-14 fue necesario determinar cómo se distribuye la energía en el foco del concentrador, ya que su arreglo de espejos que lo conforman no son perfectos. A falta de un instrumento para visualizar y cuantificar como se distribuía la energía concentrada se optó por utilizar un papel translúcido el cual nos permitió al menos visualizar este comportamiento. Para ello el papel fue colocado exactamente en el foco del concentrador el cual fue enfocado hacia el Sol para que el papel fuera iluminado; de esta forma fue posible observar la distribución energética en el papel translúcido.

El resultado obtenido fue que el área iluminada tenía una forma parecida a un círculo con un diámetro aproximado de 30 cm pero éste se iluminaba con mayor intensidad en un diámetro de 10 cm. Con esto pudimos concluir que no toda la energía captada por el concentrador solar llegaba al receptor debido a que el tamaño del contenedor era mucho menor que la mancha de la distribución energética. Con esta información y de manera empírica se determinó que el captador solar descrito en el capítulo 2.1.5 sólo capta el 40% de la energía concentrada, debido a su tamaño y las imperfecciones ópticas del concentrador SK-14 (Ilustración 3-4).

Otro factor importante para determinar la energía concentrada es el factor de concentración de la que hace mención el fabricante del concentrador solar SK-14, el cual menciona que con una irradiación de 750 w/m^2 éste podía concentrar sólo 700 W (Tabla 2-2), así que haciendo una relación matemática simple, el factor de concentración resultante es de 0.9333. Utilizando estos valores, la energía captada por el contenedor durante todo el experimento puede ser calculada con base en la suma de los datos registrados por el piranómetro durante el experimento, y este resultado fue posteriormente multiplicado por el factor de concentración y a su vez multiplicado por el porcentaje de energía captada por el receptor. Por esta razón se pudo cuantificar una pérdida energética del 62.68% aproximadamente. Un ejemplo de estos cálculos se muestra en la Tabla 3-1

En la Tabla 3-1 se calcula la pérdida energética para el SK-14 asumiendo una irradiación solar de 1000 W/m^2

Tabla 3-1 Ejemplo de cálculo energético para un solo valor

Calculo Energético					
Radiación Solar (W/m^2)	Factor Fabricante	Porcentaje de energía captada por el receptor	Energía aprovechada	Porcentaje concentrado	Porcentaje perdido
1000	0.9333	40	373.32	37.3	62.68



Ilustración 3-4 Captador en concentrador solar SK-14

3.3 Carbonización con el concentrador solar SK-14

Para la determinación de la energía necesaria en la conversión de madera a carbón se eligieron muestras de diferentes tamaños sin mezclar las especies, se colocaron en el recipiente y se expusieron al Sol en un día claro por espacio de más de 6 horas. La radiación solar se midió durante todo el tiempo del experimento empleando el piranómetro descrito en el capítulo 2.1.7, sujeto de tal manera de que el sensor estuviera siempre coplanar con el concentrador. La energía utilizada en el proceso se determinó de la energía incidente en el concentrador y el factor de aprovechamiento calculado en la sección anterior. Las masas de las muestras antes y después de la carbonización se determinaron con la balanza analítica. El estado de carbonización de la muestra al final del proceso se determinó inspeccionando un corte transversal de la misma.



Ilustración 3-5 Colocación del piranómetro en el concentrador solar SK-14

Tabla 3-2 Resultados obtenidos en experimento realizado con radiación solar

Resultados obtenidos en experimento realizado con radiación solar								
Ilustración:	Madera tipo:	Peso Inicial (gramos)	Peso Final (gramos)	Carbón obtenido	Duración del Experimento (horas)	Energía Utilizada kWh	Relación energía peso (Wh/g)	Resultado
Ilustración 3-7	Acacia farnesiana	100	40	40%	6:04	1.67	16,7	Carbonizado
Ilustración 3-6	Delonix regia	210	113	53.75%	6:22	2.37	11,28	Carbonizado
Ilustración 3-8	Pino Ayacahuite	360	272	75.54%	6:08	1.19	3,30	SemiCarbonizado
Ilustración 3-9	Delonix regia	351	147	42.78%	6:06	1.24	3,53	Carbonizado

Los resultados de este experimento, nos demostraron que era posible la conversión de los tres tipos de madera a carbón vegetal. También nos demostró que la máxima capacidad de conversión del concentrador SK-14 estaba aproximadamente por arriba de los 350 gramos de madera dependiendo de los factores ambientales durante el experimento, ya que además de la irradiación, el viento y la humedad afectaban estos resultados de manera considerable, ya que el recipiente utilizado (Ilustración 2-4) no tenía aislamiento térmico. Además de esto nos arrojó la relación energética entre el peso y la energía requerida para realizar el proceso de carbonización que se encontraba en 3.53 Wh/g pero como ya se mencionó esto quedó gravemente influenciado por los factores climáticos externos (viento y humedad).



Ilustración 3-7 Resultado de Primer experimento con Acacia farnesiana (40g)



Ilustración 3-6 Resultado del segundo experimento con Delonix regia (113g)



Ilustración 3-8 Resultado del tercer experimento con Pino ayacahuite (272g)



Ilustración 3-9 Resultado del cuarto experimento con Delonix regia (147g)

3.4 Experimentación con concentrador solar SK-14 fijo en una sola posición

El objetivo de este experimento era encontrar el número de días para convertir la madera en carbón vegetal, ya que, si se decidiera utilizar un concentrador parabólico de revolución como el SK-14, para producir una cantidad mayor de carbón, sería necesario aumentar sus dimensiones varias veces pero el problema al que nos enfrentaríamos, sería entonces, el de dar seguimiento continuo al Sol; así que se propuso el no hacer un seguimiento solar y mantener el concentrador estático en una sola posición para evaluar si era viable esta idea.

El experimento utilizó la misma metodología descrita en el capítulo anterior pero ahora dejando el concentrador solar SK-14 en una sola posición sin dar ningún tipo de seguimiento solar por varios días. Para este experimento se utilizaron 250 gramos de madera de Delonix regia. Esta madera fue utilizada para esta prueba debido a su densidad y abundancia de muestras. El resultado de esta prueba, fue que hasta después de 6 días, la madera era convertida en carbón vegetal. Este resultado fue poco alentador ya que el proceso se alargaría considerablemente por lo que se determinó que esta idea no era conveniente.



Ilustración 3-10 Resultado de experimento de concentrador solar en una sola posición

3.5 Desarrollo de Simulación

De las secciones anteriores se desprende que un concentrador parabólico con un área de 1.5 m^2 de sección transversal puede carbonizar 350 g de madera con seguimiento solar. Si se emplea el mismo concentrador de forma estacionaria se requerirían más de 8 días para procesar la misma cantidad de madera. Nuestro objetivo fue diseñar un concentrador estacionario que permitiera procesar 500 gramos de madera por día. Para lograr esto realizamos un diseño en CAD y lo evaluamos radiométricamente con la información experimental obtenida.

Para poder diseñar el nuevo concentrador solar se utilizó un software especializado. Elegimos el paquete OptiCAD mencionado en el capítulo 2. Para poder utilizar este software para este objetivo fue necesario simular el comportamiento del Sol en su movimiento aparente. Para llevar a cabo esta tarea se necesitó posicionar diferentes fuentes de luz para simular el movimiento de cada hora. Para ello se calculó su posición exacta en los tres ejes cartesianos del software, así como su dirección y potencia. Para ello fue necesario utilizar las fórmulas que describen la relación geométrica solar, en las diferentes estaciones del año, como se describe en el capítulo 1.2 Para facilitar esta tarea fue necesario introducir dichas fórmulas en una hoja de cálculo.

3.6 Cálculo para el posicionamiento de fuentes de luz.

Como se vio en la sección 1.2 en función de la declinación delta se distinguen cuatro situaciones a lo largo del año: los solsticios de verano y de invierno y los equinoccios de otoño y primavera. Para el caso de los equinoccios en que delta tiene un valor de cero, el azimut γ es cero durante todo el día, sin embargo en el caso extremo de los solsticios, el azimut γ tiene su mayor variación a lo largo del día; en este último caso el azimut γ es cero únicamente a medio día.

Con el propósito de que nuestras simulaciones sean aplicables a todas las situaciones posibles a lo largo del año fue conveniente realizar simulaciones tanto para el caso de los equinoccios como para el caso de los solsticios. Cualquier otra situación será intermedia entre estas dos. Para emplear el paquete de simulación a lo largo del día se definieron las posiciones que adopta el Sol en el firmamento en función de la hora del día, esto se explica en las secciones siguientes.

3.6.1 Posicionamiento para Equinoccio

En el paquete de CAD no es posible asignar distancias muy grandes entre la fuente de luz y el objeto iluminado (como el sería el caso del Sol iluminando un objeto en la tierra), por esta razón fue necesario elegir una distancia Sol-objeto suficientemente grande para que las simulaciones tuvieran sentido y razonablemente pequeña para que el software pudiera realizar los cálculos. Se hicieron varias pruebas considerando diferentes distancias y se determinó que eligiendo 250 metros para la distancia Sol-objeto se podía realizar una buena simulación.

En el equinoccio el Sol pasa por el mismo plano en el que se encuentra el observador. Para calcular las posiciones que adopta el Sol en el firmamento se elaboró una hoja de cálculo, en la cual se indicó la distancia en donde se colocaron las fuentes de luz, la potencia requerida por metro cuadrado, y el número de rayos por metro cuadrado. Con esta información la hoja de cálculo determina el área que va iluminar la fuente, su intensidad, el número de "rayos" a emplear y su posición exacta. Para el

posicionamiento de cada fuente de luz fue necesario calcular las coordenadas y su ángulo de inclinación, para ello se incorporó la fórmula del ángulo horario del capítulo 1.2, la cual nos indica que el Sol tiene un ángulo horario igual a cero al medio día solar y adquiere un valor de 15° de longitud por cada hora (MANRIQUE, 1984), de esta forma la hoja de cálculo determina la posición de cada fuente de luz dependiendo de la hora en que se encuentre (Ilustración 3-11).

Hora	Ángulo		Coordenadas			Ángulo		
	Grados	Radianes	X	Y	Z	X angle	Y angle	Z angle
5	90	1.570796327	250	0	0	-90	90	0
6	75	1.308996939	241.481457	64.7047613	0	-90	75	0
8	60	1.047197551	216.506351	125	0	-90	60	0
9	45	0.785398163	176.776695	176.776695	0	-90	45	0
10	30	0.523598776	125	216.506351	0	-90	30	0
11	15	0.261799388	64.7047613	241.481457	0	-90	15	0
12	0	0	0	250	0	-90	0	0
13	-15	-0.261799388	-64.7047613	241.481457	0	-90	-15	0
14	-30	-0.523598776	-125	216.506351	0	-90	-30	0
15	-45	-0.785398163	-176.776695	176.776695	0	-90	-45	0
16	-60	-1.047197551	-216.506351	125	0	-90	-60	0
17	-75	-1.308996939	-241.481457	64.7047613	0	-90	-75	0
18	-90	-1.570796327	-250	0	0	-90	-90	0

Ilustración 3-11 Captura de imagen de la hoja de cálculo con las coordenadas para posicionar las fuentes de luz en OptiCAD

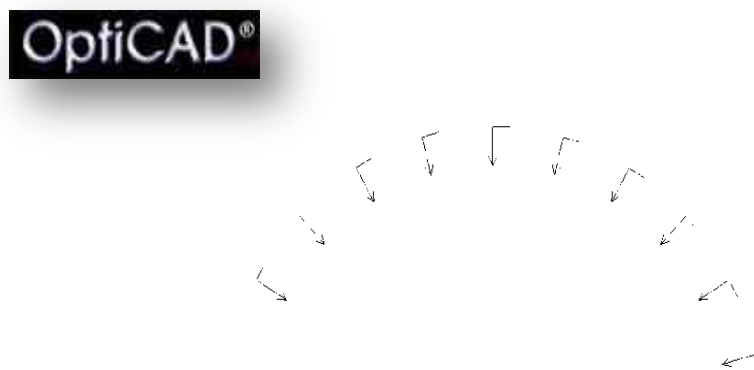


Ilustración 3-12 Posicionamiento de fuentes de luz en OptiCAD

3.6.2 Posicionamiento en solsticio

Para el posicionamiento de las fuentes de luz en el caso del solsticio fue necesario encontrar la posición del plano en que se iba situar cada fuente de luz. Para calcular la posición exacta de este plano se calculó el ángulo de incidencia (θ) sobre una superficie horizontal a medio día solar. Una vez encontrado este ángulo fue posible determinar la posición del eje y sólo se tuvieron que reposicionar las fuentes de luz como se realizó en el caso del equinoccio.

Para encontrar el ángulo de incidencia (θ) en que se iba situar la fuente de luz con respecto al plano previo fue necesario calcular el ángulo de la altura solar (α) así como el ángulo azimut (γ) e incorporarlos a la ecuación 3-1.

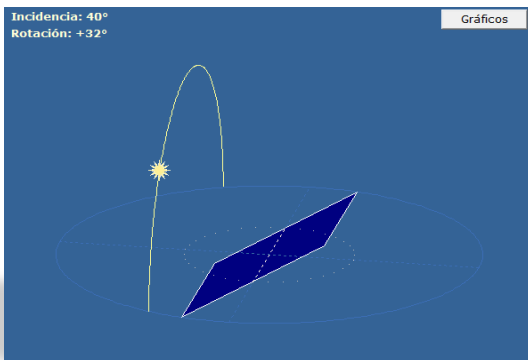


Ilustración 3-14 Comportamiento del Sol y el captador en el solsticio

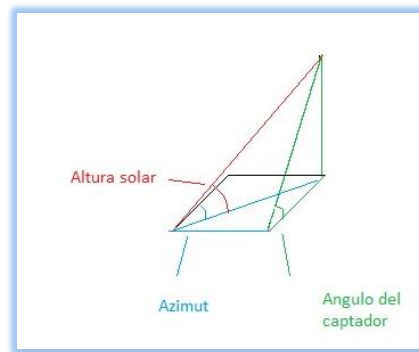


Ilustración 3-13 Descomposición de la pirámide cuadrada para realizar la ecuación 3-1

$$\tan \theta = \frac{\tan \alpha}{\text{Seno } \gamma} \quad 3-1$$

Cálculos Invierno								
Hora	Ángulo		Coordenadas			Ángulo		
	Grados	Radianes	X	Y	Z	X angle	Y angle	Z angle
12	0	-0.40927971	0	229.351925	-99.4871578	-66.55	0	0
13	-15	-0.261799388	-59.3606462	221.53854	-99.4871578	-65.8164	-15	0
14	-30	-0.523598776	-114.675962	198.584686	-99.4871578	-63.39	-30	0
15	-45	-0.785398163	-162.176301	162.157642	-99.4871578	-58.47	-45	0
16	-60	-1.047197551	-198.624593	114.648797	-99.4871578	-49.05	-60	0
17	-75	-1.308996939	-221.536948	59.3533269	-99.4871578	-30.82	-75	0

Ilustración 3-15 Captura de hoja de cálculo con las coordenadas para posicionar las fuentes de luz para pruebas en solsticio

3.7 Validación de simulación

Una vez terminado el cálculo de las posiciones del Sol, se procedió a validar las simulaciones empleando un caso bien conocido: la irradiación solar a lo largo del día sobre una superficie horizontal. Como datos de referencia se emplearon los resultados del cálculo analítico empleando las fórmulas para la irradiación solar reportadas en la literatura (MANRIQUE, 1984); estos datos se referirán aquí como “teóricos”. Empleando OptiCAD y las posiciones calculadas para el Sol anteriormente descritas, se calculó la irradiación solar sobre una superficie horizontal a lo largo del día en intervalos de una hora. Para calcular la irradiancia OptiCAD requiere que se defina lo que se llama un “film”. La Ilustración 3-16 muestra la geometría empleada en OptiCAD mostrando los rayos incidentes sobre una superficie plana de un metro cuadrado a la que se le ha asociado un “film” que determina la radiación incidente.

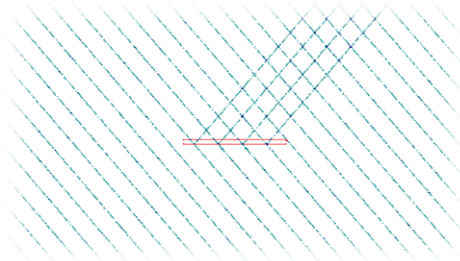


Ilustración 3-16 Film de 1 m² en OptiCAD simulando piranómetro

Se corrieron simulaciones de las 8 Hrs a las 16 Hrs y se realizaron los cálculos teóricos. En la Grafica 3-1 se muestran en tres dimensiones los resultados tanto “teóricos” como los simulados en OptiCAD. Se puede observar que existe un buen acuerdo entre ambos resultados, las diferencias máximas fueron del orden de 45% lo que fue muy alentador. Cabe mencionar que en la simulación se emplearon únicamente 100 “rayos”, por lo que en principio no se esperaba un muy buen resultado. Para refinar la simulación se estimó conveniente contar con por lo menos 10000 rayos, sin embargo esto no fue necesario dado el buen acuerdo obtenido entre ambos resultados. En **conclusión** el modelo propuesto para simular el comportamiento solar fue bastante adecuado ya que el error máximo entre lo simulado y el cálculo fue de tan sólo 0.45%.

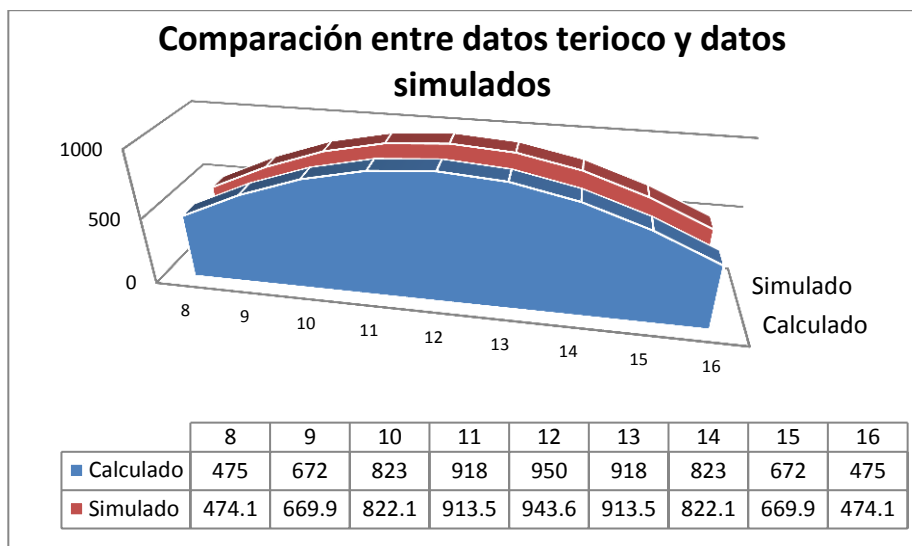


Grafico 3-1 Comparación entre datos teóricos calculados y datos obtenidos en la simulación

3.7.1 Prueba del concentrador SK-14

Para poder evaluar mejor los resultados experimentales obtenidos manteniendo el concentrador parabólico axial en posición vertical durante 8 días se realizó una simulación mediante OptiCAD. Se procedió a simular el concentrados SK-14 tomando las medidas geométricas del prototipo y realizando el trazado de rayos. De manera similar se tomaron las dimensiones del recipiente empleado en los experimentos y se simuló con estos datos el captador empleado en OptiCAD.

Para ello, se tuvo que realizar un modelo virtual de este mismo en OptiCAD (Ilustración 3-17) y posteriormente realizar las pruebas con el modelo solar en OptiCAD pero, para esta situación fue necesario modificar el simulador y posicionar las fuentes de luces cada diez minutos, en lugar de cada hora como se planteaba en el modelo original. Estas modificaciones no fueron muy dificultosas, ya que con la ayuda de la hoja de cálculo esta tarea se convirtió en un proceso relativamente sencillo.

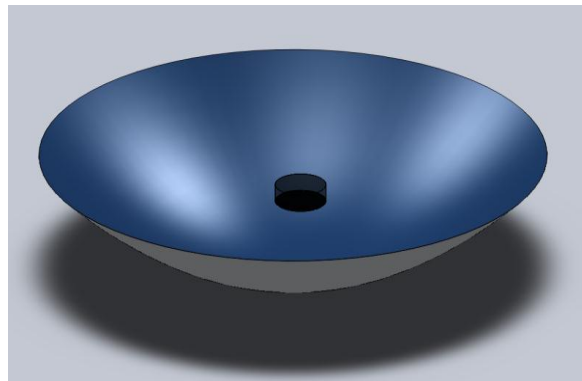


Ilustración 3-17 Modelo virtual del concentrador SK-14

Para la simulación, se dirigió el concentrador SK-14 a las 12 del día durante todas las corridas y en cada corrida se fue cambiando la fuente de luz simulando el movimiento del Sol cada diez minutos, para observar el efecto que se tenía en la energía al no realizar el seguimiento solar.

En la primera corrida (Ilustración 3-18), se simula la posición solar a las 12 del día, el concentrador reúne todos los rayos en el centro del captador perfectamente.

En la segunda corrida (Ilustración 3-19), se simula la posición solar a las 12:10 PM, en este caso, el concentrador todavía reúne todos los rayos en el captador.

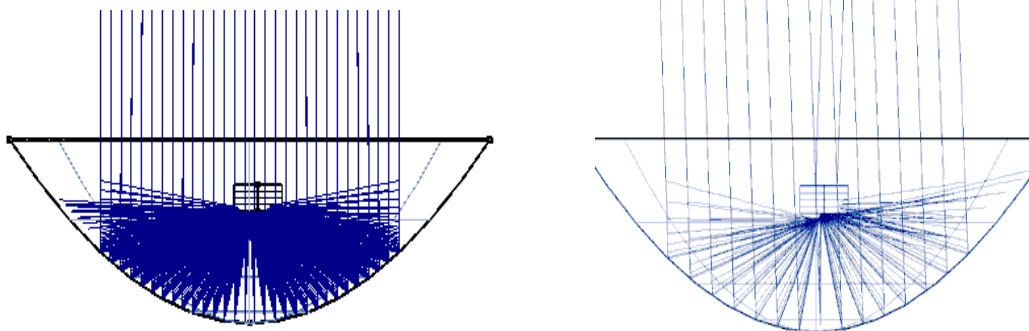


Ilustración 3-18 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:00

Ilustración 3-19 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:10

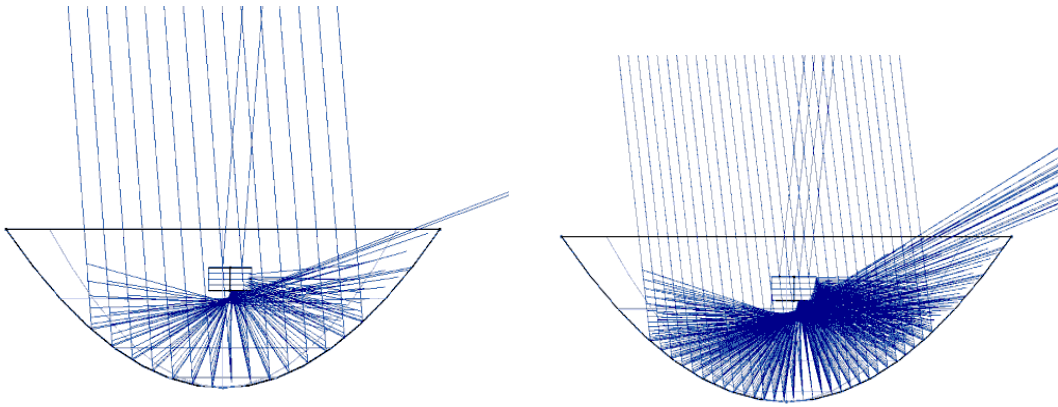


Ilustración 3-21 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:20



Ilustración 3-20 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:30



En la tercera corrida (Ilustración 3-21), se simula la posición solar a las 12:20 PM, en este caso en el concentrador se empiezan a observar pequeñas pérdidas de rayos. Esto da como resultado una disminución pequeña en la eficiencia del concentrador.

En la cuarta corrida (Ilustración 3-20,) se simula la posición solar a las 12:30 PM, en este caso la pérdida de energía es aún mayor, aunque gran parte de la superficie sigue reuniendo la mayor cantidad de la energía en el captador.

En la quinta corrida (Ilustración 3-22), se simula la posición solar a las 12:50 PM, en ésta se observa que sólo una pequeña porción de la energía que refleja la superficie del concentrador, llega al captador. Es así que, prácticamente sólo una cuarta parte de la superficie es funcional para concentrar la energía en el captador.

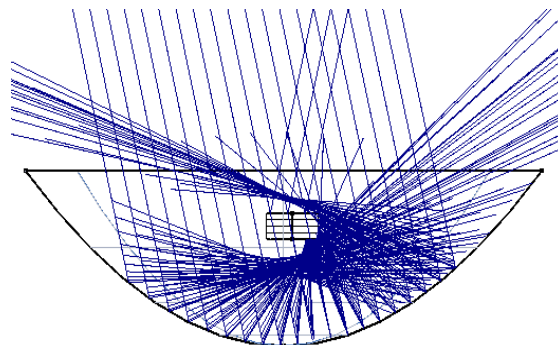


Ilustración 3-22 Simulación del concentrador SK-14 a las 12:50

De estos resultados se desprende que si se mantiene el concentrador fijo solamente durante aproximadamente 2 horas la radiación solar cae sobre el colector, pero solamente aproximadamente una hora con suficiente intensidad. Esto nos permitió entender los resultados experimentales obtenidos con el concentrador fijo que requirieron 6 días de procesamiento en los cuales se captaron aproximadamente 6 horas de buen Sol, mismos que se captaron en los experimentos con seguimiento solar en un sólo día. De esta simulación también se desprende que esta geometría es poco conveniente para captar Sol a lo largo del día por lo que nuestra siguiente tarea fue buscar geometrías estacionarias que permitieran la captación de energía solar cuando menos por espacio de 6 horas.

3.8 Pruebas gráficas de diversas geometrías

Una de las primeras opciones pensadas fue el utilizar una parábola de revolución con un receptor móvil que siguiera la energía concentrada, esto nos daría la ventaja de mantener estático el espejo. Así que se dio la tarea de simular su comportamiento. En esta configuración, los rayos concentrados se comportaban de una manera adecuada durante el día. En la Ilustración 3-24 podemos observar como la energía se concentra mayormente en una región pequeña, sin importar que la parábola de revolución aún este con una desviación de 45°. Esta opción parecía conveniente energéticamente pero se tendría que diseñar un sistema capaz de dar seguimiento solar a la energía concentrada, el cual fuera muy robusto para evitar en lo posible su descompostura.

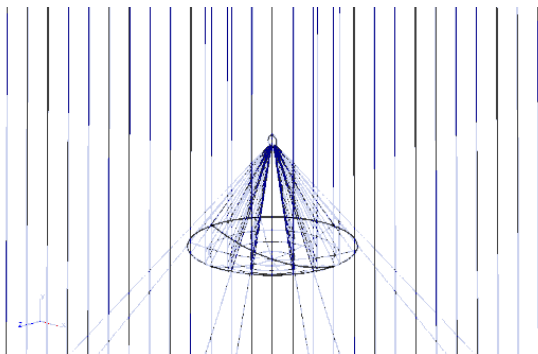


Ilustración 3-23 Simulación a las 12 PM

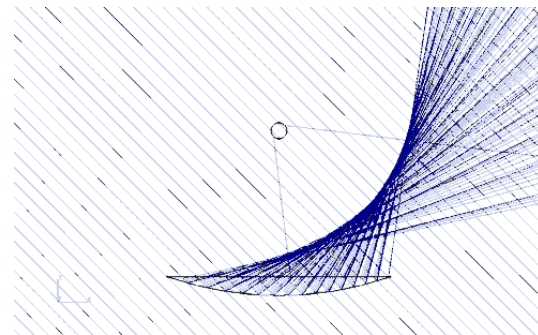


Ilustración 3-24 Simulación a las 9 AM

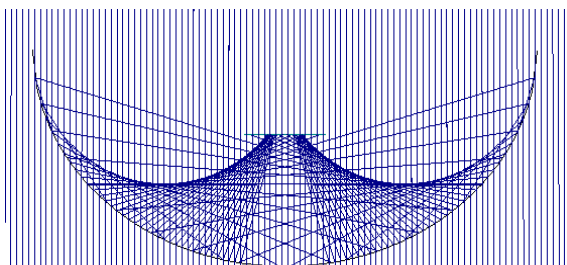


Ilustración 3-25 Simulación de canal elíptico a las 12 Hrs

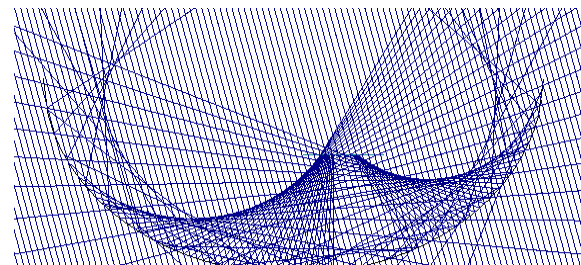


Ilustración 3-26 Simulación de canal elíptico a las 13 Hrs

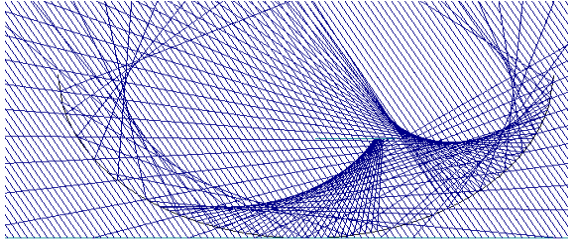


Ilustración 3-27 Simulación de canal elíptico a las 14 Hrs.

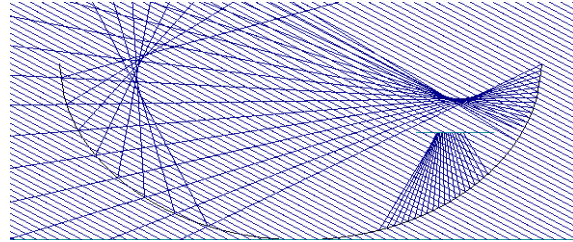


Ilustración 3-28 Simulación de canal elíptico a las 15 Hrs.

Otra alternativa analizada fue el concentrador de canal elíptico, esta configuración se comportó de forma adecuada orientado de norte a sur, pero la energía se concentraba en dos puntos diferentes a una distancia considerable, lo cual provocaba que el receptor tuviera que ser más ancho disminuyendo la relación de concentración; para evaluar su comportamiento de forma completa se reorientaron de Este a Oeste para verificar si utilizando este sistema de manera desenfocada se podría reducir la brecha entre los dos focos observados. Los resultados fueron muy similares a los obtenidos originalmente salvo con desviaciones mayores a 30° observados en la Ilustración 3-27 donde observamos las tendencias a unirse de estos dos focos.

Una siguiente opción, fue buscar geometrías de tipo canal, que orientadas en dirección Este-Oeste permitieran la captación de radiación por un tiempo más prolongado. Como primera geometría abordamos el canal parabólico con el captador alargado, que excede las dimensiones del espejo. Los resultados de la simulación fueron muy alentadores, ya que, de manera estática esta configuración podía concentrar la energía durante más de 6 horas sin tener una pérdida energética significativa, además de que se observaba que la energía se concentraba en una sola línea.

Una vez analizadas las tres opciones, se decidió utilizar el concentrador de canal parabólico por su manera de concentrar la energía solar ya que con esta configuración se podía tener un receptor casi de cualquier diámetro, además del hecho de no necesitar partes móviles para dar seguimiento en el transcurso del día y de esa manera se descartaba la posibilidad de alguna falla mecánica en la operación del sistema. Además, de que con esto el operador podía realizar cualquier otra actividad mientras el concentrador estuviera operando.

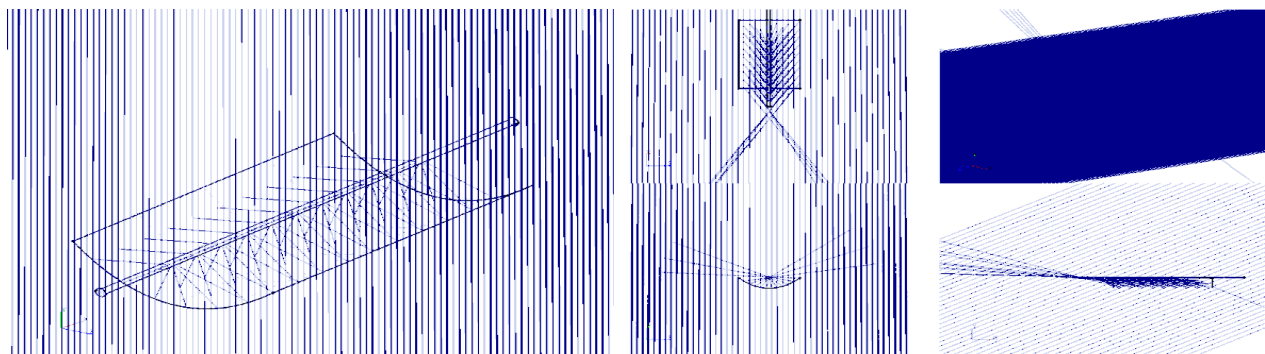


Ilustración 3-29 Simulación de canal parabólico a las 16 Hrs

3.9 Simulación del desempeño del concentrador diseñado

En esta última prueba, se observó que el captador podía absorber gran parte de la energía concentrada, aunque presentaba el inconveniente que si el captador no tenía una cubierta de vidrio, éste iba a tener grandes pérdidas de energía por convección. Además que para la aplicación requerida, la energía se distribuiría durante el transcurso del día de una manera no muy adecuada. Para ello, se decidió recortar el captador para que la mayor parte del día fuera iluminado por completo, evitando que la madera en los extremos no fuera a convertirse en carbón. Para analizar esto de forma cuantitativa se utilizaron las mediciones radiométricas que arroja el OptiCAD.

Para las mediciones radiométrías OptiCAD emplea un “film” en el que, con un código de colores, visualiza la energía captada sobre el “film” (rojo, verde, amarillo y azul). El color rojo indica la mayor potencia radiométrica, le siguen el color verde, luego el amarillo hasta llegar al azul el cual corresponde al nivel más bajo de energía.

3.9.1 Situación 1.- Equinoccio

En esta simulación, se realizaron pruebas de 8 de la mañana a las 12 del día, con el propósito de ahorrar tiempo a lo largo de toda la prueba, ya que el resto del día restante se comportaría de la misma forma, así que no era necesario realizar una prueba completa de 8 am a las 5 pm.

De la Ilustración 3-31 e Ilustración 3-34 vemos una secuencia de las diferentes simulaciones realizadas que cubren desde las 12 del día hasta las 8 de la mañana, a intervalos de una hora. Cada ilustración esta subdividida en 5 secciones (a, b, c, d y e). En la sección “a” se tiene la vista superior del diseño en el cual se puede apreciar el concentrador en forma de un rectángulo. En la sección “b” podemos observar la vistas de canto, en la sección “c” la vista isométrica en donde observamos al concentrador en su forma completa, en la sección “d” tenemos una vista lateral. Por último en la sección “e” observamos los resultados de la radiometría captado por el “film”.

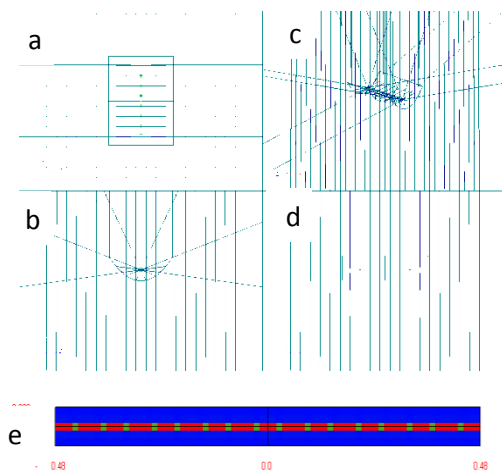


Ilustración 3-30 Simulación del canal parabólico a las 12 Hrs.

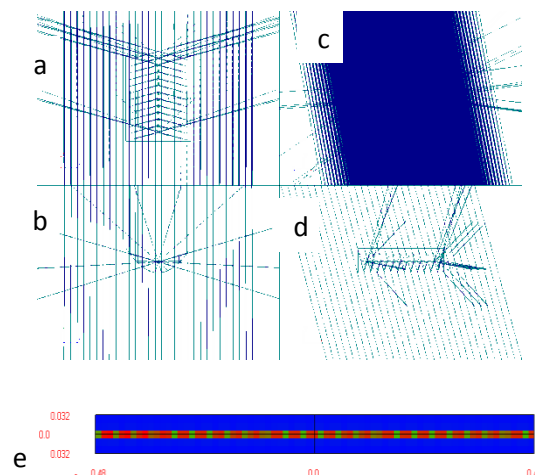


Ilustración 3-31 Simulación del canal parabólico a las 11 Hrs.

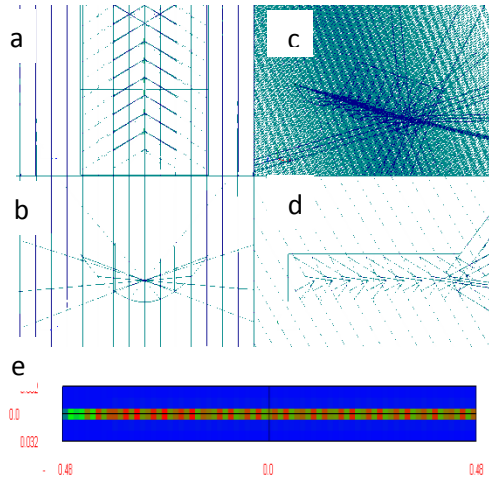


Ilustración 3-33 Simulación del canal parabólico a las 10 Hrs.

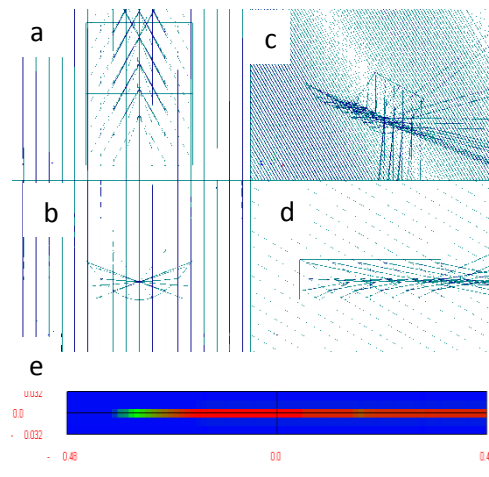


Ilustración 3-32 Simulación del canal parabólico a las 9 Hrs.

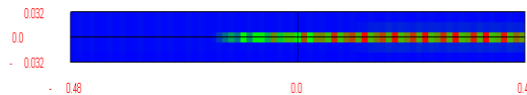


Ilustración 3-34 radiometría captada por el film a las 8 Hrs.

En la simulación, a las 12 hrs del día (Ilustración 3-30), todos los rayos caen sobre el receptor como se puede apreciar en las vistas superior “a”, de canto “b” y lateral “d”. La radiometría muestra una franja uniforme de color rojo a lo largo de todo el film y centrada en el “film”, poniendo en evidencia que la radiación es captada a todo lo largo del concentrador e incidiendo en la parte central teniendo una distribución homogénea.

A las 11 hrs del día (Ilustración 3-31), el panorama fue similar al anterior, solamente en la vista lateral “d” se observa que algunos rayos solares no interceptan el receptor, sin embargo en la radiometría “e” no se observa una diferencia respecto de la radiometría para las 12 hrs.

A las 8 hrs del día (Ilustración 3-34) ya se observan mayores diferencias. En las visiones isométrica “c” y de canto “b” se aprecia que los rayos que interceptan el receptor son muchos menos esto también se ve reflejado en la radiometría “e” en la que se puede apreciar una enorme reducción de la energía captada en el lado izquierdo del receptor, donde se pueden apreciar coloraciones verdes y azules. Sin embargo la radiación incidente sigue estando centrada a lo largo del receptor. Las simulaciones para las 9 (Ilustración 3-32) y 10 hrs (Ilustración 3-33) muestran situaciones intermedias entre las observadas para las 8 y la 11 hrs

En términos generales el film se encuentra prácticamente completamente iluminado desde las 10am hasta las 12pm y como el comportamiento del Sol, es el mismo por la tarde, se puede afirmar que, desde las 9am hasta las 3pm tendríamos una concentración casi completa en el captador. Con esto, tendríamos 7 horas de funcionamiento en este modelo de concentración. La energía recolectada antes de las 9 y después de las 4 pm, aunque es menor en intensidad, puede de todos modos contribuir al proceso de energía recolectada. (Ilustración 3-34).

3.9.2 Situación 2 solsticio

En este caso, en la simulación fue necesario que el captador tuviera dos films; uno que captara de forma horizontal y otro de forma vertical ya que la energía no incide sobre la misma línea a lo largo del día por las variaciones que sufre el ángulo azimut γ .

Para su correcta interpretación las ilustraciones mostradas a continuación se dividieron cada una en 4 secciones (a, b, c y d). En la sección “a” podemos observar la parábola que conforma al concentrador solar y como esta reúne los rayos; en las secciones “b” y “c” podemos observar a los films orientados vertical y horizontalmente respectivamente, y sus mediciones radiométricas y por último la sección “d” muestra la vista lateral donde podemos observar el trazado de rayos de forma lateral y cómo interactúan con el concentrador.

En la simulación a las 12 hrs (Ilustración 3-35) todos los rayos caen sobre el receptor como se puede apreciar en las vistas de canto (a) y lateral (d). La radiometría mostró en el film horizontal (b) dos franjas, una roja y una verde en la parte superior del film; en el film orientado verticalmente (c) podemos observar esta misma franja pero en el extremo inferior del film, esto es debido a que el captador no fue orientado exactamente a las 12 del día, sino que fue orientado con un grado menor con la finalidad de aumentar su recepción.

En la simulación para las 11 hrs (Ilustración 3-35) podemos observar un mejor enfoque en la vista de canto (a) que en la simulación anterior, esto también se puede observar en los films horizontal y vertical en donde se aprecian franjas de color rojo casi en el centro del film. Lo anterior debido a que el concentrador se encuentra mejor enfocado a esta hora.

En la simulación para las 10 hrs (Ilustración 3-37) se observó un enfoque similar en la vista de canto (a) que en la simulación anterior, pero al observar el “film” vertical (b) se puede apreciar una mancha más gruesa la cual está conformada por puntos verdes y rojos que indica que la energía recibida se encuentra un poco más dispersa; en el film horizontal (c) se puede observar una franja en el centro del film conformada por puntos verdes y rojo, dominando mayormente los puntos verde. Esto se puede deber simplemente a que el film vertical se encuentra recibiendo una mayor energía que el film horizontal.

En la simulación para las 9 horas (Ilustración 3-38) se observa en la vista de canto (a) un corrimiento en los rayos concentrados, esto significa que a esta hora se empieza a observar un desenfoque ligero en el concentrador solar, lo cual se puede confirmar por los film horizontal y vertical en los que se observa una franja de color rojo y verde en la parte superior e inferior.

En la simulación para las 8 hrs (Ilustración 3-39) se puede observar en la vista de canto (a) un desenfoque completo en el cual prácticamente ningún rayo incide con el receptor.

En términos generales el desempeño de este modelo mostró ser ligeramente menor en el solsticio que en el equinoccio debido a que se acorta un poco el tiempo de funcionamiento.

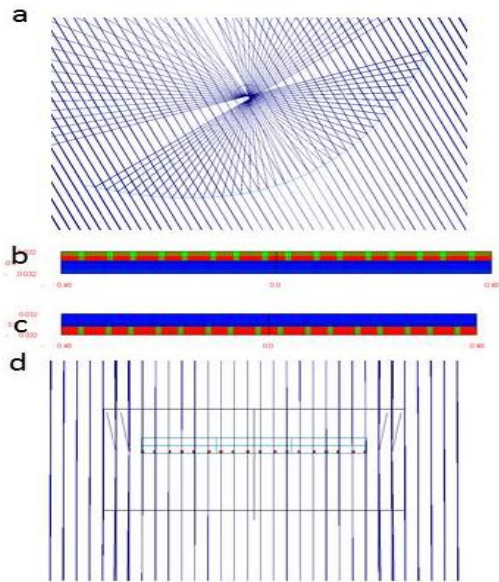


Ilustración 3-36 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 12 Hrs.

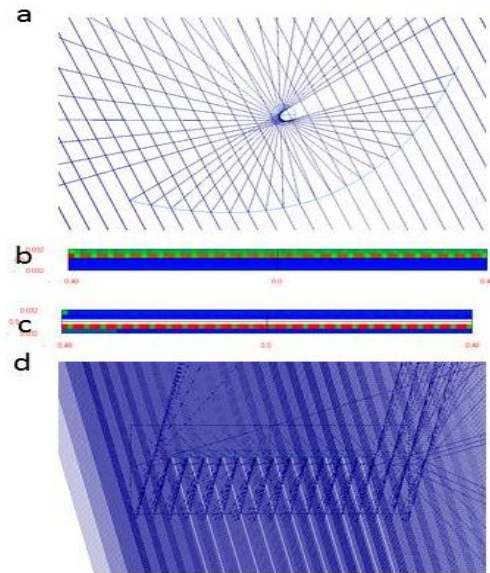


Ilustración 3-35 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 11 Hrs.

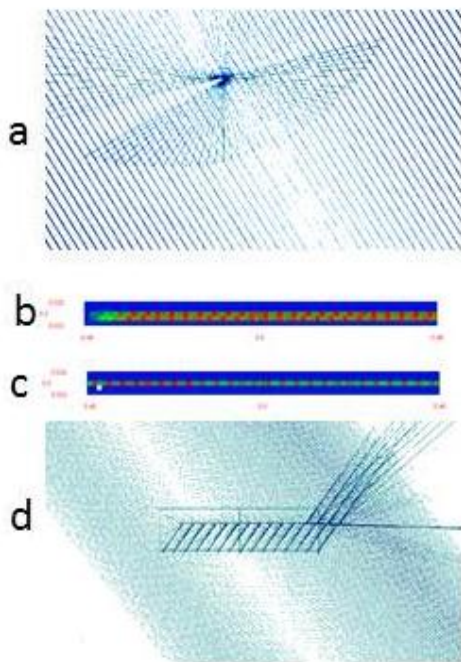


Ilustración 3-37 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 10Hrs.

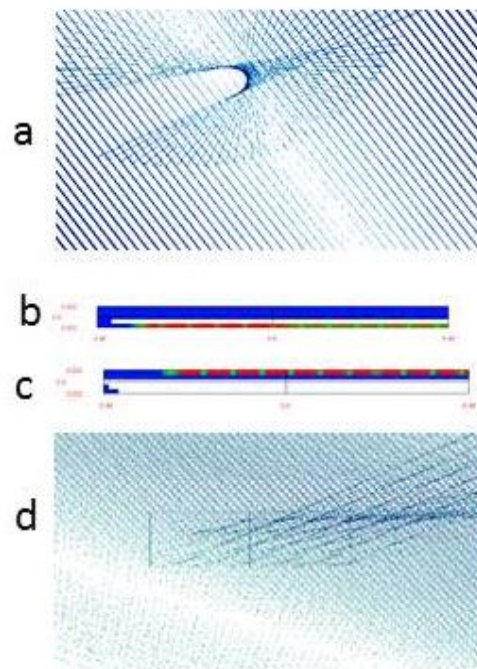


Ilustración 3-38 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 9 Hrs.

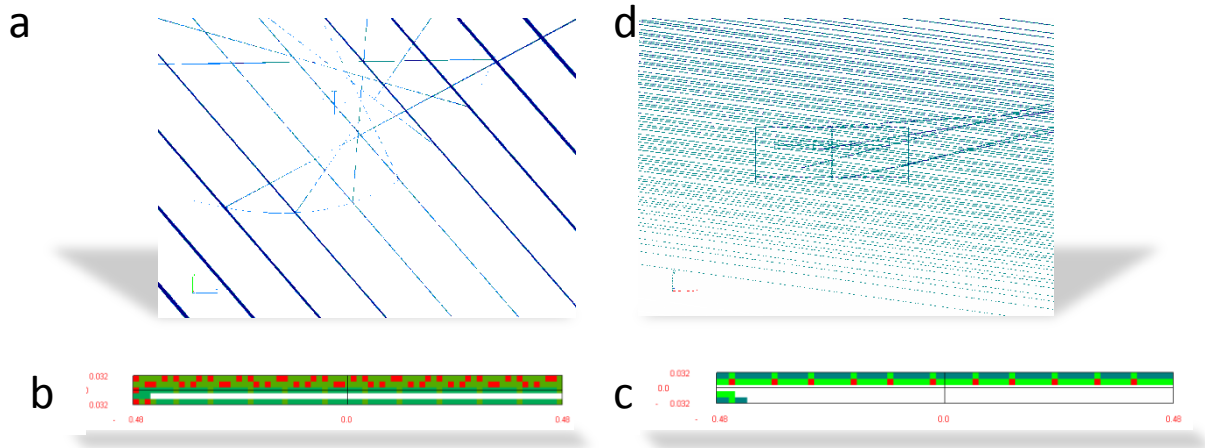


Ilustración 3-39 Simulación del canal parabólico con captador recortado a las 8 Hrs.

3.10 Diseño del prototipo

Una vez escogida la geometría del concentrador, se dio paso a dimensionar un concentrador capaz de producir 250 gramos de carbón en 6 horas. Para ello, fue necesario calcular la energía que el concentrador SK-14 era capaz de acumular en el captador (Tabla 3-3). Los cálculos están realizados con una radiación incidente de 900 W/m^2 , que a su vez, es multiplicado por una relación de concentración que hace el fabricante. El resultado, es multiplicado por 0.4 que es el error por concentración, ya que no toda la energía concentrada es recolectada por el captador. Con todo esto, obtenemos la energía recolectada. Una vez teniendo la energía captada, este resultado se multiplica por las 6 horas que duró el experimento; con ello, obtenemos la energía necesaria para realizar el dimensionamiento del nuevo concentrador.

Para realizar el dimensionamiento, se realizaron diversas pruebas hasta llegar a una dimensión que arrojara un resultado similar a la energía colectada por el concentrador SK-14, considerando una reflectancia del 80 % en el material reflejante. Una vez hecho esto, se dio paso a optimizar la distancia focal para el equinoccio y el solsticio respectivamente. Para ello, se hicieron varias pruebas, simulando la mitad del día y comparando la suma de la energía obtenida durante el día, cambiando la distancia focal. La optimización de la distancia focal, se hizo con la idea de obtener la mayor cantidad de energía con la menor cantidad de material reflejante. Por ello, una vez teniendo los datos de la simulación en OptiCAD, se dio paso a calcular el área de cada uno. Una vez teniendo el área, se dividió la potencia total de la simulación entre el área del concentrador para obtener la potencia por metro cuadrado y con ello poder hacer la comparación. Para poder tener una mejor eficiencia durante el año, la optimización se realizó en las dos situaciones simuladas. La primera optimización que se realizó, fue en la situación del equinoccio (Tabla 3-5) y posteriormente con los datos obtenidos se dio paso a optimizar la distancia focal en el solsticio (Tabla 3-4).

Calculo Energético					
Radiación Solar (W/m^2)	Factor Fabricante	Error en concentración	Energía concentrada	Horas	Energía Total
900	0.93333	0.4	336	6	2016

Tabla 3-3 Cálculo energético de concentrador SK14

Distancia Focal (m)		0.6	0.13	0.16	0.18	0.23	0.27	0.3	0.35	0.45	0.4
Hora	Potencia (W)	Potencia (W)	Potencia (W)	Potencia (W)	Potencia (W)	Potencia (W)	Potencia (W)	Potencia (W)	Potencia (W)	Potencia (W)	Potencia (W)
12	711.1	704	697	697	670	711	711	711.1	711.1	711	
11	694	684	676	673.8	652.1	691	692.4	693.8	696.2	698.2	
10	517.5	595	592	590	578	605	598.8	587.3	559.8	572.6	
9	292.9	446.3	441.5	440	418.3	429.2	418.5	402	361	382	
8	44	245	246	239.4	228	224.3	209.6	184.6	128.3	157	
Potencia Total (Wh)	2259.5	2674.3	2652.5	2640.2	2546.4	2660.5	2630.3	2578.8	2456.4	2520.8	
Área (m ²)	1.2608	1.7468	1.5964	1.5302	1.4246	1.37	1.3495	1.3191	1.2846	1.2989	
Radiación por m² de lamina	1792.1	1531.0	1661.6	1725.4	1787.4	1942.0	1949.1	1955.0	1912.2	1940.7	

Tabla 3-4 Comparación de diferentes colectores modificando la distancia focal en el solsticio

En la Tabla 3-5, podemos observar que la distancia focal óptima en el equinoccio fue a 0.35m del concentrador, pero en la Tabla 3-4, observamos que la distancia focal óptima en el solsticio fue de 0.27m del concentrador. Así que, se tomó la decisión de utilizar la distancia focal óptima a 0.27m porque el rendimiento del captador se observaba mayormente afectado en el solsticio a una distancia focal de 0.35m, que cuando el captador se encontraba a una distancia de 0.27m en el equinoccio.

Distancia focal (m)	0.16	0.23	0.27	0.3	0.35
Potencia (Wh)	2238.75	2188.765	2164.451	2053.54	1958.976
Área (m ²)	1.5964	1.4246	1.37	1.3495	1.3191
Potencia por m ²	1402.4	1536.4	1579.9	1521.7	1485.1

Tabla 3-5 Comparación de diferentes concentradores modificando la distancia focal en el equinoccio

Hora	Potencia (Watts)	Figura
12	711	
11	691	
10	605	
9	429.2	
8	224.3	
Total	2660.5	

Ilustración 3-40 Desempeño del concentrador seleccionado en equinoccio

En la Ilustración 3-40, podemos observar el desempeño del concentrador seleccionado. En la ilustración, observamos el transcurso de las horas y con ello, la potencia para cada hora y cómo el captador es iluminado por la radiación solar concentrada por la superficie reflectora. En la Ilustración 3-41, podemos observar el desempeño del concentrador seleccionado en el solsticio, en esta ilustración observamos las mediciones de los dos films necesarios para captar la energía enviada por la superficie reflectora. En esta ilustración la potencia total recibida es la suma de los dos films.

Hora	Potencia (Watts)	Figura	Potencia (Watts)	Figura
12	358.8		344	
11	351		333	
10	217		356	
9	119.7		71	
8	10.6		5.351	
	1057.1		1109.35	
Total	2166.45			

Ilustración 3-41 Desempeño del concentrador seleccionado en solsticio

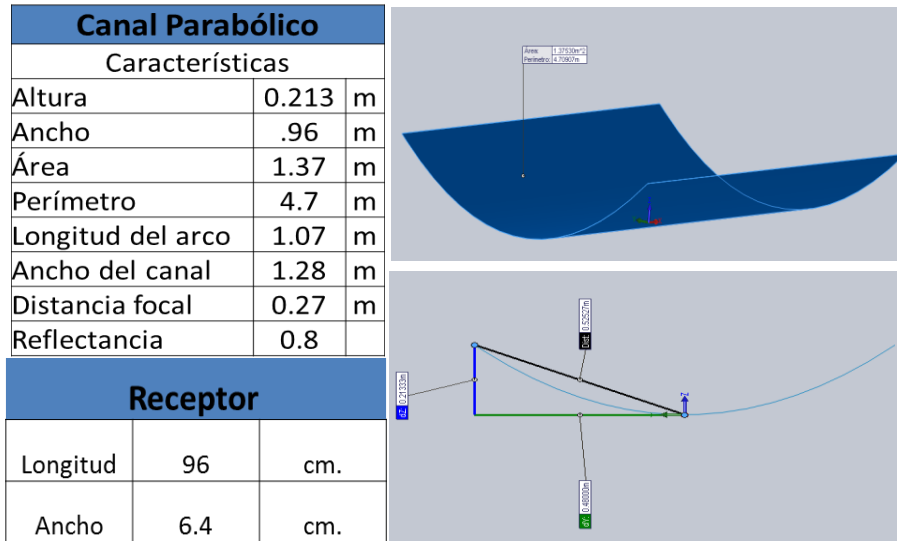


Ilustración 3-42 Dimisiones del concentrador seleccionado

Una vez encontrada la distancia óptima para el captador, se dio paso a realizar el diseño de la estructura, para ello se utilizó el software Solid Works (Ilustración 3-42). Para este diseño, se decidió utilizar madera por la facilidad que tiene de manipularse y porque las dimensiones del concentrador hacían posible fabricarlo. El diseño resultante constaba de tres costillas hechas de tablas de una sola pieza cada una, cortadas con la geometría de la parábola para darle el mejor soporte a la lámina reflectora (Ilustración 3-43).

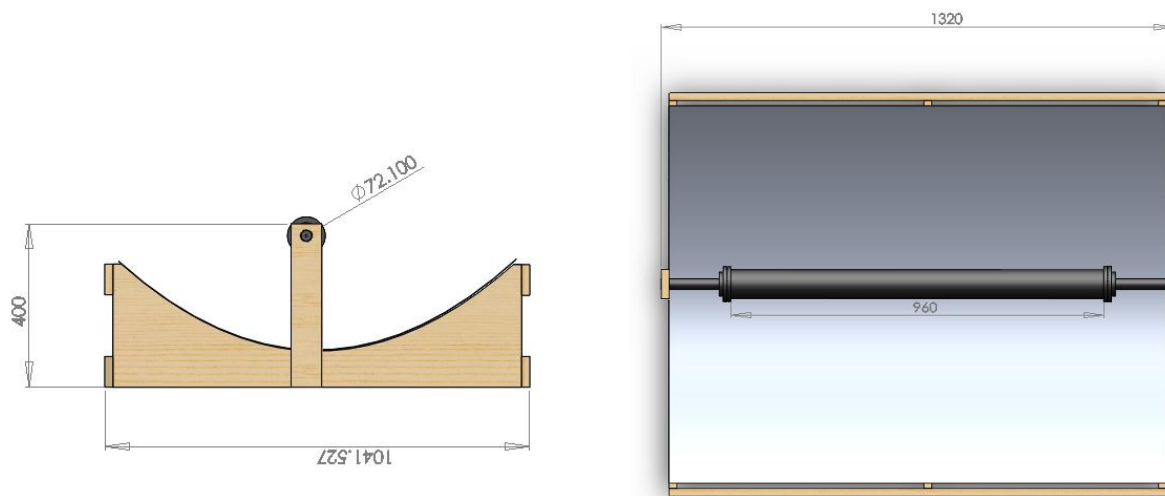


Ilustración 3-43 Diseño de la estructura del concentrador

Diseñada esta estructura, se dio paso a crear el diseño del captador. Para ello, fue necesario tener acceso al interior del tubo con facilidad, pero al mismo tiempo, tendría que tener rigidez suficiente para soportar su peso y el peso del material que iba llevar por dentro. (Ilustración 3-44). Por esta razón, se ideó un sistema con tapas removibles, las cuales fueran unidas con abrazaderas comerciales que son utilizadas para uniones de tuberías en la industria. Esto nos daría la rigidez suficiente para soportar el peso del tubo y del material que se introduciría; además de la ventaja de poder tener un sello para evitar pérdidas de calor. El material escogido para realizar el tubo absorbedor fue el acero inoxidable por razones de evitar oxidación por los residuos del proceso (ácido piroleñoso), además de la facilidad de encontrar los materiales en el mercado. Las características del tubo absorbedor construido es que su estructura completa es de acero inoxidable 304 y tiene un recubrimiento de pintura negra comercial de alta temperatura la cual soporta temperaturas máximas de 648°C (Tabla 3-6). Para la lámina reflectora, se escogió el aluminio anodizado por tener una alta reflectancia (por arriba del 90%) en nuestro caso se decidió manejar la “lámina Super UltraBrite 95”, con una reflectancia del 95%.

Tabla 3-6 Características del tubo absorbedor

Característica	
Material	Acero inoxidable 304
Coefficiente de expansión térmica	1.8e-005
Densidad	0.008 g/mm ³
Conductividad térmica	16 W/m K
Calor específico	500 J/kg K
Temperatura máxima de pintura	648°C



Ilustración 3-44 Tubo Absorbedor

3.11 Construcción del prototipo

Para el cortado de las costillas donde se apoya la lámina reflectora, en donde el corte requería una gran precisión, se imprimió el modelo diseñado por medio de un plotter, una vez impreso se recortó el modelo de papel conservando la forma de la parábola y con ello se dio paso a marcar la madera de manera precisa para posteriormente ser mandada a cortar con una caladora. Una vez cortada se probó visualmente que el corte coincidiera con el modelo impreso en papel. Concluido esto se dio paso al armado de la estructura de madera; para ello fue necesario el uso de ménsulas con el fin de facilitar el ensamblado de la estructura, además de aumentar su (Ilustración 3-45 e Ilustración 3-46).

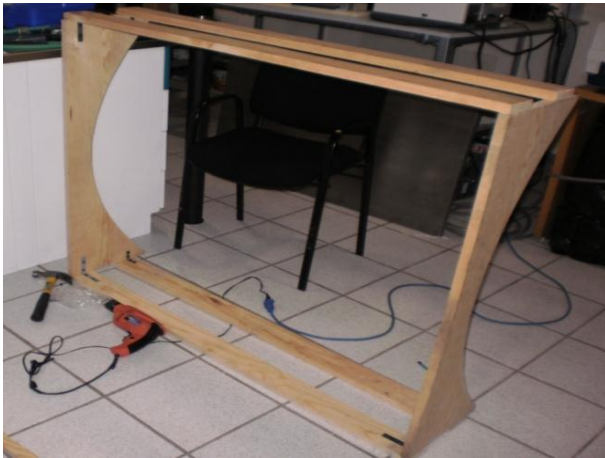


Ilustración 3-45 Armado del prototipo



Ilustración 3-46 Armado del prototipo

Una vez armada la estructura se dio paso a colocar los accesorios necesarios para hacer más cómodas la pruebas, para ello se instaló una base pequeña para el piranómetro (Ilustración 3-48). Además de ello se instaló un sistema de posicionamiento para el concentrador, que consta de unas patas telescópicas, las cuales se pueden ajustar a la altura para alcanzar los ángulos necesarios para poder enfocar el concentrador solar (Ilustración 3-49), a esto también se agregó unas guías para hacer un enfoque directo al Sol (Ilustración 3-47). Una vez realizado esto se dio paso a colocar la lámina reflejante, para ello se utilizó pegamento con la finalidad de dañar lo menos posible la lámina (Ilustración 3-50).



Ilustración 3-48 Base para piranómetro



Ilustración 3-47 Guía de enfoque

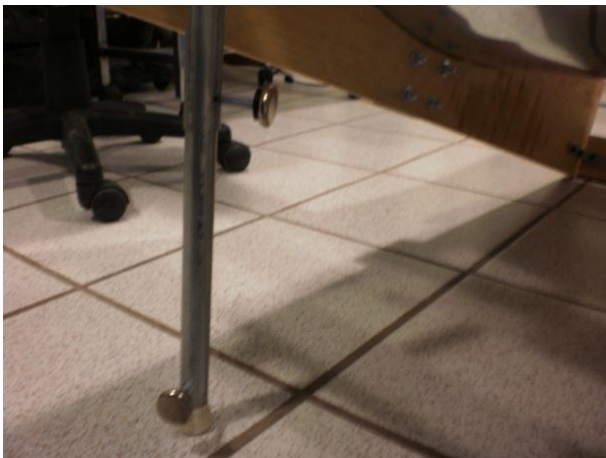


Ilustración 3-49 Sistema de posicionamiento



Ilustración 3-50 Pegado de lámina

3.12 Pruebas de concentrador diseñado



Ilustración 3-51 Prueba de temperatura con tubo de acero inoxidable

Una vez finalizada la construcción del prototipo se dio paso a realizar una prueba de temperatura en seco (sin ningún material dentro del receptor); para esta prueba el concentrador fue enfocado directamente al Sol (Ilustración 3-51). Para esta prueba se monitoreó la temperatura dentro del receptor, además, se monitoreó la radiación solar incidente en el captador y la velocidad del viento durante la duración total del experimento, que fue de una hora y treinta minutos (Tabla 3-7).

Tabla 3-7 Mediciones de primera prueba

	Velocidad de viento (m/s)	Velocidad de rafaga (m/s)	Radiación solar (W/m ²)	Temperatura interna del receptor (°C)
Promedio	1.060412574	1.660117878	1035.298428	127
Máximo	3.43	4.57	1061.9	183
Mínimo	0	0	426.9	110

Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, ya que la temperatura no era suficiente para empezar el proceso de carbonización, ya que este mismo comienza por arriba de los 270°C, así que después de esta prueba fallida, se decidió regresar al diseño y realizar simulaciones de temperatura para encontrar la problemática de esta falla en el diseño.

3.13 Simulación de temperatura en el absorbedor

Para comprobar qué era lo que estaba pasando con la temperatura del captador nos dimos a la tarea de realizar simulación con un software CFD (Flow Simulation). Para ello se utilizó el modelo previamente realizado en Solid Works y se le agregaron los factores a los que estaba expuesto el modelo, como lo es: la radiación incidente, que el simulador arrojaba que era un máximo de 700 W (resultado previo de OptiCAD), la velocidad del viento (se utilizó el promedio medido en las pruebas realizadas) y la humedad relativa, que fue extraída de la base de datos meteorológica más cercana al lugar en donde se realizó la prueba (Tabla 3-8). Los resultados de temperatura arrojados por el simulador se muestran en la Tabla 3-9 y la distribución térmica del tubo se muestra en la Ilustración 3-52.

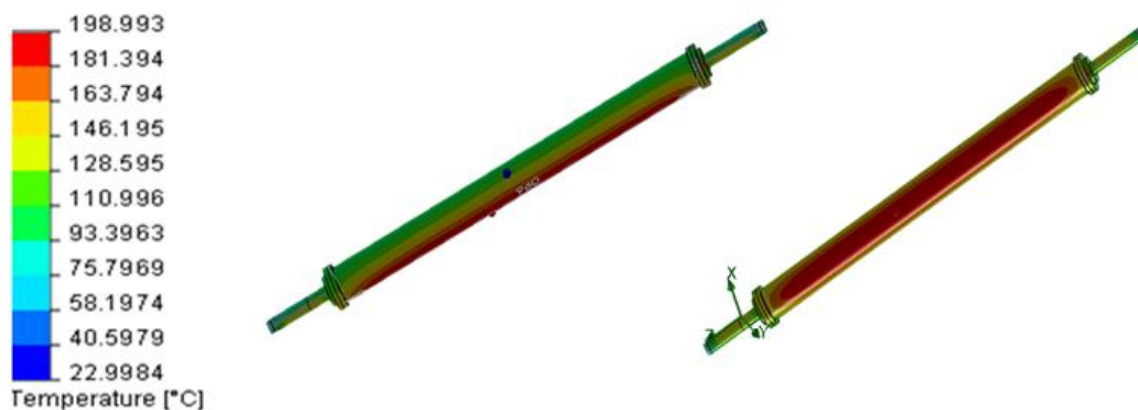


Ilustración 3-52 Comportamiento térmico del tubo de acero inoxidable absorbedor con viento

Tabla 3-8 Datos de entrada para el simulador

Datos de Entrada	
Viento	1 m/s
Humedad	70 %
Largo del Receptor	96 cm
Diámetro exterior	76 cm
Energía recibida	700 W

Tabla 3-9 Datos arrojados por el simulador

Datos de Salida	
Temperatura Máxima	198°C
Temperatura Promedio	134°C
Temperatura Mínima	93°C

Los resultados de la prueba y los resultados obtenidos en la simulación, coincidieron bastante bien, con ello confirmamos que la simulación representaba muy bien la realidad. Pero ahora teníamos una confirmación de que el prototipo realizado no funcionaba bien, así que nos dimos a la tarea de proponer soluciones para este problema.

Las soluciones propuestas fueron: aumentar la razón de concentración para aumentar la temperatura, esto podía solucionarse aumentando el ancho del concentrador o disminuyendo el diámetro del receptor o aislar térmicamente el receptor solar mediante un tubo de vidrio y evacuar en lo posible el aire dentro de este, para evitar pérdidas de energía por convección y con esto tener un buen aislamiento térmico. A partir de estas ideas, se dio paso a realizar la simulación del mismo tubo pero ahora encerrado en una cápsula de aire, en la cual no se consideraba el viento ni la humedad. Los resultados se muestran en la Tabla 3-11 y en la Ilustración 3-53. Después de analizar los datos arrojados por el simulador, nos dimos cuenta que el problema radicaba en la razón de concentración, así que sólo nos quedaban dos alternativas; hacer más ancho el concentrador solar o disminuir el diámetro del receptor, así que por conveniencia se decidió en cambiar el receptor.

Tabla 3-10 Datos de entrada para el simulador

Datos de Entrada	
Viento	0 m/s
Humedad	0 %
Largo del Receptor	96 cm
Diámetro exterior	76 cm
Energía recibida	700 W

Tabla 3-11 Datos arrojados por el simulador

Datos de Salida	
Temperatura Máxima	244°C
Temperatura Promedio	176°C
Temperatura Mínima	132.63 °C

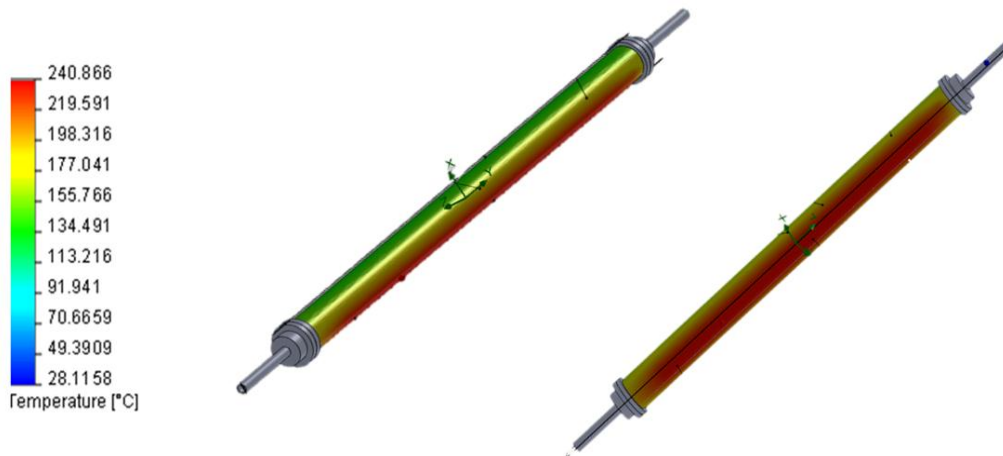


Ilustración 3-53 Comportamiento térmico del tubo de acero inoxidable absorbedor sin viento

3.14 Simulación de temperatura para el tubo evacuado

Una vez convencidos de que el cambio del captador era la solución más rápida y más viable económicamente hablando, se dio paso a buscar un captador de diámetro más pequeño, para ello se escogió un captador comercial que ya tenía un aislamiento térmico de fábrica y era relativamente económico; se eligió un captador de tubo evacuado para calentadores solares de agua.

Para ello se realizó la simulación para observar su comportamiento térmico, por lo cual se realizó el dibujo en Solid Works para posteriormente someterlo a pruebas en el simulador; los datos de entrada para el simulador (Tabla 3-12) fueron muy similares para los hecho en la pasada prueba. Los resultados de dicha prueba son mostrados en la Tabla 3-13 y en la Ilustración 3-54.

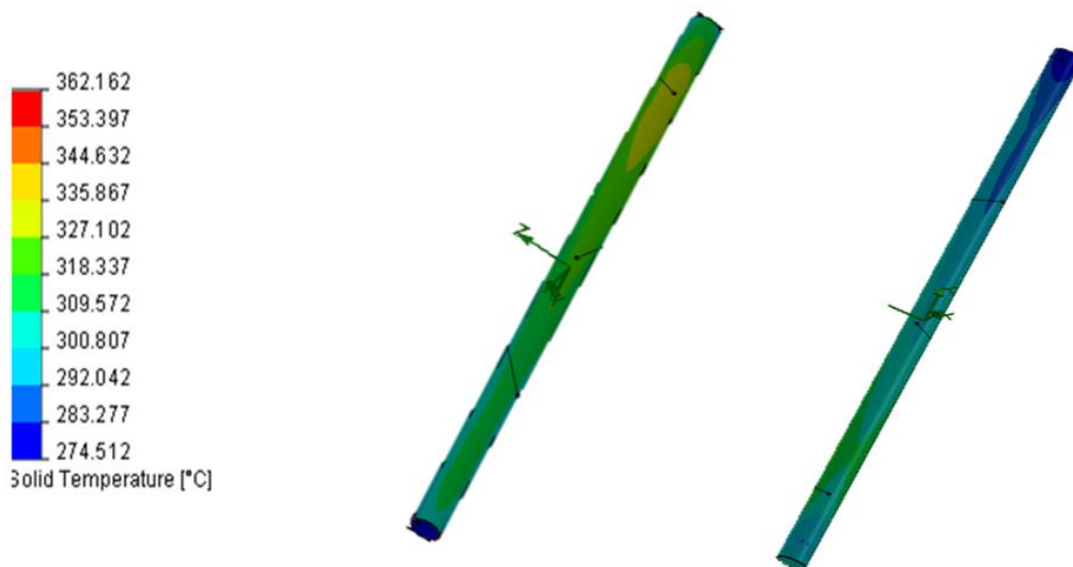


Ilustración 3-54 Comportamiento térmico del tubo evacuado con radiación de 700 W

Tabla 3-12 Datos de entrada para el simulador

Datos de Entrada	
Viento	0 m/s
Humedad	0 %
Largo del Receptor	150 cm
Diámetro exterior	48 cm
Energía recibida	700 W

Tabla 3-13 Datos arrojados por el simulador

Datos de Salida	
Temperatura Máxima	362.2 °C
Temperatura Promedio	309.1 °C
Temperatura Mínima	274.5 °C

Los resultados para esta prueba fueron muy alentadores, ya que la temperatura promedio estaba casi 30°C por arriba del mínimo necesario para iniciar el proceso de carbonización. Así que los datos obtenidos indicaban que con el cambio de captador, era posible realizar la obtención del carbón vegetal. Antes de realizar la compra, se decidió realizar una última simulación para verificar si el tubo podría elevar la temperatura con la radiación mínima que en el OptiCAD registraba en horas críticas donde la radiación en el objetivo era relativamente baja que era en el solsticio a las 10 am y 2 pm, donde la radiación registrada era de 573 W, pero quisimos ir un poco más por debajo de la energía requerida así que la simulación sólo se realizó con 450 W para probar si el receptor podía llegar a temperaturas en días de poca irradiación solar directa. Los resultados de dicha prueba son mostrados en la Ilustración 3-55 y la Tabla 3-15.

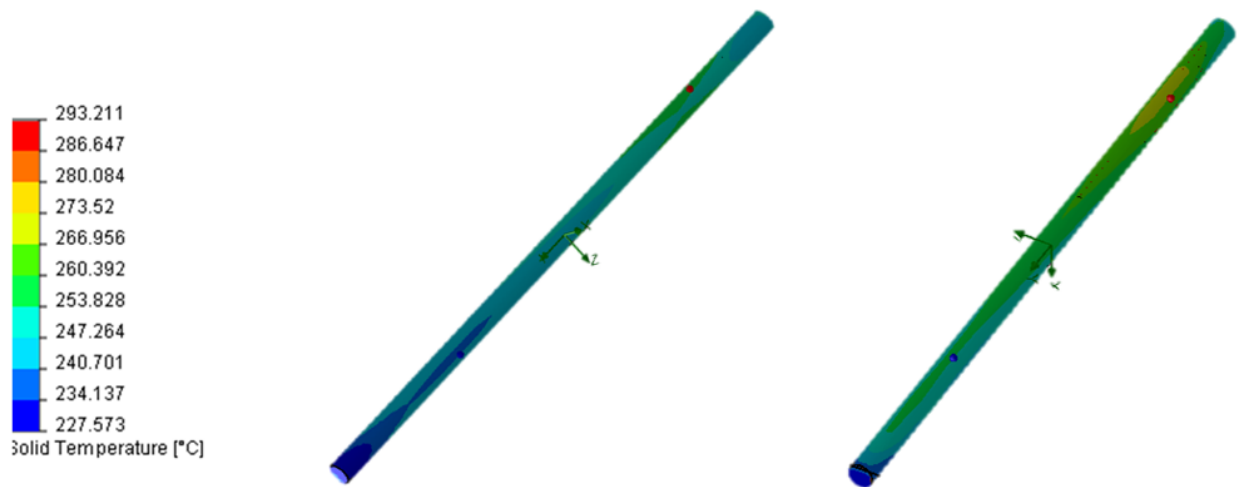


Ilustración 3-55 Comportamiento térmico del tubo evacuado con radiación de 450 W

Tabla 3-14 Datos de entrada para el simulador

Datos de Entrada	
Viento	0 m/s
Humedad	0 %
Largo del Receptor	150 cm
Diámetro exterior	48 cm
Energía recibida	450 W

Tabla 3-15 Datos arrojados por el simulador

Datos de Salida	
Temperatura Máxima	293.2 °C
Temperatura Promedio	252.9 °C
Temperatura Mínima	227.5 °C

Los resultados fueron aceptables ya que la temperatura media sólo estuvo a 20°C grados por debajo de la temperatura mínima para el proceso de carbonización y en cambio partes del receptor sí podrían llegar por arriba de la temperatura para iniciar el proceso de carbonización. Con esto podíamos concluir que el cambio del receptor era adecuado para realizar el proceso de carbonización.

3.15 Prueba de temperatura con tubo evacuado

Una vez comprobado que el receptor de tubo evacuado era el adecuado para este proceso, se procedió a realizar la compra, pero antes de iniciar la prueba con madera, se realizó una prueba para comprobar la temperatura que podía alcanzar el tubo en seco (Ilustración 3-56). La prueba se realizó enfocando el concentrador solar diseñado directamente al Sol, esta prueba se caracterizó por utilizar un tapón de caucho para evitar pérdidas de calor, a este tapón se le realizó un abertura por donde pasara el termopar del termómetro digital con el fin de realizar mediciones de temperatura interna del tubo evacuado, además de esto se monitoreó la radiación solar incidente en el captador y el viento durante toda la duración del experimento. Los resultados fueron muy buenos ya que la temperatura comenzó a subir rápidamente hasta llegar a 385°C en sólo 20 minutos con las condiciones ambientales mostradas en la Tabla 3-16.



Ilustración 3-56 Concentrador con tubo evacuado

Tabla 3-16 Resultado de mediciones ambientales para prueba del concentrador solar con tubo evacuado

	Promedio	Máxima	Mínima
Velocidad del viento (m/s)	0.080	1.14	0
Ráfagas de viento (m/s)	0.222	1.52	0
Radiación solar (W/m ²)	997.66	1070.6	866.9

3.16 Prueba de concentrador solar para producir carbón vegetal

Una vez teniendo los resultados favorables, se dio paso a realizar la prueba final para comprobar si el colector podría producir carbón vegetal durante un día completo sin necesidad de realizar seguimiento solar, pero antes de realizar esta prueba se decidió hacer un cambio en el captador solar. El cambio consistió en insertar un tubo de cobre dentro del tubo evacuado con la finalidad de evitar en lo posible que los residuos del proceso se acumularan en las paredes del tubo evacuado, además de facilitar la extracción del producto final.

Este último cambio afectó directamente en la capacidad de producción del sistema ya que el volumen interno disminuyó en un 23.5 % lo que conllevó a que la máxima carga de madera disminuyera en esa proporción, así la prueba que se iba a realizar que se estimaba de 250 g de madera disminuyó a 180 g dependiendo de la densidad de la madera.

Para realizar esta prueba fue necesario encontrar el ángulo adecuado para inclinar el captador, para ello fue necesario utilizar la hoja de Excel. Para ello sólo era necesario insertar la latitud en que nos encontramos y el día en que se iba a realizar la prueba, con esto la hoja de cálculo nos arrojó el ángulo de inclinación del captador para dicho día. Una vez teniendo este dato, se procedió a realizar la prueba, para ello se colocaron los instrumentos de medición en su posición, se cargó el tubo de cobre con 180 g de madera de Delonix regia y posteriormente se insertó en el tubo evacuado y este a su vez fue colocado en el concentrador solar, para evitar la entrada de aire en el interior del tubo, se colocó un tapón de caucho en un extremo del tubo de cobre y alrededor de él se puso estopa para evitar pérdidas de calor por convección. Por último el concentrador fue orientado hacia el sur con una inclinación de 32° (Ilustración 3-57) los cuales correspondían a los cálculos previamente realizados con la hoja de cálculo para el día en que fue hecha dicha prueba.



Ilustración 3-57 concentrador solar orientado al sur con inclinación de 32°

Tabla 3-17 Resultado de mediciones ambientales

	Promedio	Máxima	Minima
Velocidad del viento (m/s)	0.162	3.05	0
Ráfagas de viento (m/s)	0.372	3.43	0
Radiación solar (W/m ²)	801.171	1025.6	113.1
Temperatura ambiente (°C)	27.667	30.52	22.106



Ilustración 3-58 Medición de temperatura interna del tubo

La prueba inició a las 10 am y terminó a las 3:21 pm, durante ese lapso de tiempo el ángulo de inclinación se mantuvo constante así como la orientación del concentrador. Los datos arrojados por los instrumentos de medición son mostrados en la Tabla 3-17. Durante la prueba se hicieron muestreos de la temperatura interna del tubo por medio del termómetro digital, la cual se mantuvo por arriba de los 270 °C (Ilustración 3-58). Al finalizar la prueba se observó que los 180 gramos de madera se convirtieron en 70 gramos de carbón vegetal y las muestras estaba perfectamente carbonizadas hasta su interior, con esto se probó que el sistema funcionó adecuadamente.



Ilustración 3-59 Carbón obtenido con el concentrador diseñado

4 Capítulo IV Conclusiones

Se verificó que la temperatura de 275 °C reportada en la literatura es suficiente para producir la carbonización completa de la madera, independientemente de las especies estudiadas en este trabajo (Delonix regia, Pinus ayacahuite y Acacia farnesiana)

Se determinó que para la conversión de leña a carbón vegetal se requiere de 3.8 Wh/gramo de leña, para las especies de madera empleados en este trabajo.

El rendimiento en masa de la conversión de leña en carbón vegetal es de aproximadamente 45% independientemente de la madera, para las 3 especies estudiadas en este trabajo, lo que coincide bastante bien con datos para ciertas maderas duras reportadas en la literatura.

La energía solar se puede emplear para realizar la transformación de leña en carbón vegetal.

La energía solar se puede aprovechar para la obtención de carbón vegetal empleando un concentrador parabólico axial, que requiere reajustar la orientación del mismo cada 15 minutos

Se diseñó, construyó y evaluó un concentrador solar estático capaz de obtener carbón vegetal a partir de leña sin requerir ningún ajuste de orientación durante el transcurso del día.

Se obtuvieron 70 gramos de carbón a partir de 180 gramos de leña de Delonix regia empleando el concentrador solar construido en este trabajo, lo que implica un rendimiento de 38%. Valor que es muy cercano al valor ideal (45%), y bastante mayor que el reportado en la literatura para el proceso tradicional de carbonización (20%).

Se demostró que para esta aplicación en particular es posible diseñar configuraciones estáticas que realicen las mismas funciones que dispositivos solares que requieren seguimiento continuo.

Se determinó que uno de los principales factores limitantes para poder procesar mayores volúmenes de leña con el prototipo construido lo constituyen las pérdidas por convección.

Bibliografía

- (Adam, 2009)** Adam J. C. Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort–kiln (Eco-charcoal) [Journal] // Renewable Energy. - Enero 2009. - Vol. 34. - pp. 1923-1925.
- (ANMCT,2010)** windows2universe.org [Online]. - 2010. - Diciembre 06, 2010. - http://www.windows2universe.org/sun/sun_il.html&edu=high&lang=sp.
- (Clarkson,2011)** Clarkson Laboratory [Online]. - 2011. - Marzo 17, 2011. - <http://store.clarksonlab.com/hi93530n.aspx>.
- (Duffie ,1980)** Duffie John A. Solar Engineering of Thermal Processes [Book]. - New York : John Wiley and Sons Inc., 1980.
- (Duran,2010)** Duran Alberto COMPONENTES DEL MEDIO AMBIENTE [Online]. - 2010. - Febrero 21, 2011. - http://www.encolombia.com/medioambiente/Componentes_Medio.htm.
- (Ecoefecto,2008)** Ecoefecto [Online]. - Diciembre 09, 2008. - Noviembre 03, 2009. - <http://ecoeefecto.com/CSA%20 analisis%20 tecnico.htm>.
- (EG-SOLAR,2009)** EG-SOLAR [Online]. - 2009. - 05 13, 2009. - <http://www.eg-solar.de/english/products/products.htm>.
- (FAO,1983)** Métodos simples para fabricar carbón vegetal [Book]. - Roma (Italia) : Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1983. - ISBN:92-5-301328-1.
- (HARPER,2007)** HARPER GAVIN D. J. Solar Energy Projects [Book]. - New York : Mc Graw Hill, 2007.
- (Herrero, 2009)** Herrero Alvarez Alberto Radiación del cuerpo negro aplicado a sistemas espaciales [Online] // universidad complutense de madrid. - 2009. - Febrero 3, 2011. - http://www.ucm.es/info/optica/lt3/data/practicas_adicional/TE_III_Cuerpo_negro_Sistemas_espaciales_v1.pdf.
- (Imadojemu,1994)** Imadojemu H E C O N C E N T R A T I N G PARABOLIC COLLECTORS [Journal] // Energy Convers.. - Agosto 1994. - Vol. 36. - pp. 225-237.
- (Juárez,2007)** Juárez Aarón Sánchez Bombeo de agua mediante sistemas fotovoltaicos [Conference] // Semana Nacional ANES. - Zacatecas México : [s.n.], 2007.

-
- (Lucas,2006)** Lucas Robyn [et al.] Solar Ultraviolet Radiation [Book] / ed. Prüss-Üstün Annette. - Geneva : World Health Organization, 2006. - ISSN 1728-1652 / ISBN 92 4 159440 3.
- (MacKay,2010)** MacKay David howtopowertheworld.com [Online]. - 2010. - Febrero 21, 2011. - <http://www.howtopowertheworld.com/what-is-solar-energy.shtml>.
- (MANRIQUE,1984)** MANRIQUE JOSÉ A. ENERGÍA SOLAR FUNDAMENTOS Y APLICACIONES FOTOTÉRMICAS [Book]. - [s.l.] : HARLA S.A. DE C.V., 1984.
- (Martínez ,2008)** Martínez Oscar Alejandro MANUAL DE INSTALACIONES PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR [Book]. - Mexico D.F. : [s.n.], 2008.
- (Menéndez,2007)** Menéndez J. Ángel El carbón en la vida cotidiana [Online]. - 2007. - 02 28, 2011. - <http://www.oviedocorreo.es/personales/carbon/index.htm>.
- (MicroDAQ,2011)** MicroDAQ [Online]. - 2011. - Febrero 2011. - <http://www.microdaq.com/index.php>. Contoocook, NH 03229 U.S.A.
- (Mills,2004)** Mills D. Advances in solar thermal electricity technology [Journal] // Solar Energy. - 2004. - Vol. 76. - pp. 19-31. - 0038-092X.
- (Myers,2008)** Myers Daryl R. Solar Hydrogen Generation [Book] / ed. Rajeshwar Krishnan, McConnell Robert and Licht Stuart. - [s.l.] : Springer, 2008. - 978-0-387-72809-4.
- (P. Hinojosa,2010)** P. Hinojosa J. F. Concentradores Solares [Book]. - Mexico D.F. : ANUIS, 2010.
- (Quan,2010)** Quan Jianhong Interma Solar Electrical Co. [Online]. - 2010. - DICIEMBRE 06, 2010. - <http://www.collector-solar.com/es/evacuatedtube.htm>.
- (Richter ,1996)** Richter John L. OPTICS OF A T W O - T R O U G H SOLAR C O N C E N T R A T O R [Journal] // Solar Energy. - [s.l.] : Elsevier Science Ltd, 1996. - 2 : Vol. 56. - pp. 191-198. - 0038-092X.
- (Rincón ,2009)** Rincón E., Lentz A. and Durán M. NEW SOLAR AIR HEATER BASED ON NON-IMAGING OPTICS FOR HIGH TEMPERATURE APPLICATIONS [Conference] // ASME 2009 3rd International Conference of Energy Sustainability. - San Francisco, California USA : [s.n.], 2009.
- (Sánchez,2009)** Sánchez Efrén Lenoscopia [Online]. - Agosto 3, 2009. - Diciembre 06, 2010. - <https://lenoscopia.wordpress.com/2009/08/03/perihelio-y-afelio/>.
- (Sun-Radian,2010)** Sun-Radian [Online]. - 2010. - Diciembre 2010, 06. - http://www.sun-radian.com/tubos_evacuados.php.
-

- (Syred,2005)** Syred C., Syred N. and Beedie D. A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP) [Journal] // Fuel. - Diciembre 2005. - 85. - pp. 1566-1578.
- (Szulmayer,1980)** Szulmayer Wally Solar Concentrator [Patent] : 423094. - USA, Octubre 28, 1980.
- (Tao,2011)** Tao Tao [et al.] A new trough solar concentrator and its performance analysis [Journal] // Solar Energy. - 2011. - Vol. 85. - p. 207. - 0038-092X.
- (Zekai,2008)** Zekai Sen Solar Energy Fundamentals [Book]. - London : Springer, 2008.