

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



**PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIOCOMBUSTIBLE DE
TERCERA GENERACIÓN, BIOACEITE, BIOGAS Y CARBÓN
A PARTIR DE UNA PIRÓLISIS SOLAR**

Por

SERGIO MORALES VALDÉS

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación
en Procesos Sustentables**

Julio, 2012

**PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIOCOMBUSTIBLE DE
TERCERA GENERACIÓN, BIOACEITE, BIOGAS Y CARBÓN
A PARTIR DE UNA PIRÓLISIS SOLAR**

Aprobación de la Tesis:

Dra. Rosa del Carmen Miranda Guardiola
Asesor de Tesis

Dra. María Elena Rodríguez Cantú
Secretaria

Dr. Javier Rivera de la Rosa
Vocal

Dr. Cesar Alberto Sosa Blanco
Vocal

Dra. Teresa Garza González
Subdirector de Estudios de Posgrado

Junio, 2012

RESUMEN

Sergio Morales Valdés

Fecha de Graduación: Julio, 2012

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título del Estudio: PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIOCOMBUSTIBLE DE TERCERA GENERACIÓN, BIOACEITE, BIOGAS Y CARBÓN A PARTIR DE UNA PIRÓLISIS SOLAR.

Número de páginas: 153

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Procesos Sustentables

Área de Estudio: Procesos Sustentables

Propósito y método del estudio:

En el presente proyecto se llevó a cabo una pirólisis solar de la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) utilizando como fuente de calentamiento un concentrador cilindro-parabólico. Igualmente, se realizó un análisis del nivel de sustentabilidad alcanzado del proyecto por medio de una huella de carbono del biodiesel de tercera generación.

Contribuciones y conclusiones:

El proceso de pirólisis solar de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) es un proceso técnicamente factible que puede lograr disminuir la huella de carbono de este combustible en un 60% comparado con el petrodiesel. Además se pueden producir otros productos de alto valor como medicamento (Z-9-Octadecenamida) y carbón vegetal.

FIRMA DEL ASESOR: _____

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Dra. Rosa del Carmen Miranda Guardiola, asesora de mi tesis. Su interés y apoyo a las ideas nuevas fueron la médula espinal para volver realidad este proyecto.

Igualmente agradezco y reconozco el trabajo de mi comité tutorial: Dra. María Elena Rodríguez Cantú, Dr. Cesar Alberto Sosa Blanco y Dr. Javier Rivera de la Rosa.

A la Dra. Evangelina Ramírez Lara por compartir su tiempo y conocimientos en la ciencia de la meteorología.

A Ismael Morales por instruirme en materia de la mecánica aplicada.

A la Lic. María Margarita Escamilla Vela por instruirme en el uso de Autodesk Inventor 2010.

A la Maestra Gloria Nelly Páez Garza por su continuo apoyo a lo largo de mi formación académica.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por el apoyo económico y permitirme utilizar sus instalaciones durante este posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para la realización de mis estudios.

Al Centro de Laboratorios Especializados (CELAES) de la Facultad de Ciencias Químicas, por permitirme hacer uso de sus instalaciones.

A las personas que trabajan en el centro de investigaciones de la Plataforma Solar de Almería (PSA), por complementar mi formación en materia de concentración térmica solar de baja, mediana y alta temperatura.

A Thania Carolina Cázares y Diana Bustos por su constante apoyo, ayuda, consejos y amistad durante el tiempo que duró este proyecto.

A mi familia por el apoyo moral, espiritual y económico que siempre me han brindado y que sin ellos me hubiera sido imposible llegar hasta este punto.

A todas las personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de este trabajo.

“One thing I am sure of, and that is that the human race must finally utilize direct sun power or revert to barbarism”

-Frank Shuman-

TABLA DE CONTENIDO

CONTENIDO	PÁG.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Panorama actual.....	1
1.2 Energía térmica solar.....	5
1.2 Antecedentes.....	9
1.2.1 Pirólisis solar.....	9
1.2.2 Pirólisis tradicional.....	14
1.2.3 Gasificación solar.....	15
1.2.4 Patentes. Conversión termoquímica solar.....	16
1.2.5 Huella de carbono	18
1.3 Hipótesis.....	19
1.4 Objetivo general.....	19
1.5 Objetivos específicos, metas y actividades.....	19
1.6 Referencias.....	22
2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MONTERREY, NUEVO LEÓN, MÉXICO.....	25
2.1 Estudios de la radiación solar directa, la temperatura y humedad relativa.....	25
2.2 Materiales y métodos.....	30
2.2.1 Metodología para el ATM y DTM.....	30
2.2.2 Método para la determinación del sur geográfico.....	33
2.3 Resultados.....	34
2.3.1 Año típico meteorológico.....	34
2.3.2 Día típico meteorológico.....	46
2.3.3 Determinación del sur geográfico.....	49
2.4 Conclusiones.....	50
2.5 Referencias.....	51
3. REACTOR QUÍMICO SOLAR: DISEÑO Y DESEMPEÑO TÉRMICO...	53
3.1 Introducción.....	53
3.2 Diseño y construcción.....	54
3.2.1 Diseño de reactor químico solar.....	54
3.2.1.1 Concentrador solar.....	54
3.2.1.2 Reactor químico.....	57
3.2.1.3 Soporte estructural.....	60
3.2.1.4 Sistema de monitoreo.....	61

3.3 Desempeño térmico.....	64
3.3.1 Metodología.....	64
3.3.1.1 Modelación óptica por trazado de rayos Monte Carlo.....	64
3.3.1.2 Ubicación de línea focal.....	66
3.3.1.3 Niveles de concentración y temperaturas alcanzadas.....	66
3.3.2 Resultados de discusión.....	67
3.3.2.1 Resultados de modelación óptica por trazado de rayos de Monte Carlo.....	67
3.3.2.2 Resultados de ubicación de la línea focal....	70
3.3.2.3 Resultados de experimentación de niveles de concentración y temperatura alcanzadas.....	70
3.4 Conclusiones.....	76
3.5 Referencias.....	78
4. PIRÓLISIS SILAR DE BIOMASA PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIOCOMBUSTIBLE DE TERCERA GENERACIÓN Y OTROS PRODUCTOS DE ALTO VALOR.....	79
4.1 Introducción.....	79
4.2 Metodología.....	82
4.2.1 Muestra.....	83
4.2.2 Configuración de equipo experimental.....	84
4.2.3 Método analítico.....	87
4.2.4 Balance de materia y energía.....	88
4.3 Resultados y discusión.....	90
4.3.1 Resultados del balance de materia.....	91
4.3.2 Resultados del análisis de transferencia de calor.....	93
4.3.3 Análisis cualitativo y cuantitativo del bioaceite.....	99
4.4 Conclusiones.....	103
4.5 Referencias.....	105
5. ANÁLISIS DEL NIVEL DE SUSTENTABILIDAD ALCANZADO.....	107
5.1 Introducción.....	107
5.2 Metodología.....	110
5.2.1 Alcance de inventario.....	111
5.2.2 Análisis de ciclo de vida.....	112
5.2.3 Cálculo de huella de carbono.....	112
5.2.4 Análisis de incertidumbre.....	114
5.3 Resultados y discusión.....	115
5.3.1 Análisis de ciclo de vida.....	115

5.3.2 Cálculo de huella de carbono.....	120
5.3.3 Análisis de incertidumbre.....	123
5.4 Conclusiones.....	128
5.5 Referencias.....	129
6. CONCLUSIONES GENERALES.....	131
APÉNDICES.....	136
Apéndice I.....	137
Apéndice II.....	150
Apéndice III.....	153

LISTA DE TABLAS

TABLA	PÁG.
CAPÍTULO 1	
Tabla 1.1 Características de los distintos concentradores según publicaciones recientes.....	7
CAPÍTULO 2	
Tabla 2.1 Publicaciones previas de ATM para distintas regiones. Los parámetros analizados están señalados con una X	26
Tabla 2.2 Publicaciones previas de DTM para distintas regiones. Los parámetros analizados están señalados con una X	27
Tabla 2.3 Sensores utilizados para la colección de información meteorológica durante los años 2007, 2008, 2009, y 2010.....	30
Tabla 2.4 Ecuaciones utilizadas para construir un ATM y DTM.....	32
Tabla 2.5 Años típicos térmicos publicados para diferentes regiones del mundo. Temperatura reportada en °C.....	36
Tabla 2.6 Años típicos solares publicados para distintas regiones del mundo. Energía Solar Recibida reportada en kW/m ² d.....	39
Tabla 2.7 Humedad Relativa Típica para distintas regiones del mundo. Humedad relativa reportada en porcentaje.....	40
Tabla 2.8 Comparación del Día Típico Solar para la zona metropolitana de Monterrey y Camagüey, Cuba. Insolación Reportada en W/m ²	47
CAPÍTULO 3	
Tabla 3.1 Comparación de los distintos materiales reflejantes utilizados para realizar concentradores solares.....	56
Tabla 3.2 Propiedades físicas del Vidrio Flotado, Bolosilcato y Cuarzo.....	58
Tabla 3.3 Instrumentación utilizada para monitorear y registrar una pirólisis solar.....	62
Tabla 3.4 Resultados de la experimentación sobre los niveles de concentración y temperaturas alcanzadas.....	71
Tabla 3.5 Temperatura a la que se estabilizó el interior del reactor y tiempo que tardó en llegar a esta.....	72
Tabla 3.6 Eficiencias promedio de operación y la eficiencia máxima alcanzada durante cada corrida experimental.....	73
CAPÍTULO 4	
Tabla 4.1 Comparación de publicaciones referentes pirólisis solar incluyendo el presente trabajo.....	81
Tabla 4.2 Análisis elemental realizado para el lote de cáscara de naranja seca. Miranda <i>et al.</i> (2009).....	84

Tabla 4.3 Condiciones de operación del sistema durante la pirólisis solar de biomasa.....	87
Tabla 4.4 Resumen de la operación del concentrador.....	91
Tabla 4.5 Resultados de balance de materia de pirólisis solar y pirólisis tradicional de la cáscara de naranja <i>Citrus sinensis</i>	92
Tabla 4.6 Desempeño de distintos concentradores solares tipo cilindro parabólicos.....	95
Tabla 4.7 Análisis de las pérdidas energéticas de la pirólisis solar.....	99
Tabla 4.8 Caracterización del bioaceite resultante del Experimento 1. Bioaceite producido por pirólisis solar de cáscara de naranja. Tamaño de partícula pirolizada 20x20x3 mm.....	100
Tabla 4.9 Caracterización del bioaceite resultante del Experimento 2. Bioaceite producido por pirólisis solar de cáscara de naranja. Tamaño de partícula pirolizada 30x3x3 mm.....	101

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1 Frontera del inventario de emisiones realizado para el biodiesel producido por pirólisis solar y para el biodiesel producido por Miranda <i>et al.</i> , (2009).....	111
Tabla 5.2 Criterios de evaluación de la calidad de los factores de emisión utilizados para el cálculo de huella de carbono.....	114
Tabla 5.3 Factor de incertidumbre asignado según la evaluación sobre cada parámetro.....	115
Tabla 5.4 Lista de entradas por proceso para la producción de 1 kilogramo de biodiesel por medio de una pirólisis solar de cáscara de naranja.....	119
Tabla 5.5 Lista de entradas por proceso para la producción de 1 kilogramo de biodiesel por medio de una pirólisis eléctrica de cáscara de naranja.....	119
Tabla 5.6 Resultado de la huella de carbono y la contribución en las emisiones en porcentaje base 100% del biodiesel producido por medio de 3 métodos de manufactura distintos:la pirólisis solar, la pirólisis eléctrica utilizado por Miranda <i>et al.</i> , (2009) y una pirólisis solar con mejoras en el proceso.....	123
Tabla 5.7 Matriz de factores de emisión con factores de incertidumbre. Factor de incertidumbre global con un intervalo de confianza de un 95%.....	124
Tabla 5.8 Huella de carbono global con grado de incertidumbre utilizando un análisis de cuna-a-puerta y de cuna-a-tumba para el biodiesel producido por medio de 3 métodos de manufactura distintos:la pirólisis solar, la pirólisis eléctrica utilizado por Miranda <i>et al.</i> , (2009) y una pirólisis solar con mejoras en el proceso.....	126
Tabla 5.9 Huella de carbono de la unidad de análisis (1 kg) y de la unidad funcional (100 MJ) para distintos combustibles.....	127

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁG.
CAPÍTULO 1	
Figura 1.1 - Emisiones de gases de efecto invernadero en México por sector	2
Figura 1.2 - Esquema del reactor solar para pirólisis flash utilizado en Lédé <i>et al.</i> , (2002) para la pirolizar esferas de celulosa.....	11
Figura 1.3 - Esquema del reactor solar para pirólisis flash utilizado por Beattie, (1982) para la pirolizar carbón mineral.....	12
CAPÍTULO 2	
Figura 2.1- A) Desplazamiento del polo norte desde la zonanorte de Canada. Datos de 1831-2001. B) Pronósticos de desplazamiento del polo norte para el año 2050. Desplazamiento del norte de Canada al norte de Rusia.....	29
Figura 2.2 - Gnomon con trazo de líneas para la determinación de los polos geográficos.....	34
Figura 2.3 - Año típico térmico para el área metropolitana de la ciudad de Monterrey. Temperatura promedio, mínima y máxima. Gráfico con información del periodo del 2007 al 2010.....	35
Figura 2.4 - Año típico solar para la zona metropolitana de Monterrey. Promedio mensual, mínimo y máximo de la energía solar recibida. El gráfico fue construido con información de los años 2007 al 2010.....	37
Figura 2.5 - Promedio de la energía solar recibida e insolación máxima promedio de la zona metropolitana de Monterrey. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.....	38
Figura 2.6 – Datos típicos de humedad relativa para la zona metropolitana de Monterrey. Promedio mensual, mínimo y máximo de humedad relativa. El gráfico fue construido con información de los años 2007 al 2010.....	40
Figura 2.7 - Horas típicas con luz solar para la zona metropolitana de Monterrey. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.....	41
Figura 2.8 - Temperatura promedio diaria del 1 de enero de 2007 al 31 de diciembre de 2010.....	42
Figura 2.9 - Comparación del año típico térmico con los registros históricos de temperatura. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010..	43
Figura 2.10 - Energía solar recibida del 1 de enero de 2007 al 31 de diciembre de 2010.....	44
Figura 2.11 - Comparación del año típico solar con los registros históricos de energía solar recibida. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.....	44
Figura 2.12 - Humedad relativa diaria del 1 de enero de 2007 al 31 de diciembre de 2010.....	45
Figura 2.13 - Comparación de datos típicos de humedad relativa con los registros históricos de humedad relativa. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.....	45

Figura 2.14 - Día típico solar para el área metropolitana de Monterrey. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.....	47
Figura 2.15 - Datos típicos de humedad relativa y temperatura por hora para la zona metropolitana de Monterrey. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.....	48

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Reflectancia de distintos espejos metálicos en longitudes de onda distintos.....	56
Figura 3.2 - Dimensiones del espejo concentrador de plata construido para el presente trabajo. Unidades de longitud reportadas en milímetros. Esquema construido en Inventor 2011.....	57
Figura 3.3 - Curvas de transmitancia del vidrio, borosilicato y cuarzo.....	58
Figura 3.4 - Reactor tubular utilizado con vistas desde distintos ángulos. Simulación realizada en Inventor 2010.....	59
Figura 3.5 - Componentes principales con concentrador solar diseñado en el presente trabajo. Modelación realizada en Inventor 2010.....	61
Figura 3.6 - Soporte del concentrador solar utilizado en el presente trabajo. Registro fotográfico de unos momentos antes de montar el espejo concentrador.....	61
Figura 3.7 - Sistema de medición y monitoreo utilizado durante la experimentación.....	63
Figura 3.8 - Arreglo del sistema concentrador-reactor de PYREX para pruebas térmicas.....	67
Figura 3.9 - Trayectoria de 200 rayos escogidos al azar de manera representativa, los cuales se juntan en el punto focal. Simulación en SolTrace.....	68
Figura 3.10 - Simulaciones realizadas en SolTrace.....	69
Figura 3.11 - Irradiancia pico registrada sobre la línea focal a través del tiempo para las tres corridas experimentales.....	73
Figura 3.12 - Irradiancia promedio sobre la línea focal. Modelación del desempeño del concentrador solar a lo largo del año operando durante el 100% de horas con luz solar. Datos para el área metropolitana de Monterrey.....	74
Figura 3.13 - Promedio de irradiancia pico en la hora de mayor insolación durante un año típico. Información válida para el área metropolitana de Monterrey.....	75

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Diagrama de proceso global de pirólisis solar.....	82
Figura 4.2- Configuración del reactor de PYREX con hoja de aluminio en la parte superior representada como una cubierta azul y biomasa como esferas amarillas en el interior. Modelación realizada en Inventor 2011.....	85
Figura 4.3- Diagrama de flujo de pirólisis solar de biomasa.....	86
Figura 4.4- Registro fotográfico de pirólisis solar de biomasa. Fotografías realizadas el 21 de septiembre de 2011.....	86

Figura 4.5- Perfil de temperatura a través de la circunferencia del reactor. El origen de las abscisas representa el centro de la línea focal..... **95**

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Etapas de análisis del nivel de sustentabilidad..... **110**

Figura 5.2 - Etapas de ciclo de vida tipo de cuna-a-tumba de un producto..... **112**

Figura 5.3- Diagrama de ciclo de vida del biodiesel producido por una pirólisis eléctrica de cáscara de naranja seca..... **117**

Figura 5.4 - Diagrama de ciclo de vida del biodiesel producido por una pirólisis solar de cáscara de naranja seca..... **118**

Figura 5.5 - Huella de carbono de la pirólisis solar, pirólisis eléctrica y por la pirólisis solar con mejoras en el proceso. Huella de carbono para las etapas del ciclo de vida de 1 kg de biocombustible..... **122**

NOMENCLATURA

Nomenclatura utilizada en el presente trabajo.

Variables		Superíndices	
A	Área	d	Diario
c	Circunferencia	h	Horaria
Cp	Capacidad Calorífica	m	Mensual
DL	Horas con luz solar (h)	y	Anual
GDE	Incertidumbre		
h	Coeficiente de pérdidas de calor por radiación y convección		
I	Insolación (W/m ²)		
LI	Límite Inferior		
LS	Límite Superior		
M	Masa (kg)		
n ^d	Número de días		
n ^h	Número de horas		
HR	Humedad Relativa (%)		
Q	Calor		
DesEst	Desviación Estándar		
SQ	Energía Solar Recibida en un día (kWh/m ² d)		
T	Temperatura (°C)		
t	Tiempo (s)		
U	Factor de Incertidumbre		
X	Variable Meteorológica: T, I o HR		
Símbolos		Subíndices	
—	Promedio	f	Final
∑	Sumatoria	i	Variable medida en el punto i
α	Absorbancia	j	Variable medida en el punto j
η	Eficiencia	k	Variable medida en el punto k
τ	Transmitancia	k	Reacción
φ	Irradiancia		Máximo
		rxn	Mínimo
		max	Variable calculated for a meteorological factor: T, I or
		min	meteorological factor: T, I or
		x	RH
			Ambiente
		∞	

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Panorama actual

Uno de los retos más complejos que enfrenta la humanidad en la actualidad es frenar el cambio climático producido por la explotación indiscriminada de los recursos naturales. El 31 de Octubre de 2011 la población mundial alcanzó los 7 mil millones de habitantes y se espera que aumente a 9.3 mil millones para el año 2050¹. Todos ellos son seres humanos con demanda de recursos naturales la cual vuelve complicado el mantener los recursos de la tierra para las generaciones futuras. Actualmente el hombre se encuentra viviendo en un estado de extralimitación ecológica en la cual se consumen recursos a un ritmo del 150% de la velocidad en la que el planeta tierra puede regenerarse, y específicamente el mexicano vive actualmente consumiendo un 200% de lo que la biocapacidad de nuestra nación soporta². El impacto de México sobre el planeta fue evidente en el 2007 cuando contribuyó con 1.52% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero³. Esto lo convirtió en el noveno país con mayores emisiones a nivel global³. Según el Instituto nacional de ecología el 61% de las emisiones son causadas por el sector de energía y el 10% por desechos, siendo estos dos sectores los de mayor importancia para el presente trabajo (Figura 1.1) ⁴. El alto impacto de la

generación y consumo de energía sobre el medio ambiente ha presionado a la comunidad científica nacional e internacional a buscar soluciones racionales y sustentables. Entre las posibles soluciones se encuentra el uso de energías primarias renovables como lo son la solar y los biocombustibles.

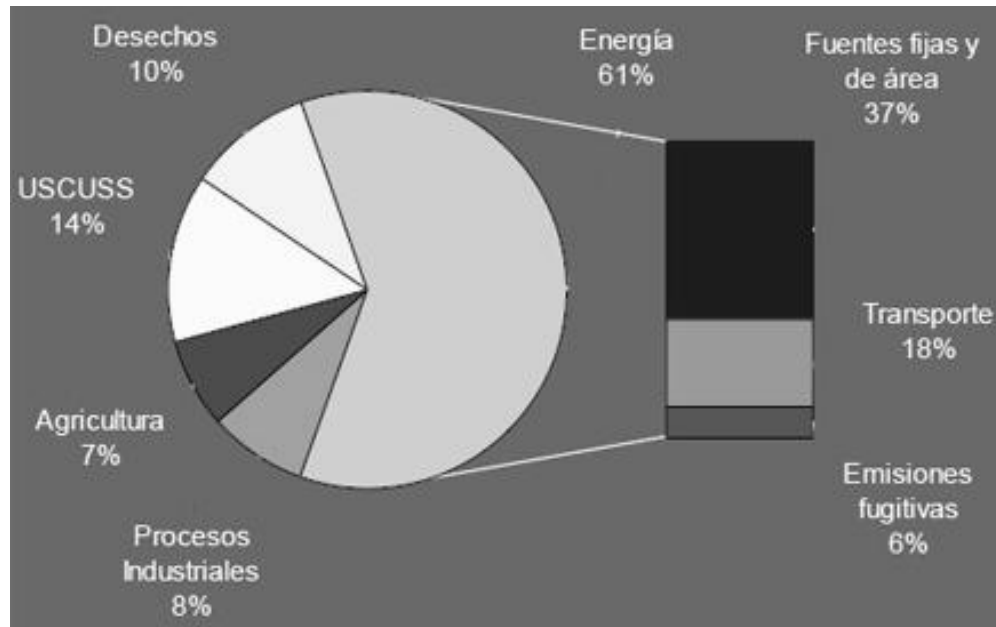


Figura 1.1 - Emisiones de gases de efecto invernadero en México por sector⁴.

Actualmente existen dos ramas de procesos principales para la conversión de la biomasa en un biocombustible, estos son: los procesos bioquímicos y los procesos termoquímicos. Entre los procesos bioquímicos se puede mencionar la fermentación, digestión aeróbica y anaeróbica, y la hidrólisis enzimática o ácida⁵. Entre los procesos termoquímicos de conversión tenemos la gasificación, pirólisis, licuefacción y combustión⁶. Los procesos bioquímicos logran una eficiencia de conversión de entre 35-50%, mientras que los procesos termoquímicos de 41-77%⁷. Sin embargo, la conversión de biomasa no se reduce exclusivamente a la generación de bioenergéticos, ya

que por estos procesos son técnicamente capaces de producir casi cualquier producto que actualmente se obtiene del petróleo⁶. Uno de los procesos con mayor flexibilidad para obtener distintos productos es la pirólisis. La pirólisis de biomasa es definida como el rompimiento térmico de los biopolímeros presentes en un material orgánico, en un ambiente libre de oxígeno⁸. Este proceso es capaz de generar biocombustibles, bioaceites, biogás y carbón vegetal en distintos rendimientos según el tipo de proceso, reactores y condiciones de operación utilizadas. La pirólisis presenta la ventaja de poder convertir más del 60% de la biomasa en bioaceite⁸⁻⁹.

Actualmente los biocombustibles están divididos en primera, segunda y tercera generación. Los biocombustibles de primera generación son aquellos que utilizan como materia prima una biomasa con valor como alimentos, además durante su proceso de producción utilizan fuentes de energía tradicional y pueden ser líquidos o gaseosos. Estos han sido parcialmente responsables de la crisis mundial de alimentos ocurrida en el 2008 debido al aumento en el precio de los granos y cereales¹⁰. Los biocombustibles de segunda generación son aquellos que utilizan como materia prima biomasa sin valor como alimento como lo son las maderas, yesca, y desechos agrícolas o ganaderos⁹. Estos combustibles continúan utilizando energía tradicional como medula espinal de su proceso de producción y pueden ser líquidos o gaseosos. Por último se encuentran los biocombustibles de tercera generación los cuales deben ser líquidos, no comprometer el suministro de alimentos entre la población y utilizar de manera parcial o total una fuente de energía renovable

durante su producción⁹. Un biocombustible de tercera generación presenta las siguientes ventajas sobre los otros tipos de combustibles:

- La huella de carbono durante su producción es inferior por utilizar energías renovables.
- Al ser líquido, es más sencillo de trasladar y almacenar que un gas.
- Es afín al uso en motores de combustión interna.
- No tiene impacto sobre el precio de los alimentos.
- Suele eliminar residuos agrícolas y ganaderos que de otra manera serían enviados al relleno sanitario.

El desarrollo y la aplicación de las tecnologías de segunda y tercera generación en México está abalada y promovida ampliamente por la Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos, la cual entró en vigor el 01 de febrero de 2008. Esta ley tiene no solo la finalidad de ayudar a solucionar la problemática energética y ambiental, sino igualmente de reimpulsar los sectores agricultor y ganadero por ser los principales proveedores de la materia prima¹¹. Igualmente, esta ley prohíbe el uso de los alimentos como materia prima en la obtención de biocombustibles con la finalidad de evitar un efecto negativo sobre el poder adquisitivo de productos alimenticios del mexicano. Por último se crea la Comisión de bioenergéticos, la cual se encargará de gestionar los permisos necesarios para la explotación de este recurso energético por parte de cualquier persona física o moral e igualmente promover el desarrollo de nuevas tecnologías¹². La capacidad legal de aprovechar este recurso renovable conforme a derecho se ha visto reflejado en la construcción de la planta de

biogás en Nuevo León y Ciudad de México; y las plantas de biodiesel en Chiapas, Yucatán, y Michoacán¹³⁻¹⁶. Sin embargo, todas estas plantas son consideradas como generadoras de biocombustibles de segunda generación debido al proceso de manufactura empleado y en algunos casos por ser productos gaseosos.

Con la finalidad de llevar los biocombustibles de segunda generación a la tercera generación se está intentando hacer los procesos de producción compatibles con distintas fuentes de energía renovable. Una de estas energías renovables que presenta grandes promesas para el futuro es la térmica de concentración solar.

1.2 Energía térmica solar

Los sistemas de energía térmica solar consiste en concentrar la radiación solar de un área en otra más pequeña con la finalidad de aprovechar la alta irradiancia en forma de calor. Los sistemas termo-solares están compuestos de 3 partes principales: el concentrador solar, el colector solar y el soporte estructural del equipo. En algunas ocasiones se puede acoplar un sistema de almacenamiento energético¹⁷.



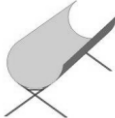

El concentrador solar se encarga enfocar la irradiación de una gran área sobre una más pequeña. Los principales tipos de concentradores son: heliostatos, cilindro-parabólicos, paraboidales y lentes de Fresnel¹⁸. Ver Tabla1.1.

El concentrador paraboidal es el más eficiente de todos logrando alcanzar las mayores temperaturas (1200 °C). Su concentración es puntual y normalmente está construido de una superficie reflejante como espejos de plata

o aluminio. Estos concentradores son utilizados para alimentar celdas fotovoltaicas de alta concentración, en la construcción de hornos solares o para suministrar de energía a motores Stirling ¹⁹. Los heliostatos son espejos planos los cuales se pueden agrupar de tal manera que la concentración de un campo completo pueda alcanzar los 900 °C en el foco. Estos concentradores son ampliamente utilizados en las torres de alta concentración, también conocidas en inglés como power towers²⁰. La gran ventaja de los heliostatos es que por su geometría son más sencillos de producir. Los concentradores cilindro-parabólicos tienen forma cilíndrica y concentran la irradiación sobre una línea focal. Esto los hace ideales para el calentamiento de fluidos a través de tuberías. Normalmente, operan a temperaturas de 400 °C y su forma los hace igualmente ideales para calentar reactores químicos tubulares. Los cilindro-parabólicos son empleados en plantas de generación de energía eléctrica calentando aceites, agua o sales fundidas que después suministran de calor a una turbina. La mayor parte de los sistemas de concentración solar actuales utilizan concentradores cilindro-parabólico²¹. Por último se encuentran los lentes de Fresnel los cuales son cristales cortados de forma tal que al pasar la luz a través de ellos, su ángulo de incidencia cambia y generan un punto focal. Estos cristales suelen ser costosos de producir y alcanzan temperaturas de solo 350 °C²². Los lentes de Fresnel presentan la mayor ineficiencia dentro de las tecnologías de concentración solar. Cualquiera de estos concentradores pueden ser utilizados para suministrar de calor a los procesos industriales de manera comprometida con el medio ambiente. Entre los procesos que se puede llevar a cabo con este método se encuentra la pirólisis de biomasa.

Tabla 1.1

Características de los distintos concentradores según publicaciones recientes.

Concentrador	Diagrama	Material	Tipo de Foco	Temp. de Operación (°C)	Características	Referencia
Paraboloidal		Espejo	Punto Focal	1200	<ul style="list-style-type: none"> • El colector es frágil. • Superficie reflejante de espejo. • Su forma lo vuelve difícil de manufacturar. 	Pfänder <i>et al.</i> , (2006) ²⁴
Plano/ Heliostato		Espejo	Punto Focal	900	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario acoplar varios heliostats para alcanzar la temperatura máxima., • Superficie reflejante hecha de espejo. • Es el más sencillo de manufacturar. 	Adinberg <i>et al.</i> , (2004) ²³
Cilindro-parabólico		Espejo	Línea Focal	400	<ul style="list-style-type: none"> • Ideal para calentar superficies cilíndricas. • Superficie reflejante hecha de espejo. 	Luzzi y Lovegrove, (2004) ²⁰
Lente de Fresnel		Vidrio	Punto Focal	350	<ul style="list-style-type: none"> • Su eficiencia es la menor. • Es frágil y costoso. • Esta hecho de vidrio. 	Rändler, (2007) ²²

La producción de biocombustibles utilizando alta irradiancia es una forma de almacenar la energía solar de manera química por ser productos de reacciones endotérmicas²⁵. Esto permite utilizar la energía en cualquier lugar o momento sin depender de la disponibilidad inmediata de recurso solar (por ejemplo: durante la noche o días nublados). Por esta razón se plantea la idea de llevar a cabo una pirólisis de cáscara de naranja utilizando un reactor solar. Siendo la cáscara de naranja un residuo agrícola con un impacto ambiental negativo y sin valor alimenticio, es una materia prima ideal para generar producir un biocombustible de tercera generación por medio de una pirólisis solar.

Actualmente, en México el grupo de investigación más prominente en materia de concentración térmica solar es el Centro de investigación energética (CIE) de la Universidad nacional autónoma de México (UNAM). El CIE se ha encargado de construir la única power tower en territorio nacional la cual cuenta con 20 heliostatos de 36 metros cuadrados cada uno, los cuales apuntan a una torre de 36 m. de altura. Esta torre se encuentra en Sonora y fue inaugurada en septiembre de 2010. El objetivo principal de esta torre es el alimentar de calor un ciclo Rankine para la generación de electricidad²⁶. Igualmente el CIE cuenta con un horno solar en Cuernavaca. Este horno solar opera con una doble reflexión. Primero un heliostato recibe la irradiación y la dirige a un concentrador paraboidal, el cual genera una irradiancia pico superior a los 12000 soles. Este flujo de energía ha sido suficiente para alcanzar temperaturas superiores a los 3406 °C en el foco²⁷. Sin embargo, no es el objetivo de la torre ni del horno el producir biocombustibles sino producir electricidad.

La importancia de esta tesis reside en demostrar el potencial de la integración de los sistemas termo-solares a la industria química mexicana para llevar a cabo reacciones químicas de naturaleza endotérmicas. Además, este estudio probará que con los recursos energéticos existentes en el área metropolitana de Monterrey (energía solar y biomasa) es tecnológicamente factible el generar biocombustibles, bioaceites, biogás y carbón vegetal de tercera generación.

1.2 Antecedentes

Se han llevado a cabo diversas investigaciones sobre el uso de energía solar térmica para la producción de combustibles. En breve se presenta un panorama general del estado del arte en este tema.

1.2.1 Pirólisis solar

Lédé *et al.*, (2002) presentó el estudio de una pirólisis flash de la celulosa dentro de un reactor de cuarzo de 3 cm de diámetro y 5 cm de largo el cual es sometido a una alta irradiación proveniente de una lámpara de xenón. La alta irradiancia se obtuvo por medio de un concentrador parabólico y la radiación solar fue simulada por una lámpara de xenón de 5 kW. La temperatura de pirólisis reportada es de 750 K y un tiempo de residencia menor a 1 s²⁸. Toda la experimentación ocurrió dentro del laboratorio sin utilizar energía solar real (Figura 1.2).

Lédé, (1998) realizó la propuesta de utilizar alta irradiancia de las lámparas de xenón en una pirólisis de biomasa. Durante este estudio se encontró que no solo este proceso es factible sino que los productos son distintos a los obtenidos por una pirólisis tradicional²⁹. Sin embargo, debido a la ausencia de datos referentes a las propiedades ópticas de la biomasa, el proyecto tubo un alcance limitado respecto al entendimiento de la transferencia de calor en el sistema.

Ledé *et al.*, (1999) reportó las propiedades ópticas de la celulosa, mezcla de celulosa, hemicelulosa y lignina y productos intermedios de la pirólisis

flash³⁰. Igualmente se expusieron los resultados de la pirólisis flash de pellets de celulosa utilizando un reactor de cuarzo. En este estudio se encontró que el flujo de energía necesario para llevar a cabo una pirólisis flash puede ser suministrado por la radiación concentrada de la lámpara de xenón. Igualmente se concluyó que el fenómeno de la pirólisis flash por alta irradiancia es muy parecido a la fusión de madera²⁸.

Lédé, (2003) propuso que durante el proceso de pirólisis flash se crea un producto intermediario líquido que cubre la partícula. Este líquido es quien recibe directamente la irradiancia, por lo tanto la transferencia de calor en la partícula se ve dominada por la transferencia de calor de este líquido hacia el interior del sólido y no por la influencia de la irradiancia directamente sobre el sólido³¹. Lédé *et al.*, (1998) aportó argumentos y evidencia a favor de la existencia de la formación de este producto intermedio líquido que aparece justo antes de que la pirólisis flash de la celulosa ocurra³². Además, los autores informaron que durante el proceso de pirólisis la reflectancia de la celulosa disminuye y la absorbancia aumenta como consecuencia de su transformación química y cromática^{28,32}.

Los artículos previamente mencionados en los que participa el investigador J. Lédé se ha encontrado una carencia de experimentación a una escala mayor, con energía solar real y utilizando biomasa real. Además, se desconocen las especies químicas presentes en los productos generados.

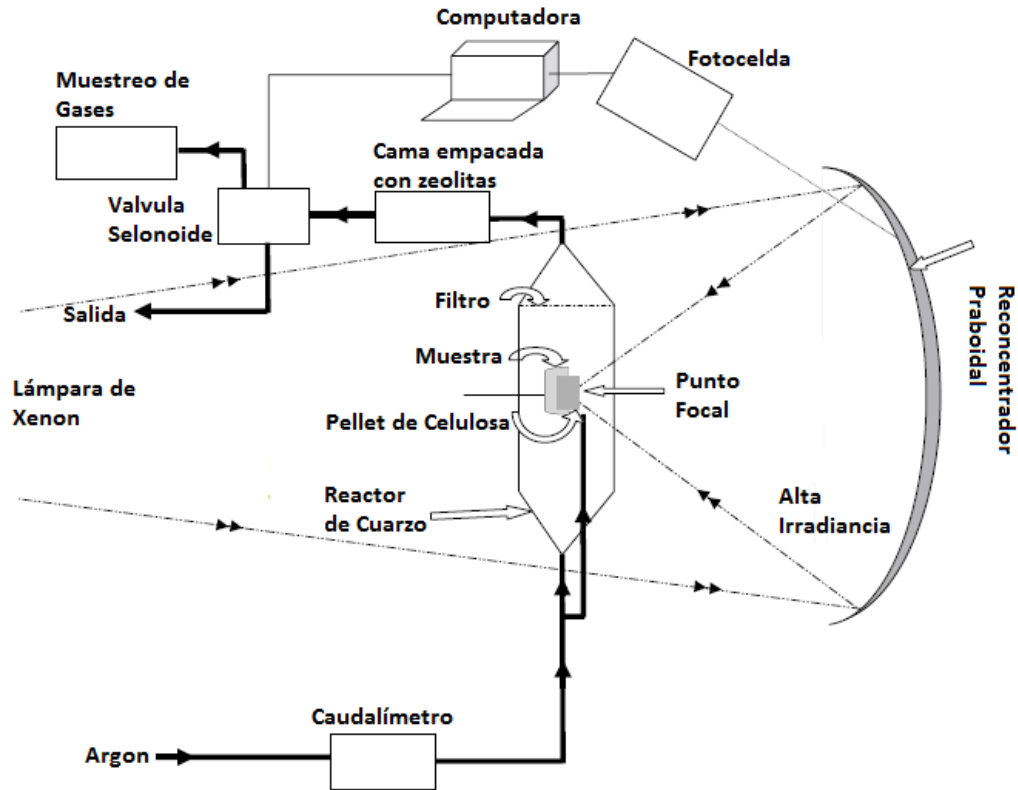


Figura 1.2 - Esquema del reactor solar para pirólisis flash utilizado en Lédé *et al.*, (2002) para la pirolizar esferas de celulosa²⁸.

Beattie, (1982) reportó una comparación entre la pirólisis flash de carbón mineral llevada a cabo con láser y con alta irradiancia solar³³. En este experimento se introdujeron 50 mg de carbón mineral en polvo dentro de un reactor con una ventana de cuarzo tipo domo. Se sometió a una irradiancia $>200 \text{ W/cm}^2$ y se alcanzaron temperaturas en el sólido de $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 1.3). Para la experimentación solar se utilizó un horno solar compuesto por un concentrador solar tipo heliostato y un reconcentrador paraboidal. Igualmente se aplicó un filtro para la irradiancia UV buscando evitar efectos fotocatalíticos. Se observó que la pirólisis flash solar entregaba un rendimiento superior al doble comparada contra la realizada por láser. Beattie descartó la opción de

una fotocatalisis y lo atribuyó a un efecto por la diferencia en la forma de la transferencia de calor. Este sigue siendo un tema en discusión por la posible interacción con otras longitudes de onda distintas a la UV. Dellinger *et al.*, (1990) demostraron la existencia de una fotocatalisis en la descomposición térmica solar del 3,3',4,4'-tetraclorobifenilo al ser expuesto a una radiación concentrada de una lámpara de xenón³⁴. La descomposición de esta molécula ocurrió a temperaturas inferiores bajo la irradiancia de la lámpara de xenón comparada con la temperatura de descomposición en un horno eléctrico. Beattie, (1982) utilizó solamente carbón mineral y su producto pirolítico fue un gas que no se caracterizó. Por último, el proceso utilizado fue una pirólisis flash y no se reportó información respecto a una pirólisis lenta.

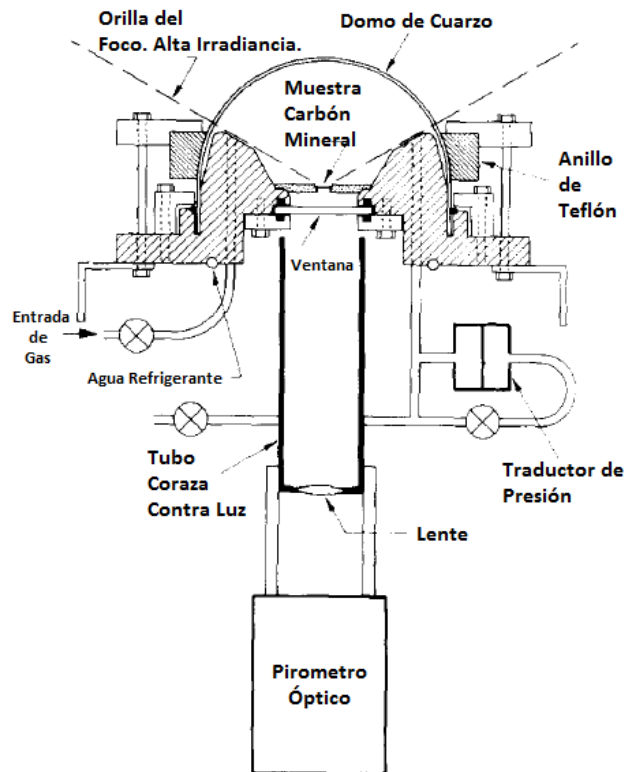


Figura 1.3 - Esquema del reactor solar para pirólisis flash utilizado por Beattie, (1982) para pirolizar de carbón mineral³³.

Tabatabaie-Raissi *et al.*, (1989) reportan la pirólisis de celulosa en un ambiente solar simulado. La celulosa sufre una pirólisis flash en un reactor de cuarzo el cual recibe la irradiancia de una lámpara de xenón concentrada con un espejo paraboidal ³⁵. Aun cuando la parte experimental es similar a la presentada en Lédé *et al.*, (2002) ²⁸, el objetivo de esta publicación fue el modelar el proceso proponiendo un mecanismo de reacción en un solo paso complementado por un análisis de mínimos cuadrados no lineal en la cinética. El modelo se mostró predictivo para el proceso y además se observó una actividad autocatalítica que fue atribuida a una interacción entre el vapor de pirólisis y la biomasa. Por último se encontró que el carbón mineral producido en la pirólisis flash solar puede ser utilizado como carbón activado. Sin embargo, no se encontraron publicaciones posteriores de este grupo de investigación referente al uso de biomasa real, uso de energía solar real o producción de biocombustibles y productos líquidos de alto valor.

Adinberg *et al.*, (2004)²³ estudiaron un proceso de pirólisis con sales fundidas utilizando una fuente de energía convencional y sugirieron que este proceso se puede llevar a cabo en un reactor solar. Los datos experimentales demostraron que el carbonato de sodio y potasio pueden ser utilizados como un medio de transferencia de calor rápido. Los autores expresaron la posibilidad de usar un reactor solar con la finalidad de fundir la sal y pirolizar una biomasa²⁴. En este caso, el producto sería un combustible gaseoso al no haberse propuesto un sistema de enfriamiento de los gases pirolíticos, sin embargo existe ausencia de resultados experimentales de campo.

Durante la investigación bibliográfica, no se encontró ningún grupo de investigación que esté trabajando con una pirólisis utilizando energía solar real y biomasa real. Actualmente, los pocos investigadores existentes en el tema de la pirólisis solar se encuentran trabajando en escala laboratorio. Por último, no se ha encontrado información sobre la obtención de un biocombustible de tercera generación por pirólisis solar. Estas áreas de oportunidad fueron igualmente recalculadas por Lédé, (2003) como una invitación a la comunidad científica a involucrarse en este tema³¹.

1.2.2 Pirólisis tradicional

Con respecto a la pirólisis de biomasa tradicional existe una gran cantidad de publicaciones al respecto, siendo la más importante para el tema de esta tesis el artículo publicado por Miranda *et al.* (2009)³⁶ donde se expone la pirólisis de segunda generación de la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*). En este artículo se muestra la factibilidad de generar bioaceite, carbón vegetal, y biogás por medio de una pirólisis lenta de esta biomasa. Además se reporta que la cáscara de naranja pierde un 80% de su peso durante el rango de temperatura de 114-569 °C en un ambiente inerte. Durante esta investigación se utilizó un horno de acero calentado por medio de una resistencia eléctrica³⁶. Los datos publicados en este artículo pueden ser utilizados para rediseñar el proceso y lograr producir un biocombustible de tercera generación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el proceso cambiará debido a que no utiliza un reactor de acero que pueda tener efecto catalítico por su contenido de hierro según lo propuesto por Lédé, (2003)³¹. Además al llevar a cabo una

pirólisis basada en radiación y no en conducción, las reacciones de descomposición pueden llegar a presentarse a temperaturas inferiores a las reportadas para hornos eléctricos^{31, 33, 37}.

1.2.3 Gasificación solar

La gasificación solar es una línea de investigación que ha sido tomada por varios grupos de investigación a nivel mundial.

Steinfeld y Weimer, (2010)²⁵ simularon la producción de un combustible gaseoso utilizando energía solar concentrada para llevar a cabo una gasificación en un horno solar. Los autores concluyeron que los procesos termoquímicos solares ofrecen una forma eficiente de almacenar y transportar energía solar.

Steinfeld *et al.*, (2009)³⁸ realizaron la modelación matemática de la reacción de sólidos bajo concentración de luz³⁸. La simulación reveló que las partículas pueden llegar a alcanzar los 1800 K y una conversión a metano de hasta un 45% másico²⁵.

Steinfeld y Z'Graggen, (2009) realizaron una simulación matemática sobre la transferencia de masa y calor durante una gasificación en un reactor solar³⁹. Los autores utilizaron el método de Monte-Carlo en tres dimensiones y la técnica de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de conversión de masa y energía. El modelo reveló que el tamaño de partícula afecta en gran medida al coeficiente de absorción y por lo tanto a la transferencia de masa y calor en el sistema.

Steinfeld *et al.*, (1999) publicaron datos experimentales sobre el desempeño térmico de su horno solar⁴⁰. El horno consta de un concentrador tipo heliostato y un reconcentrador paraboidal el cual concentra la irradiancia sobre una ventana de cuarzo. Bajo una insolación de 1041 W/m^2 , se registró una irradiancia de 5530 W/m^2 en el centro del foco, con lo cual se pueden alcanzar temperaturas superiores a 3000 K ⁴⁰.

Flechsengar y Sasse, (1995)⁴¹ llevaron a cabo una gasificación solar de mezclas de materiales carbonosos (biomasa con pizarra). Esta mezcla fue sometida a una alta irradiancia y ambos componentes comenzaron a gasificarse en una atmósfera de argón con vapor de agua. El resultado fue un gas compuesto por H_2 , CO , CH_4 , y CO_2 ⁴¹.

Vidal *et al.*, (2007) llevaron a cabo una gasificación solar de coque de petróleo en busca de la producción de hidrógeno. Esto se realizó en un horno solar de 5 kW el cual elevó el reactor a una temperatura de 1500 K . Se alcanzó una conversión máxima del 87% másico del coque alimentado. El gas de síntesis obtenido tenía una composición de $62\% \text{ H}_2$, $25\% \text{ CO}$, $12\% \text{ CO}_2$ y $1\% \text{ CH}_4$. Los autores concluyeron que a mayor tamaño de la partícula, menor era la eficiencia del proceso⁴².

1.2.4 Patentes. Conversión termoquímica solar.

En la actualidad existe una serie de patentes de reactores solares para la conversión termoquímica de materiales carbonosos. Estos reactores suelen operar con un material carbonoso sólido el cual es irradiado a través de una

ventana de cuarzo y produce un producto gaseoso. En general los diseños que se presentarán a continuación se inventaron para gasificar materiales carbonosos sin embargo estos pueden ser rediseñados para llevar a cabo una pirólisis.

Weimer *et al.* (2008) patentaron el diseño de un reactor para la gasificación de biomasa utilizando energía solar con la finalidad de obtener un gas de síntesis mayormente compuesto por monóxido de carbono e hidrógeno. Igualmente incluyeron dentro de su patente la pirólisis de biomasa por un ciclo de oxidación y reducción de óxidos de metales por método solar. Aun cuando en la patente habla de pirólisis de biomasa, los resultados experimentales se limitaron exclusivamente a la gasificación de celulosa y de pasto azul de Kentucky (*Poa pratensis*). En todos los casos, el producto fue un gas⁴³.

Yudow, (1986) patentó el diseño de un reactor solar para la gasificación de carbón. Este equipo puede operar con una alimentación sólida continua. El horno utiliza una ventana de cuarzo por la cual un flux concentrado de energía solar alcanza el reactivo sólido. En la patente no se describió el sistema de concentración solar, ni el proceso termodinámico que toma lugar dentro del reactor. Igualmente, no se mostraron datos experimentales⁴⁴.

Frosch y Quader, (1980) propusieron en su patente un diseño para un sistema de gasificación con cama fluidizada con un calentador solar. La alimentación es una mezcla de carbón y biomasa, que se gasifica para obtener

un gas de síntesis rico en CO, CH₄ and H₂. En la patente no se explicó el proceso termodinámico y no se reporta experimentación⁴⁵.

Aiman y Gregg, (1981) patentaron el diseño de un gasificador solar con una recirculación pirolítica de los gases. El flux solar se concentra por medio de heliostatos y la luz pasa por una ventana de cuarzo. La alimentación de hidrocarburos se introduce primero por una cámara de pirólisis y después en una de gasificación. No se reportaron datos experimentales y el combustible producido en este equipo es un gas⁴⁶.

1.2.5 Huella de carbono

La huella de carbono es un indicador del nivel de sustentabilidad ampliamente utilizado. Este es definido como la suma de las emisiones de gases de efecto invernadero emitidos de manera directa e indirecta por un servicio o producto a lo largo de su vida útil (Johnson, 2009)⁴⁷.

Johnson, (2009) publicó una comparación de la huella de carbono de utilizar asadores domésticos a base carbón contra los que utilizan gas licuado a presión. Este estudio reveló que el utilizar carbón emite casi 3 veces más gases de efecto invernadero que utilizar gas licuado a presión⁴⁷.

Stoeglehner y Narodslawsky, (2009) publicaron la huella de carbono del biodiesel de segunda generación. Los autores concluyen que aun cuando el biodiesel emite menos gases de efecto invernadero que el petrodiesel, es de suma importancia el tomar en cuenta el uso de suelo y el proceso de manufactura del biodiesel pues estos tienen el mayor impacto ambiental⁴⁸.

1.3 Hipótesis

Un proceso pirolítico de producción de biocombustible de tercera generación, bioacetes, biogás y carbón vegetal aumenta su sustentabilidad al utilizar energía solar térmica.

1.4 Objetivo general

Estudiar el desempeño y evaluar el nivel de sustentabilidad del proceso de pirólisis solar de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) para la producción de productos de alto valor (biocombustibles de tercera generación, bioaceites, biogás, y carbón vegetal).

1.5 Objetivos específicos*, metas y actividades*****

- 1) Estudiar el potencial de la tecnología solar térmica en Monterrey.
 - a. Análisis del recurso solar del área metropolitana de Monterrey, México.
 - i. Construir un año típico meteorológico para el área metropolitana de Monterrey.
 - ii. Construir un día típico meteorológico para el área metropolitana de Monterrey.
 - iii. Ubicar el Sur Geográfico.
 - b. Determinar los materiales de construcción del concentrador solar.

- i. Comparar diferentes materiales reflejantes (reflectancia, durabilidad y precio).
- ii. Definir el tipo de concentración (lineal o puntual) y calcular el foco.
- iii. Diseñar un soporte estructural para el concentrador afín a la experimentación en conversiones térmicas de biomasa.
- iv. Construir el concentrador solar y su soporte estructural.

2) Diseñar y caracterizar térmicamente el reactor solar.

- a. Diseñar y construir el reactor solar
 - i. Definir las dimensiones y geometría del reactor.
 - ii. Comparar los diferentes materiales para la construcción del reactor (transmitancia, durabilidad, precio).
 - iii. Construir el reactor solar.
- b. Acoplar el concentrador solar al reactor solar.
 - i. Buscar el foco real por medio de un barrido con láser.
 - ii. Calcular el máximo desempeño alcanzable por medio de un trazado de rayos de Monte Carlo.
 - iii. Comparar punto focal teórico con el real.
- c. Analizar el desempeño térmico del reactor solar.
 - i. Definir el sistema de medición y monitoreo.
 - ii. Llevar a cabo el experimento en el laboratorio.
 - iii. Reportar las temperaturas y radiación solar concentrada en tablas, gráficas y diagramas.

- 3) Producir un biocombustible de tercera generación.
 - a. Generar productos de alto valor por medio de una pirólisis solar.
 - i. Definir el sistema de medición y monitoreo.
 - ii. Llevar a cabo el experimento en el laboratorio.
 - iii. Reportar los datos experimentales en tablas, gráficos y diagramas.
 - iv. Reportar el análisis cualitativo y cuantitativo del producto líquido.
 - b. Analizar la transferencia de calor en el reactor.
 - i. Calcular el balance de materia y energía del sistema.
 - ii. Calcular las pérdidas de calor en el reactor.

- 4) Evaluar la eficiencia del proceso de pirólisis
 - a. Evaluar la eficiencia del reactor solar.
 - i. Calcular la eficiencia energética del procesos de pirólisis solar de la cáscara de naranja.
 - ii. Calcular la eficiencia del reactor solar.
 - iii. Calcular la eficiencia del concentrador.
 - b. Evaluar el nivel de sustentabilidad alcanzado.
 - i. Realizar un análisis del ciclo de vida de un biocombustible de tercera generación.
 - ii. Calcular y comparar la huella de carbón de un proceso de pirólisis solar contra un proceso de pirólisis tradicional.
 - iii. Realizar un análisis de incertidumbre de las huellas de carbono calculadas.

iv. Proponer posibles mejoras para aumentar la eficiencia y sustentabilidad del proceso.

* **Objetivos específicos indexados con números arábigos.**

** **Metas indexados por letras en minúsculas.**

*** **Actividades indexados por números romanos.**

1.6 Referencias

- 1 Crossette, B. Estado de la Población Mundial 2011. Fondo de Población de las Naciones Unidas, Ed. 1, New York, p. 1-5 (2011).
- 2 Global Footprint Networks. Trends. Mexico. (2010). <<http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/trends>> Fecha de Consulta: 13 de Diciembre de 2011.
- 3 The World Bank. Mexico. Solar Thermal Project Agua Prieta II. Global Environment Facility Coordination Team. Environment Department, WB. Washington, p. 1-2 (2006).
- 4 Instituto Nacional de Ecología. El cambio climático y los gases de Efecto invernadero. México D.F.(2010) <http://cambio_climatico.ine.gob.mx/pregfrecuentes.html> Fecha de consulta: 13 de Diciembre de 2011.
- 5 International Energy Agency. Biofuels for Transport. OECD, Ed. 1, Francia, p. 33-47 (2004).
- 6 Basu P. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design. Academic Press, Ed. 1, USA, p. 1-13 (2010). ISBN 978-0-12-374988-8
- 7 Agrawal R., Singh N.R., Delgass W.N., Ribeiro F.H. Estimation of Liquid Fuel Yields from Biomass. *Environmental Science Technology*, 44: 5298-5305 (2010).
- 8 Ringer M., Putsche V., Scahill J. Large-scale pyrolysis oil production: A technology assesment and economic analysis. NREL. Colorado, p.1-4 (2006).
- 9 Hertwich E.G., Zhang X. Concentrating-Solar Biomass Gasification Process for a 3rd Generation Biofuel. *Environmental Science Technology*, 43: 4207-4212 (2009).
- 10 Magdoff, F. The World Food Crisis. Z Net. (2008). <<http://www.zcommunications.org/the-world-food-crisis-by-fred-magdoff>> Fecha de Consulta: 23 de Noviembre de 2011.
- 11 Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. DOF. México. p.1-12 (2008).
- 12 Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión. Reglamento de Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. DOF. México. p.1-12 (2009).
- 13 León, G. Inaguran la planta biodiesel en Lázaro Cárdenas. La Jornada Michoacán. México (2007).
- 14 Hernández J. Planta de biogás en Bordo Poniente. Milenio. México (2009).
- 15 SOLBEN. Proyectos SOLBEN (2010) <http://www.solben.org.mx/index.php?option=com_content&view=article> Fecha de consulta: 14 de Diciembre de 2011.
- 16 Figueroa D. Plantas de biogás en las grandes ciudades de México. Green Monument. México (2009) <http://www.greenmomentum.com/wb3/wb/gm/gm_content?id_content=2821> Fecha de consulta: 14 de Diciembre de 2011.
- 17 Goswami D.Y., Vijayaraghavan S., Lu S., Tamm G. New and emerging developments in solar energy. *Solar Energy*. 76: 33-43 (2004).
- 18 Sánchez M.A. Energía Solar Térmica. LIMUSA, Ed. 1, México, p. 229 (2008).
- 19 Leitner, A. Fuel from the Sky. NREL, Ed. 1, USA, p. 79-94 (2002).

- 20 Luzzi A., Lovegrove K. Solar Thermal Power Generation. Australian National University. Canberra, p. 669-683 (2004).
- 21 Fernández-García, A., Zarza E., Valenzuela, L., Pérez, M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 1695-1721 (2010).
- 22 Rändle M. Nutzung von Solarenergie mit Linearen Fresnellinsen. Hochschule Mannheim. Alemania, p. 126-135 (2007).
- 23 Pfänder M., Lüpfert E., Heller P. Pyrometric Temperature Measurements on Solar Thermal High Temperature Receivers. *Journal of Solar Energy Engineering*. 128: 285-292 (2006).
- 24 Adinberg R., Epstein M., Karni J. Solar Gasification of Biomass: A Molten Salt Pyrolysis Study. *Journal of Solar Energy Engineering*. 126: 850-886 (2004).
- 25 Steinfeld A., Weimer A. W. Thermochemical Production of Fuels with Concentrated Solar Energy. *Optical Society of America*. 18: A100-A111 (2010).
- 26 Cruz A. Construye UNAM y UNISON campo para cosechar radiación solar. La Crónica de Hoy (2011) <http://www.cronica.com.mx/nota.php?id_notas=569727> Fecha de consulta: 16 de Diciembre de 2011
- 27 Estrada, C.A., Arancibia-Bulnes C.A., Vazquez S., Pérez-Rábago C.A., Riveros D., Perez-Enciso R., Quiñones J., Castrejón R., Montiel M., Granados F. A new high-flux solar furnace at CIE-UNAM in Temixco, Mexico. First Stage. Solar PACES 2011 (2011).
- 28 Lédé J., Boutin O., Ferrer M. Flash pyrolysis of cellulose pellets submitted to a concentrated radiation: experiments and modelling. *Chemical Engineering Science* 57: 15-25 (2002).
- 29 Lédé J. Solar thermochemical conversion of biomass. *Solar Energy*. 65: 3-13 (1998).
- 30 Lédé J., Boutin O., Olalde G., Ferriere A. Solar flash pyrolysis of biomass direct measurement of the optical properties of biomass components. *Journal of Physics IV France*. 9: 369-372 (1999).
- 31 Lédé J. Comparison of contact and radiant ablative pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 70: 601-618 (2003).
- 32 Lédé J., Boutin O., Ferrer M. Radiant flash pyrolysis of cellulose – Evidence for the formation of short life time intermediate liquid species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 47: 13-31 (1998).
- 33 Beattie, W. High-temperature solar pyrolysis of coal. *Solar Energy*. 31: 137-143 (1983).
- 34 Dellinger B., Graham J., Berman J.M., Klosterman D. High temperature photochemistry induced by concentrated solar radiation. Workshop on potential applications of concentrated solar photons, NRC. Colorado (1990).
- 35 Tabatabaie-raissi A., Mok W.S.L., Antal M.J. Cellulose pyrolysis kinetics in a simulated solar environment. *Ind. Eng. Chem. Res.* 28: 856-865 (1989).
- 36 Miranda R., Bustos-Martinez D., Sosa Blanco C., Gutiérrez Villareal M.H., Rodríguez Cantú M.E. Pyrolysis of sweet orange (*Citrus sinensis*) dry peel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 86: 245-251 (2009).
- 37 Lédé J. Biomass Pyrolysis: Comments on some sources of confusions in the definitions of temperatures and heating rates. *Energies*. 3: 886-898 (2010).
- 38 Steinfeld A., Maag G., Lipinski W. Particle-gas reacting flow under concentrated solar irradiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52: 4997-5004 (2009).
- 39 Steinfeld A., Z'Graggen A. Heat and mass transfer analysis of a suspension of reacting particles subjected to concentrated solar radiation – Application to the steam-gasification of carbonaceous materials. *International journal of heat and mass transfer*. 52: 385-395 (2009).
- 40 Steinfeld A., Haueter P., Seitz T. A new high-flux solar furnace for high temperature thermochemical research. *Journal of solar energy engineering*. 121: 77-80 (1999).
- 41 Flechsenhar M., Sasse C. Solar gasification of biomass using oil shale and coal as candidate materials. *Energy*. 20: 809-810 (1995).

- 42 Vidal A., Z'Graggen A., Haueter P., Maag G., Romero M., Steinfeld A. Hydrogen production by steam-gasification of petroleum coke using concentrated solar power – III. Reactor experimentation with slurry feeding. *International Journal of Hydrogen Energy*. 32: 992-996 (2007).
- 43 Weimer A., Perkins C., Mejjic D., Lichty P. Rapid solar-thermal conversion of biomass to syngas. Patent cooperation treaty. WO 2008/027980 A1 (2008).
- 44 Yudow B. D. Solar solids reactor. United States Patent. 4706651 (1987).
- 45 Frosch R. A., Quader A. S. Solar heated fluidized bed gasification system. United States Patent. 4290779 (1981).
- 46 Aiman W. R., Gregg D. W. Solar coal gasification reactor with pyrolysis gas recycle. United States Patent. 4415339 (1983).
- 47 Johnson E., Charcoal versus LPG grilling: A carbon-footprint comparison. *Environmental Impact Assessment Review*. 29: 370-378 (2009).
- 48 Stoeglehner G. y Narodoslowsky M. How sustainable are biofuels? Answers and further questions arising from an ecological footprint perspective. *Bioresource Technology*. 100: 3825-3830 (2009).

CAPÍTULO 2

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MONTERREY, NUEVO LEÓN, MÉXICO.

El recurso de la energía solar es variable dependiendo de la zona geográfica en la que se encuentre. El presente capítulo aborda el estudio de la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa de la zona metropolitana de la ciudad de Monterrey (ZMM) con la finalidad de brindar la información necesaria para el diseño y cálculo de potencial de un sistema termo-solar instalado en esta región.

2.1 Estudio de la radiación solar directa, la temperatura y humedad relativa.

El entendimiento de los fenómenos meteorológicos proporciona las bases para el aprovechamiento de la energía solar. Estos fenómenos varían según la zona geográfica y es por esto que es necesario realizar un estudio estadístico para cada región. En la Tabla 2.1 se pueden observar distintos estudios en donde se construyeron ATM y en la Tabla 2.2 se muestran artículos donde se publicaron DTM para distintas regiones del mundo. Los estudios en los que más frecuentemente se apoya el diseño de sistemas termo-solares son:

año típico meteorológico (ATM), día típico meteorológico (DTM), y la ubicación del sur geográfico.

Un ATM es también llamado año de referencia y es una base de datos representativa de las condiciones meteorológicas y su evolución a lo largo del año; mientras que el DTM o día de referencia es una base de datos representativa para la duración de un día¹⁻⁴. El ATM está dividido en 12 meses típicos meteorológicos y el DTM está dividido en 24 horas típicas meteorológicas⁵. Ambos son construidos con series de datos con observaciones cada hora de las variables a analizar. Estas series de datos deben poseer registros de más de un año. Estos modelos son de gran utilidad no solo para el diseño de sistemas termo-solares, sino también para otras áreas como: sistemas fotovoltaicos, energía eólica, arquitectura pasiva, contaminación ambiental, modelación computacional, etc ⁶. Por otro lado, la ubicación del sur geográfico es la determinación exacta del sur del planeta tierra en comparación con el sur magnético. Esto se realiza debido a la constante reubicación de los polos magnéticos y la necesidad de optimizar el enfoque de un concentrador solar⁷. Ya que México está ubicado en el hemisferio norte del planeta, los concentradores solares deberán estar enfocados hacia el sur para disminuir las pérdidas por enfoque⁷.

Tabla 2.1

Publicaciones previas de ATM para distintas regiones. Los parámetros analizados están señalados con una X.

Región	Temp.	Humedad Relativa	Radiación Solar	Velocidad del Viento	Referencia
Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos	X	X	X	X	Islam <i>et al.</i> , (2010) ⁸
Región Egéa de Turquía			X		Bulut, (2010) ⁹
Alaska, E.U.A.			X		Dissing y

					Wendler, (1998) ¹⁰
Ártico	X		X	X	Walsh y Chapman, (1998) ¹¹
Australia			X		Morrison y Litvak, (1999) ⁴
Hamilton, Nueva Zelanda	X	X	X	X	Anderson <i>et al.</i> , (2007) ¹²
Estambul, Turquía			X		Bulut, (2003) ¹³
Madrid y Valladolid, España			X		Bilbao <i>et al.</i> , (2003) ¹
Zona Mediterránea	X				Bilbao y Miguel, (2002) ⁶
Ciudad de México, México	X	X	X	X	Fast <i>et al.</i> , (2007) ¹⁴
Palermo, Italia	X	X	X		Ferrante, (2008) ¹⁵
Sureste de Anatolia, Turquía			X		Bulut, (2004) ²
Tailandia	X		X		Janjai y Deeyai, (2009) ⁵
Oeste de Malasia	X		X	X	Muzathik <i>et al.</i> , (2010) ¹⁶
Athalassa, Chipre	X	X	X	X	Florides <i>et al.</i> (2003) ¹⁷

Tabla 2.2

Publicaciones previas de DTM para distintas regiones. Los parámetros analizados están señalados con una X.

Región	Temp.	Humedad Relativa	Radiación Solar	Velocidad del Viento	Referencia
Athalassa, Chipre	X	X	X	X	Florides <i>et al.</i> (2003) ¹⁷
Camagüey, Cuba			X		Anatuña <i>et al.</i> , (2008) ¹⁸
Kassel, Alemania	X		X		Ransome y Funtan, (2005) ¹⁹
Pennsylvania, E.U.A.			X	X	Modica <i>et al.</i> , (2010) ³
Tokio, Japón	X				Qingyuan <i>et al.</i> , (2001) ²⁰

Hoy en día, se han realizado estudios del clima a gran escala sobre la ciudad de México y su efecto sobre los contaminantes presentes en la zona¹⁴. Sin embargo, actualmente existe una ausencia de análisis estadísticos que incluyan un ATM y un DTM con los respectivos intervalos de confianza para la ZMM. Actualmente la observación de las variables meteorológicas está a cargo

del Sistema integral de monitoreo ambiental (SIMA), el cual publica estos parámetros y los índices de contaminación en tiempo real a través del internet con fines de salud pública ²¹. Monterrey es la tercera ciudad de mayor población de México y posee un clima semiárido con poca lluvia (200-1200 mm anual) ²². Esta ciudad está ubicada en las coordenadas: 25°40'17'' norte, 100°18'31'' oeste ²³.

Los concentradores solares aumentan su eficiencia de concentración cuando estos se encuentran de frente al sol, por esta razón suelen tener partes móviles y estar inclinados en dirección sur (los concentradores en el hemisferio sur se inclinan hacia el norte)⁷. Para lograr aumentar la eficiencia del sistema, es esencial el tener ubicados los puntos cardinales antes de realizar la experimentación e instalación del equipo.

Normalmente se utilizan brújulas para poder ubicar los puntos cardinales. Sin embargo, tanto las brújulas digitales como las magnéticas en líquido ubican los polos magnéticos sin embargo estos suelen tener una ubicación distinta a los polos geográficos. Esto es debido al cambio constante de los polos por consecuencia de los flujos del magma interno de la Tierra que a su vez se ve alterado por la rotación de la Tierra y las tormentas solares²⁴. El polo norte magnético se desplaza en promedio 40 km/a ²⁵. Este fenómeno se ha monitoreado desde su descubrimiento en 1831 y se estima que para el año 2050 se haya desplazado desde el norte de Canadá hasta el norte de Siberia (Figura 2.1) ²⁶.

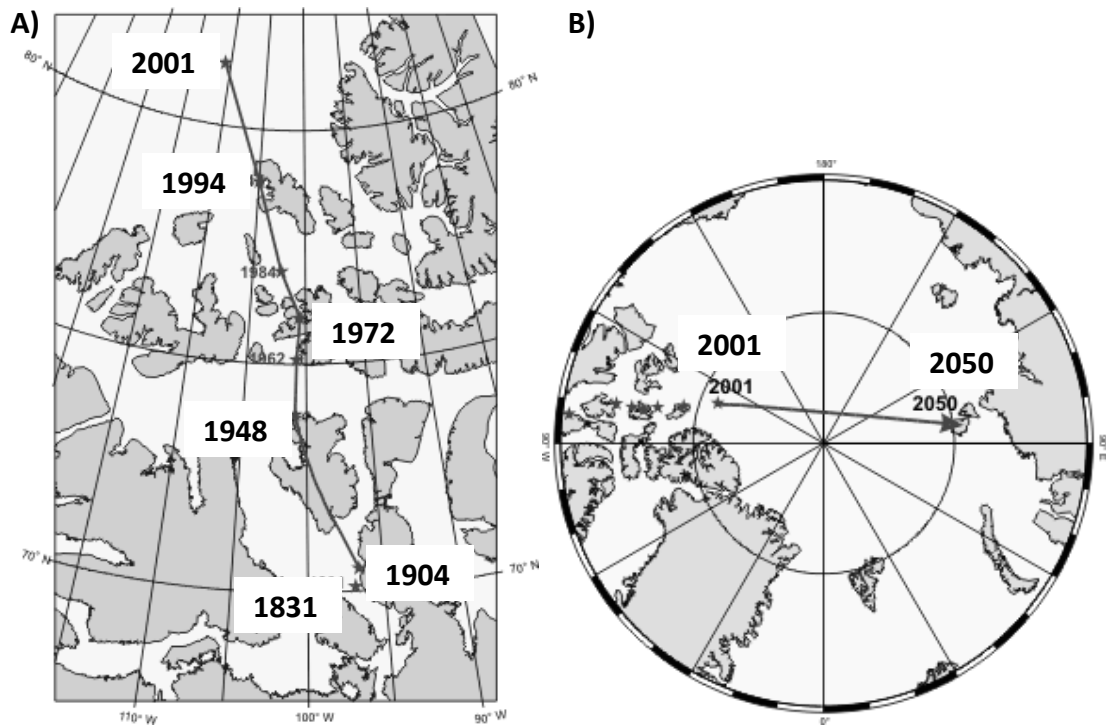


Figura 2.1- A) Desplazamiento del polo norte desde la zona norte de Canadá. Datos de 1831-2001. **B)** Pronósticos de desplazamiento del polo norte para el año 2050. Desplazamiento del norte de Canadá al norte de Rusia ²⁶.

En el presente trabajo se ha construido un año típico meteorológico y un día típico meteorológico para la ZMM utilizando los datos registrados por el SIMA del 1 de enero de 2007 al 31 de diciembre de 2010. Las variables meteorológicas analizadas fueron: radiación solar, temperatura, y humedad relativa. Igualmente se ubicó el sur geográfico con respecto al sur magnético por métodos experimentales para esta zona en el año 2011. Los resultados de estos análisis fueron de ayuda para el diseño del sistema termo-solar, así como para poder pronosticar su desempeño durante todo el año.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Metodología para el ATM y DTM

Las observaciones meteorológicas fueron realizadas por el SIMA. Estas fueron realizadas a través de 2 estaciones de monitoreo. La primera estación está ubicada al sureste de la zona en el municipio de Guadalupe en las coordenadas 25°40'06'' norte, 100°14'54'' oeste y a una altura de 490 m. sobre el nivel del mar. La segunda estación está en las coordenadas 25°40'32'' norte, 100°20'18'' oeste a una altura de 556 m. sobre el nivel del mar en el municipio de Monterrey²⁷. Ambas estaciones poseen los mismos sensores instalados. La Tabla 2.3 presenta una lista de los sensores utilizados. El presente estudio fue realizado con las observaciones registradas cada hora empezando el 1 de enero de 2007 hasta el 31 de diciembre de 2010. SIMA posee 6 estaciones meteorológicas más, sin embargo estas no serán utilizadas en el presente trabajo debido a que comenzaron a operar en el año 2010 y actualmente no se tiene suficiente información recolectada.

Tabla 2.3

Sensores utilizados para la colección de información meteorológica durante los años 2007, 2008, 2009, y 2010.

Variable	Marca	Modelo
Temperatura	MetOne	083-1
Humedad Relativa	MetOne	083-2
Insolación	MetOne	95

Se comenzó por concentrar la información proporcionada por el SIMA en una sola base de datos maestra donde se incluía la información de los 4 años en unidades acordes al Sistema internacional. Esta base de datos está en un

archivo de Microsoft Excel tipo .xls, y contiene 5 series de datos: día de registro, hora de registro, radiación solar (kW/m^2), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%). Se establecieron límites empíricos para validar la información (Ecuaciones 2.1-2.3). Bilbao *et al.*, (2003)¹ utilizaron un criterio similar para su análisis sobre la región del Mediterráneo.

$$\text{Insolación (kW/m}^2\text{)} \quad I > 0 \quad (2.1)$$

$$\text{Temperatura (}^{\circ}\text{C)} \quad -10 < T < 50 \quad (2.2)$$

$$\text{Humedad Relativa (\%)} \quad 0 < \text{HR} < 100 \quad (2.3)$$

Se procedió calculando un valor promedio entre los registros isocrónicos de las dos estaciones con la finalidad de obtener un valor representativo para la zona geográfica. En caso de que hubiera la ausencia de un dato en una estación, se tomó el valor registrado por la otra estación. Durante el 2007 al 2010 siempre se tuvo como mínimo una estación funcionando. Posteriormente se procedió a construir el ATM y el DTM utilizando las Ecuaciones 2.4-2.19 reportadas en la Tabla 2.4. Esta es una metodología similar a la utilizada por Islam *et al.*, (2010)⁸ para la región de Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos. Estos parámetros típicos fueron comparados con los datos registrados y se computó el porcentaje de datos dentro de los límites propuestos. Sin embargo, para poder realizar el análisis de confiabilidad para la insolación se debió tratar esta variable de manera distinta. La ZMM es una región que cada 24 horas pasa por el día y la noche, por lo tanto el valor mínimo registrado diariamente es 0 W/m^2 . Por esta razón el promedio aritmético de la insolación es poco útil para poder describir este fenómeno. Se decidió trabajar con la energía solar recibida, las horas con luz solar, y las desviaciones estándar para definir límites inferiores

y superiores. Morrison y Litvak, (1999)⁴ utilizaron las mismas variables para describir el año típico solar de Australia. Los límites superiores e inferiores se definieron como 1.2816 veces la desviación estándar, lo cual representa el 80% de las observaciones en una distribución normal. A los valores típicos anuales de temperatura y radiación solar se les conocen igualmente como año típico solar y año típico térmico.

El DTM propuesto en el presente trabajo incluye las siguientes variables: temperatura, radiación solar y humedad relativa. Estas variables fueron calculadas y graficadas (Ecuaciones 2.13-2.19). Además se incluyó el acumulado de la energía solar recibida. Como resultado se tuvo una descripción de la evolución de estas variables meteorológicas durante las 24 horas del día.

Tabla 2.4
Ecuaciones utilizadas para construir un ATM y DTM.

Variables para ATM	Ecuaciones
<i>Temperatura</i>	
Promedio mensual de temperatura	$\bar{T}^m = \frac{\sum_j \bar{T}_j^d}{n^d} \quad (2.4)$
Promedio mensual de temperatura máxima	$\bar{T}_{\max}^m = \frac{\sum_j T_{\max,j}^d}{n^d} \quad (2.5)$
Promedio mensual de temperatura mínima	$\bar{T}_{\min}^m = \frac{\sum_j T_{\min,j}^d}{n^d} \quad (2.6)$
<i>Humedad relativa</i>	
Promedio mensual de humedad relativa	$\overline{HR}^m = \frac{\sum_j \overline{HR}_j^d}{n^d} \quad (2.7)$
Promedio mensual de humedad relativa máxima	$\overline{HR}_{\max}^m = \frac{\sum_j HR_{\max,j}^d}{n^d} \quad (2.8)$
Promedio mensual de humedad relativa mínima	$\overline{HR}_{\min}^m = \frac{\sum_j HR_{\min,j}^d}{n^d} \quad (2.9)$
<i>Radiación solar</i>	

Promedio mensual de insolación máxima	$\bar{I}_{\max}^m = \frac{\sum_j I_{\max,j}^d}{n^d} \quad (2.10)$
Promedio mensual de energía solar recibida	$\overline{SQ}^m = \frac{\sum_j SQ_j^d}{n^d} \quad (2.11)$
Promedio mensual de horas con luz solar	$\overline{LS}^m = \frac{\sum_j LS_j^d}{n^d} \quad (2.12)$

Variables para DTM	Ecuaciones
Temperatura	
Promedio horario de temperatura	$\bar{T}^d = \frac{\sum_i T_i^h}{n^h} \quad (2.13)$
Humedad relativa	
Promedio horario de humedad relativa	$\overline{HR}^d = \frac{\sum_i HR_i^h}{n^h} \quad (2.14)$
Radiación solar	
Insolación horaria	$\bar{I}^d = \frac{\sum_i I_i^h}{n^h} \quad (2.15)$
Máxima insolación horaria	$I_{\max}^h = \bar{I}^h + DesEs(I^h) * 2.576 \quad (2.16)$
Mínima insolación Horaria	$I_{\min}^h = \bar{I}^h - DesEs(I^h) * 2.576 \quad (2.17)$
Energía solar recibida	$SQ^d = \sum_i I_i^h \quad (2.18)$
Horas con luz solar	$LS^d = contar[I^h > 0] \quad (2.19)$

2.2.2 Método para la determinación del sur geográfico

Para la correcta ubicación del sur magnético se ha seguido el procedimiento propuesto por Sánchez, (2008)⁷ en el que se utiliza el sol como indicador principal. Este método consiste en colocar una varrilla de manera vertical a nivel de piso a la que se nombra como Gnomon. El Gnomon proyecta una sombra, la cual debe ser registrada 2 horas antes del medio día trazando una línea en el piso. Posteriormente se traza un círculo con el centro en el Gnomon con un radio igual a la longitud de la Sombra A. En el momento el que

la sombra vuelva a tocar la circunferencia del círculo después del medio día, se traza la línea correspondiente a la Sombra B. Se unen las puntas de la Sombra A con la de la Sombra B por medio de una línea recta. Por último se traza una línea desde el centro del círculo y que cruce por la mitad de la línea que una las dos sombras registradas. Esta última línea estará indicando la dirección del norte geográfico (Figura 2.2). Con la información obtenida de esta información se puede alinear un concentrador solar hacia el sur geográfico y disminuir así las pérdidas por enfoque⁷.

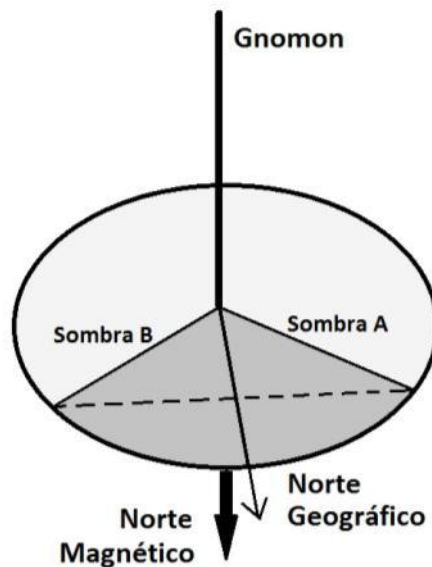


Figura 2.2 - Gnomon con trazo de líneas para la determinación de los polos geográficos.

2.3 Resultados

2.3.1 Año típico meteorológico

El Año típico térmico se calculó y con esta información se construyó la Figura 2.3. El presente modelo cuenta con temperatura promedio, máxima y mínima para cada mes del año. Junio fue el mes más caluroso del año, mientras que enero fue el más frío.

El año típico térmico se puede dividir en 3 diferentes periodos del año. La primera etapa es de enero a mayo y tiene un incremento mensual promedio de 3.239 °C. Durante los meses de mayo a agosto la temperatura promedio se estabiliza a los 27.301 °C con un rango en el subgrupo de 0.829 °C y una desviación estándar de 0.385 °C. La última etapa toma lugar de agosto a diciembre donde la temperatura disminuye en promedio 3.005 °C/mes.

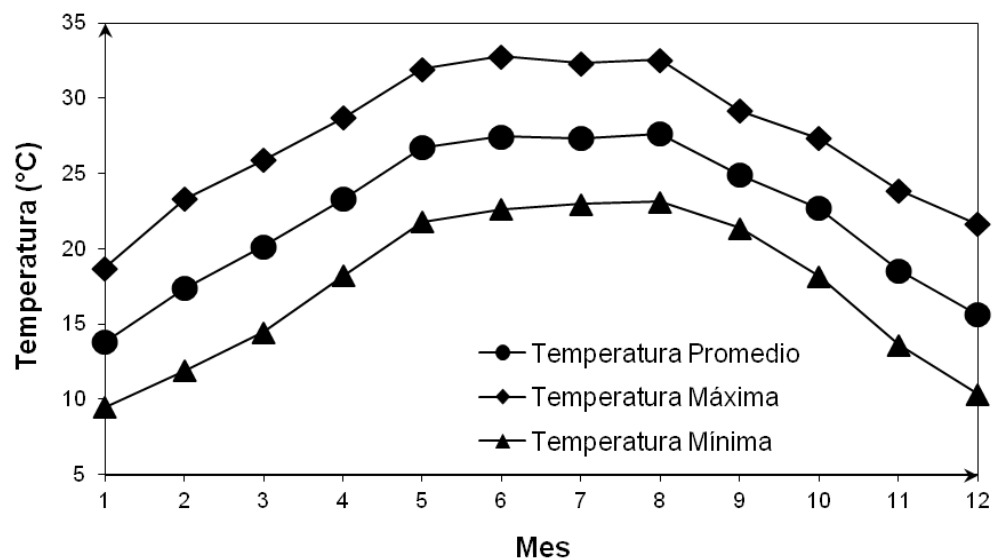


Figura 2.3 - Año típico térmico para el área metropolitana de la ciudad de monterrey. Temperatura promedio, mínima y máxima. Gráfico con información del periodo del 2007 al 2010.

Ferrante *et al.*, (2008)¹⁵, Islam *et al.*, (2010)⁸ y Muzathik *et al.*, (2010)¹⁶ han publicado datos de temperaturas típicas para las regiones de Palermo, Italia; Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos; y Ubon Ratchathani, Malasia respectivamente. Estos modelos muestran una tendencia similar a los datos en el presente trabajo. Sin embargo, Anderson *et al.* (2007) presenta un año típico térmico para Hamilton, Nueva Zelanda con una tendencia opuesta a la ciudad de Monterrey¹². Esta diferencia es debido a que las estaciones del año están

invertidas en el hemisferio sur y con respecto a las del hemisferio norte. Los valores reportados en estos análisis están mostrados en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5

Años típicos térmicos publicados para diferentes regiones del mundo. Temperatura reportada en °C.

Mes\Región	Monterrey, México	Abu Dhabi, E.A.U. ⁸	Ubon Ratchathani, Malasia ¹⁶	Palermo, Italia ¹⁵	Hamilton, Nueva Zelanda ¹²
Enero	13.8	20.0	24.0	11.0	18.0
Febrero	17.4	22.0	27.0	12.0	17.0
Marzo	20.2	25.5	29.0	13.0	18.0
Abril	23.3	31.1	31.0	14.5	12.0
Mayo	26.8	35.0	28.0	18.0	11.5
Junio	27.5	36.1	27.5	23.0	11.0
Julio	27.3	36.2	27.0	25.0	9.0
Agosto	27.7	35.5	27.0	25.5	9.5
Septiembre	24.9	34.8	26.0	23.0	11.0
Octubre	22.7	32.0	26.0	20.0	13.0
Noviembre	18.6	27.5	25.5	16.5	13.5
Diciembre	15.6	21.1	24.0	13.0	17.0

La Figura 2.4 muestra un año típico solar para la zona metropolitana de Monterrey. Los parámetros graficados fueron: promedio de energía solar recibida, máximo promedio, y mínimo promedio. Igual que en el año típico térmico, este se puede dividir en tres zonas. La primera etapa abarca de enero a mayo donde la energía solar recibida aumenta con una tendencia casi lineal de $0.7405 \text{ (kWh/m}^2\text{d)(mes}^{-1}\text{)}$. La segunda etapa es de mayo a agosto donde se encuentra un lapso de estabilidad en promedio a los $8.286 \text{ kWh/m}^2\text{d}$, con un rango entre los promedios de los meses de $0.8294 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ y una desviación estándar de estos promedios de $0.3639 \text{ kWh/m}^2\text{d}$. La tercera etapa comprende de agosto a diciembre donde el promedio mensual disminuye con una velocidad promedio de -0.7334 °C/mes . Igualmente se puede observar que el valor absoluto de la velocidad de cambio en la primera y tercera etapa son casi

idénticos con una variación de 0.95%. Por lo tanto se puede decir que la energía solar recibida en la ciudad comienza a aumentar desde enero hasta mayo, donde se estabiliza y después en agosto comienza a disminuir a la misma velocidad que había aumentado hasta completar el ciclo.

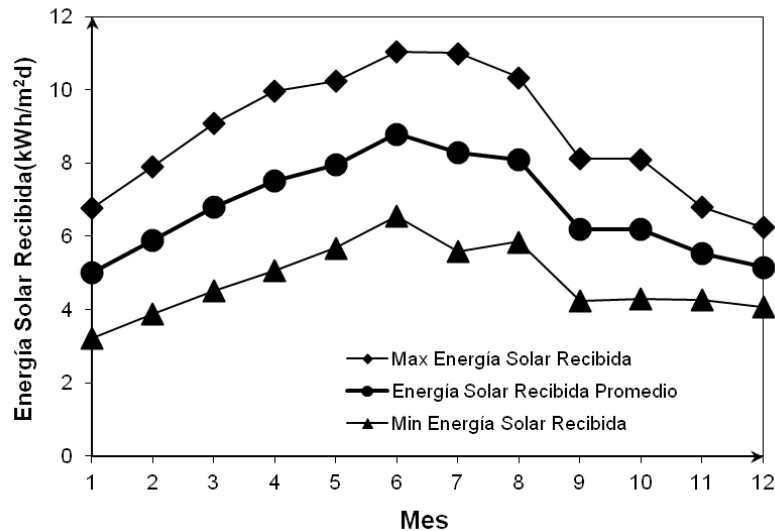


Figura 2.4 - Año típico solar para la zona metropolitana de Monterrey. Promedio mensual, mínimo y máximo de la energía solar recibida. El gráfico fue construido con información de los años 2007 al 2010.

Se graficó una comparación de la energía solar recibida contra el promedio de insolación máximo (Figura 2.5). Ambos registros muestran una tendencia similar. Esta estrecha semejanza en su tendencia sugiere que el factor dominante que afecta la energía solar recibida es la insolación y no las horas con luz solar. Esto aplica exclusivamente para el área metropolitana de Monterrey debido a los rangos y magnitudes que presentan ambos factores a través del año. Sin embargo, puede presentarse una distinta relación en otras zonas del mundo donde las horas de luz solar posean un rango más amplio.

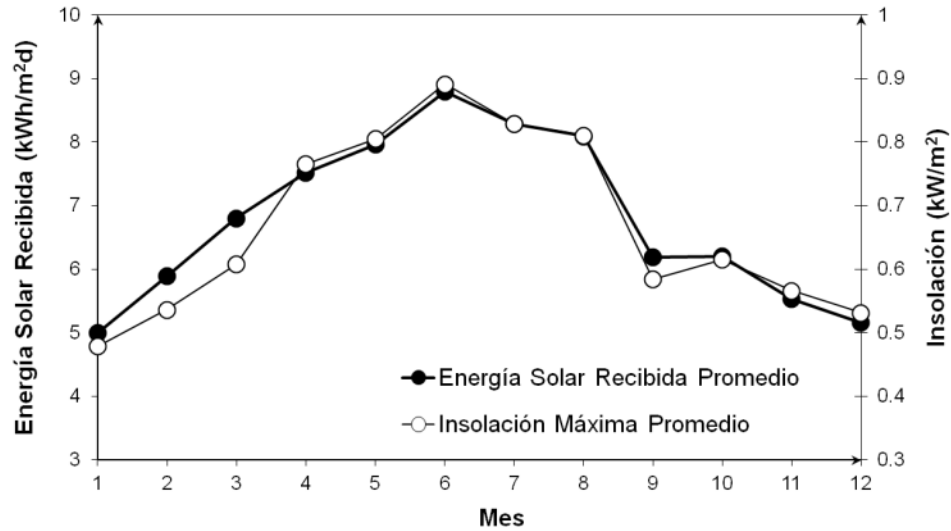


Figura 2.5 - Promedio de la energía solar recibida e insolación máxima promedio de la zona metropolitana de Monterrey. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.

Durante el mes de septiembre ocurre un descenso abrupto en la insolación máxima promedio. Esto se debe a que septiembre es el mes que presenta mayor humedad relativa de todo el año, lo cual sugiere un aumento considerable de nubes en la zona. De acuerdo con Ahrens, (2011)²⁸, una gran parte de la radiación solar directa es difractada y absorbida por las nubes, disminuyendo así la cantidad de energía solar recibida a nivel de piso. En promedio, Monterrey recibe anualmente 2455 kWh/m²a de energía solar, lo cual puede ser comparado con Múnich, Alemania que recibe 1350 kWh/m²a y Madrid, España con 1950 kWh/m²a²⁶.

La Tabla 2.6 presenta los valores de años típicos solares publicados para otras regiones del mundo. El año típico solar de la zona metropolitana de Monterrey comparte una tendencia similar a las ciudades ubicadas en el hemisferio norte del globo terráqueo, como: Denizli, Turquía⁹ y Palermo, Italia¹⁵. Islam *et al.*, (2010) presenta un año típico solar para Abu Dhabi, E.A.U. con una

tendencia distinta a la de una gaussiana por poseer 3 zonas de aumento y 3 de descenso a lo largo del año, lo cual diverge con lo reportado por la mayoría de las ciudades ubicadas en el hemisferio norte del globo⁸. Esto podría ser debido a factores locales como alta nubosidad, neblina y/o altos niveles de contaminación. Ubon Ratchathani, Malasia presenta magnitudes estables a lo largo del año por su proximidad al ecuador¹⁶. Por último, Morrison y Litvak (1999) reportaron un año típico solar para Sídney, Australia con una tendencia opuesta a la de Monterrey por estar ubicados en el hemisferio sur⁴. El área metropolitana de Monterrey muestra de manera global la mayor energía solar recibida de entre las 5 ciudades presentadas en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6

Años típicos solares publicados para distintas regiones del mundo. Energía solar recibida reportada en kW/m²d.

Mes\Región	Monterrey, México	Abu Dhabi, E.A.U. ⁸	Denizli, Turquía ⁹	Ubon Ratchathani, Malasia ¹⁶	Palermo, Italia ¹⁵	Sídney, Australia ⁴
Enero	5.0	5.16	1.69	5.00	2.22	6.25
Febrero	5.9	4.95	2.51	4.86	2.78	5.67
Marzo	6.8	5.56	3.21	5.42	4.17	4.81
Abril	7.5	5.89	4.30	5.83	5.83	3.78
Mayo	8.0	5.92	5.04	5.56	6.94	2.75
Junio	8.8	4.77	5.81	4.72	7.50	2.42
Julio	8.3	4.25	5.74	4.58	7.78	2.97
Agosto	8.1	3.63	4.99	4.44	7.22	3.61
Septiembre	6.2	5.74	4.23	4.17	5.83	4.69
Octubre	6.2	5.69	2.93	4.72	4.44	5.53
Noviembre	5.5	5.31	1.83	5.00	2.78	6.25
Diciembre	5.2	4.07	1.39	4.72	2.22	6.94

Los valores típicos para la humedad relativa de la zona metropolitana de Monterrey están graficados en la Figura 2.6. Los parámetros estudiados fueron la humedad relativa promedio, máximo promedio y mínimo promedio. septiembre es el mes más húmedo del año, mientras que marzo es el más

seco. La Tabla 2.7 muestra los datos de la humedad relativa típica para: Abu Dhabi, E.A.U.; Ubon Ratchathani, Malasia; y Hamilton, Nueva Zelanda.

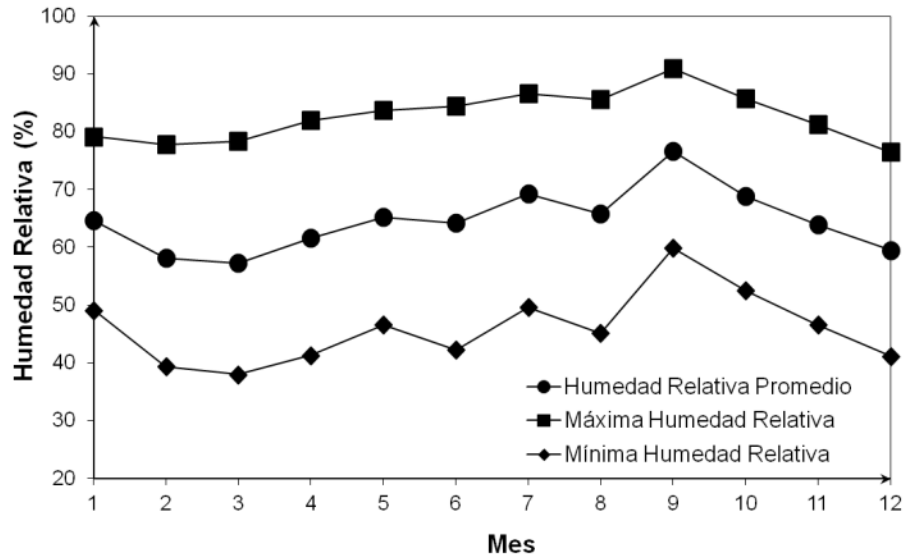


Figura 2.6 – Datos típicos de humedad relativa para la zona metropolitana de Monterrey. Promedio mensual, mínimo y máximo de humedad relativa. El gráfico fue construido con información de los años 2007 al 2010.

Tabla 2.7

Humedad relativa típica para distintas regiones del mundo. Humedad relativa reportada en porcentaje.

Mes\Región	Monterrey, México	Abu Dhabi, E.A.U. ⁸	Ubon Ratchathani, Malasia ¹⁶	Hamilton, Nueva Zelanda ¹²
Enero	65	46	65	83
Febrero	58	46	64	80
Marzo	57	30	60	90
Abril	62	18	70	92
Mayo	65	18	75	96
Junio	64	27	78	98
Julio	69	40	80	90
Agosto	66	43	80	94
Septiembre	77	38.85	82	88
Octubre	69	40.8	76	85
Noviembre	64	42.4	71	84
Diciembre	59	48.3	63	85

La Figura 2.7 muestra el promedio, máximo y mínimo de las horas con luz solar. Los valores registrados del 2007 al 2010 muestran una desviación estándar de 0.6753 horas. El límite superior e inferior de esta variable fue

calculado multiplicando 2.576 por la desviación estándar y agregando este valor al promedio (para el máximo) o substrayéndolo (para el mínimo). Este rango da un intervalo de confianza del 99% de la desviación estándar.

El mes con el promedio máximo es junio con un valor de 14.3 horas de luz solar, mientras que diciembre tiene la menor cantidad de horas con luz solar con 12.0 horas en promedio. De abril a septiembre se muestra una zona con alta estabilidad en esta variable con un valor promedio de 14.07 horas, una desviación estándar entre el promedio de los meses de 0.2265 horas y un rango de 0.6167 horas. Típicamente, la zona metropolitana de Monterrey recibe anualmente 4,838 horas de luz solar.

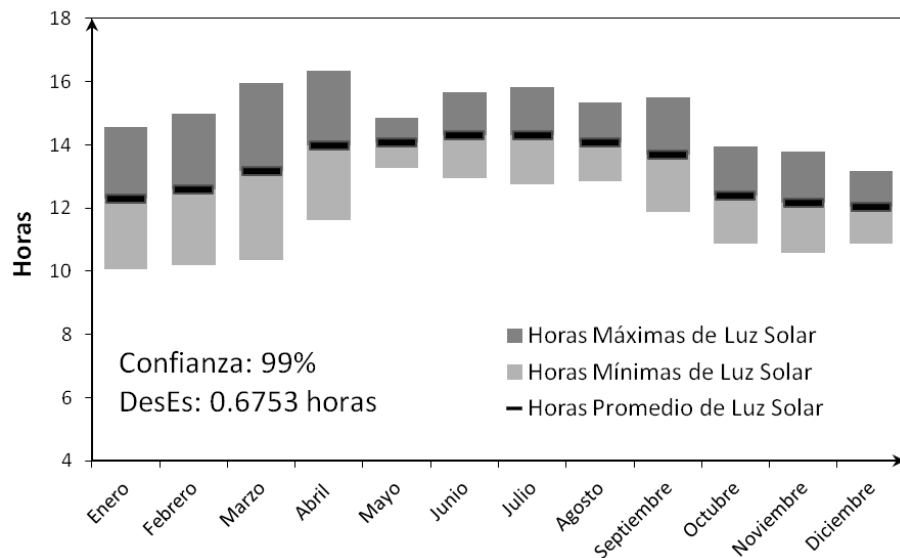


Figura 2.7 - Horas típicas con luz solar para la zona metropolitana de Monterrey. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.

La Figura 2.8 presenta el historial de los valores promedios diarios de la temperatura para los años 2007 a 2010. Las temperaturas más altas fueron encontradas en verano entre los meses de mayo hasta agosto. Por otro lado, las temperaturas más bajas se registraron en el invierno abarcando de

noviembre a mayo. La temperatura promedio más alta registrada durante este periodo fue el 23 de mayo de 2008 con 33.6 °C, mientras que la mínima se registró el 23 de enero de 2007 con 1.6 °C. Historiales similares a este fueron publicados por Islam *et al.*, (2010)⁸ para Abu Dhabi, E.A.U. y Bulut, (2004)² para Anatolia, Turquía.

Con la finalidad de validar el año típico meteorológico propuesto, se han comparado los parámetros típicos con los registros de las observaciones. Esta comparación fue graficada en las Figuras 2.9, 2.11, 2.13. Para construir estas figuras: el valor promedio mensual se ha definido como el 0 en eje de las ordenadas, el valor máximo promedio se consideró el límite superior y el valor mínimo promedio se consideró el límite inferior.

La Figura 2.9 compara las temperaturas típicas propuestas por el presente trabajo contra el registro histórico. La temperatura promedio diaria tiene una desviación estándar de 3.257 °C y el 86.03% de los datos están dentro del modelo. La Figura 2.9 revela 4 ciclos en donde se pueden observar las estaciones del año.

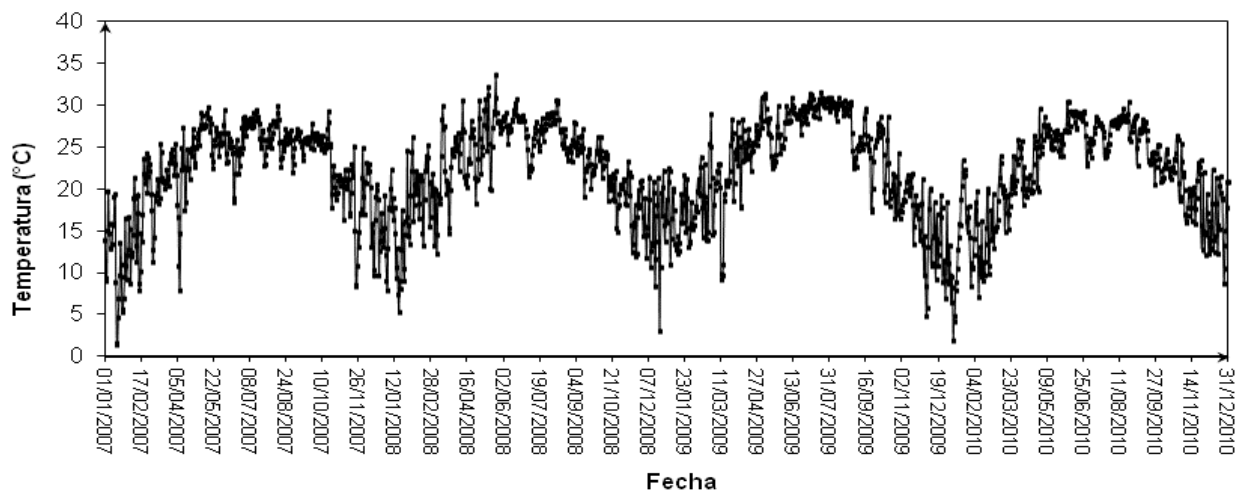


Figura 2.8 - Temperatura promedio diaria del 1 de enero de 2007 al 31 de diciembre de 2010.

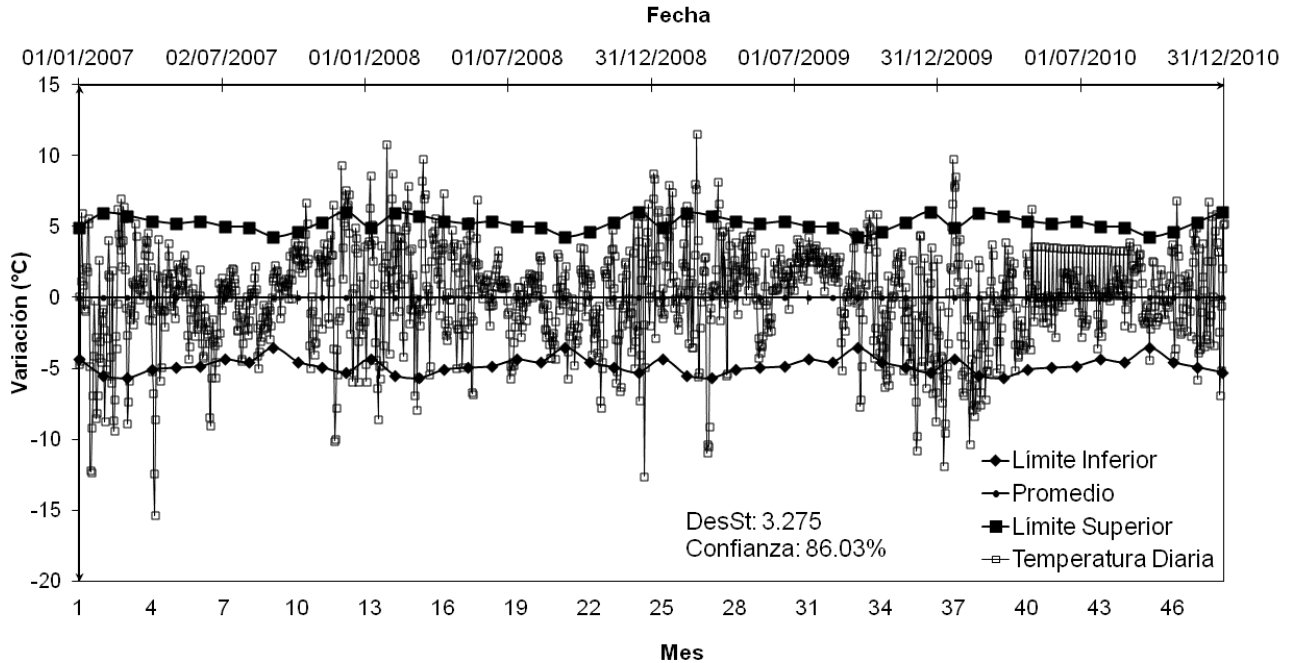


Figura 2.9 - Comparación del año típico térmico con los registros históricos de temperatura. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.

El registro de la energía solar promedio recibida está presentado en la Figura 2.10. La energía solar recibida más alta registrada fue de 11.99 kWh/m²d el 18 de Junio de 2010. La Figura 2.11 muestra una comparación de los datos típicos propuestos por el presente trabajo y los registros meteorológicos. El 80% de los registros se encontraron dentro de los límites propuestos y se encontró una desviación estándar de 1.5734 kWh/m²d. El rango de los registros es más estrecho durante el invierno, comparado con las otras estaciones del año. Esto implica que los registros están más próximos al valor típico y por lo tanto este modelo es más preciso durante el invierno.

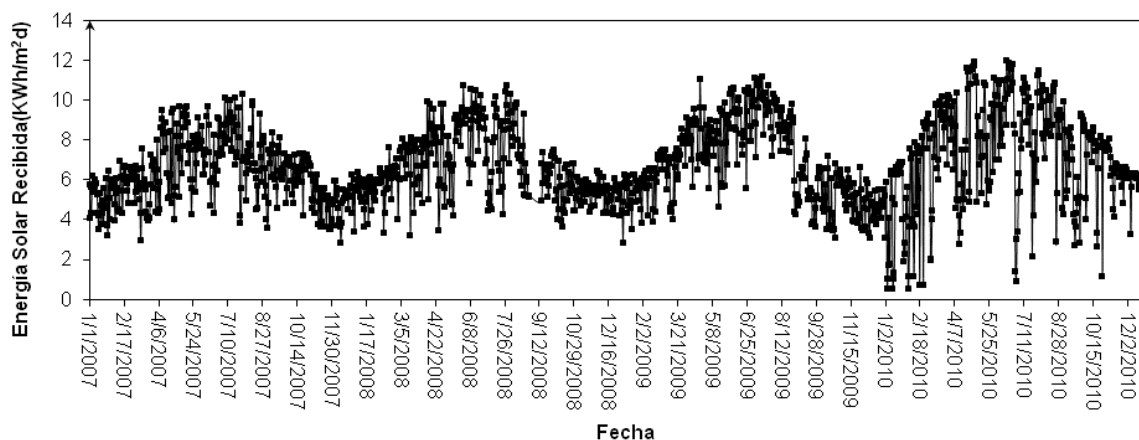


Figura 2.10 - Energía solar recibida del 1 de enero de 2007 al 31 de diciembre de 2010.

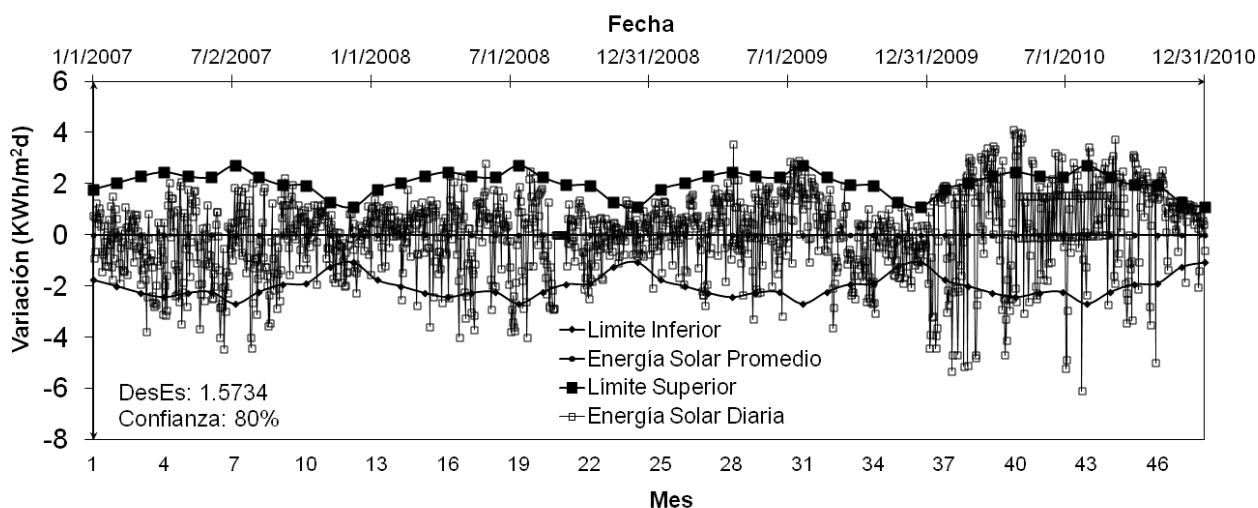


Figura 2.11 - Comparación del año típico solar con los registros históricos de energía solar recibida. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.

El los niveles de humedad relativa a través de los años 2007 al 2010 están graficados en la Figura 2.12. El 1 de julio fue el día que alcanzó la mayor humedad relativa con un 97.896% y el 15 de marzo fue el día más seco con un 7.542 %. La Figura 2.13 muestra la comparación de las observaciones diarias contra los datos típicos. Los registros tienen una desviación estándar de 15.175% y el 75.36% de los datos registrados están dentro del modelo. En el año de 2010, el periodo de mayo hasta septiembre presenta una humedad

relativa por encima del valor medio. Esto pudo haber sido ocasionado por las lluvias propiciadas por el huracán Alex. El huracán Alex fue el primer huracán tropical de la temporada del 2010. Se originó con una tormenta tropical en la zona del caribe y su paso sobre la península de Yucatán, México lo debilitó. Sin embargo, volvió a tomar fuerza durante su paso por el Golfo de México y finalmente tocó tierra en Tamaulipas, México causando grandes pérdidas económicas y humanas para los estados de Nuevo León, Tamaulipas, entre otros.

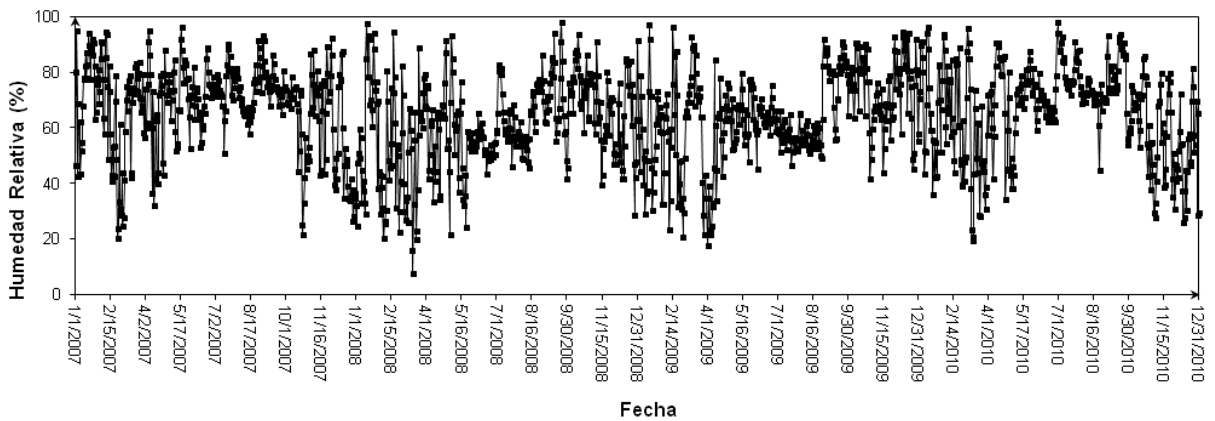


Figura 2.12 - Humedad relativa diaria del 1 de enero de 2007 al 31 de diciembre de 2010.

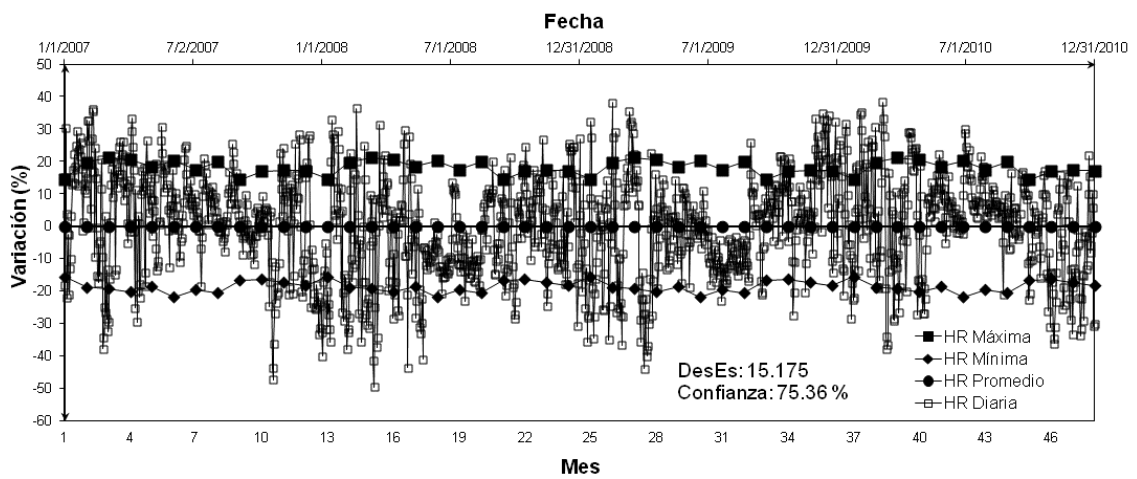


Figura 2.13 - Comparación de datos típicos de humedad relativa con los registros históricos de humedad relativa. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.

2.3.2 Día típico meteorológico

Durante este proyecto se ha construido un día típico meteorológico. Esto con la finalidad de conocer la evolución de las condiciones meteorológicas a través del día y poder seleccionar las mejores horas de experimentación. Las variables analizadas fueron: temperatura, humedad relativa, insolación y energía solar recibida.

La insolación típica para cada hora del día se encuentra graficado en la Figura 2.14, la cual está construida con información del 2007 al 2010. La insolación máxima ocurre típicamente a las 13.00 horas. El área metropolitana de Monterrey recibe diariamente 4.67 kWh/m²d. La desviación estandar que mostraron los datos fue de 0.0445 kW/m² y con esta se pudieron definir los límites inferiores y superiores para un 99% de confianza. Una figura similar fue reportada por Anatuña *et al.*, (2008) para Camagüey, Cuba¹⁸. La Tabla 2.8 presenta una comparación entre el día típico solar para Monterrey y para Camagüey.

La Figura 2.14 muestra dos picos simétricos a las 7.00 y 18.00 horas en la curva del límite superior y levemente apreciables en el valor promedio. Estos picos se encontraron de manera simétrica y se repiten en todos los promedios anuales realizados. Reda, (1998)²⁹ reporta que los piranómetros suelen reportar valores superiores a los reales cuando el ángulo de zenith se encuentra en un rango de entre 63° y 72°, es decir a unas horas después del amanecer o antes del crepúsculo.

Esta incertidumbre en la lectura de los piranómetros es una limitante de la tecnología actual que se tiene para medir esta variable.

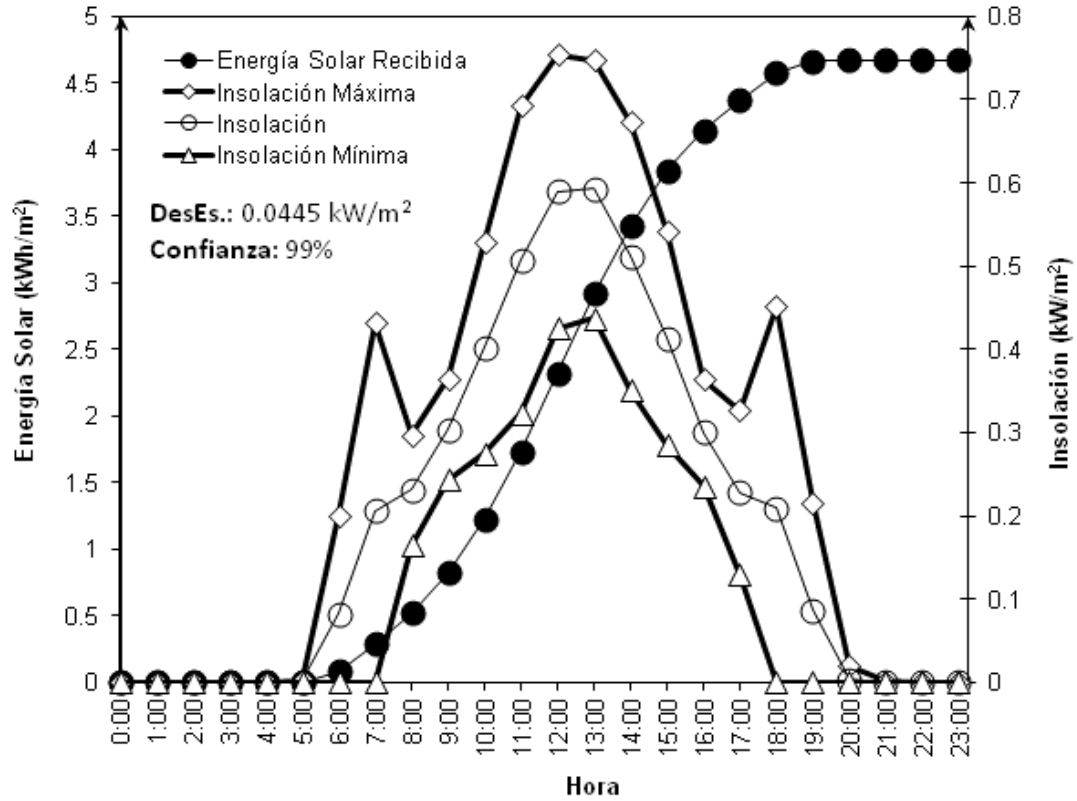


Figura 2.14 - Día típico solar para el área metropolitana de Monterrey. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.

Tabla 2.8

Comparación del Día Típico Solar para la zona metropolitana de Monterrey y Camagüey, Cuba. Insolación Reportada en W/m².

Hora\Región	Monterrey, México*	Camagüey, Cuba ¹⁸
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	1	0
6	82	0
7	206	90
8	231	280
9	304	500
10	402	650
11	508	750
12	590	820
13	593	830
14	512	700

15	413	520
16	300	300
17	228	100
18	209	0
19	87	0
20	4	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0

* Presente trabajo.

En la Figura 2.15 se reportan los valores típicos de temperatura y humedad relativa para cada hora del día. La hora más caliente del día son las 16.00 horas que al mismo tiempo es la hora más seca, mientras que la hora más fría y al mismo tiempo la más húmeda son las 6.00 horas. La temperatura y la humedad presentan una tendencia inversa la una de la otra lo cual muestra su estrecha interrelación.

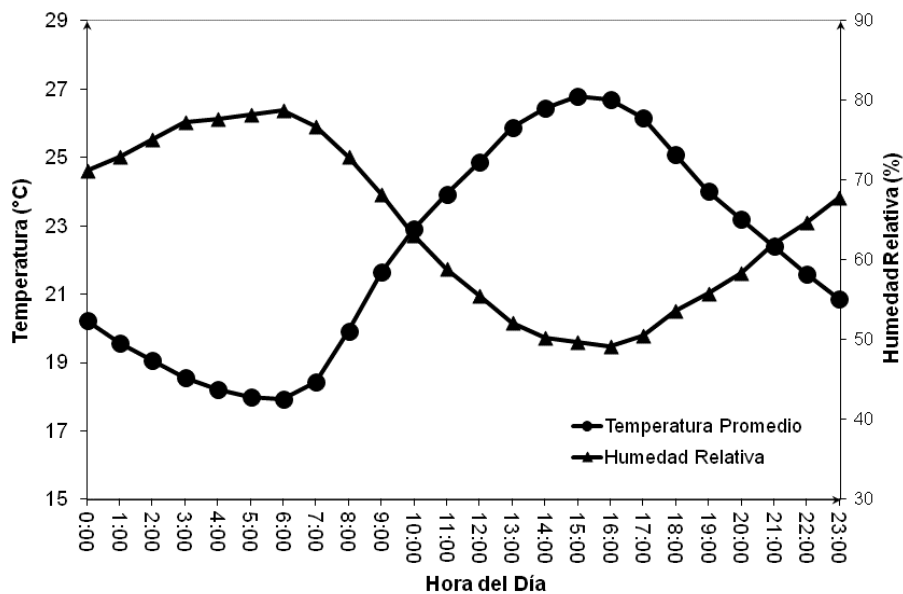


Figura 2.15 - Datos típicos de humedad relativa y temperatura por hora para la zona metropolitana de Monterrey. Gráfico construido con información de los años 2007 al 2010.

El DTM de la zona metropolitana de Monterrey revela que la mejor época para lograr una mayor irradiancia en el año es de mayo-agosto y preferentemente de 10.00-16.00 horas que es cuando la radiación solar es la más alta, la temperatura ambiental igualmente es elevada y la humedad relativa es favorable. En este caso donde se trabajará a la intemperie, la alta temperatura ambiental disminuirá las pérdidas de calor con el ambiente, y la humedad relativa baja disminuirá la difracción de la luz solar directa. Igualmente en caso de verse obligados a operar el reactor durante más tiempo, será preferible extender el periodo de experimentación por la tarde para operar en una temperatura ambiente mayor y una humedad relativa menor a lo registrado durante las mañanas.

2.3.3 Determinación del sur geográfico

Se utilizó un Gnomon de madera de 0.3 m. de longitud el cual se ubicó el 08 de Junio de 2011 a las 10.00 horas en el patio central del edificio CELAES de la Facultad de ciencias químicas de la U.A.N.L. Se procedió a registrar la sombra A, la cual tuvo una longitud de 0.31 m. de largo. Posteriormente se trazó el círculo con el mismo radio. La sombra B fue registrada a las 16.57 horas. Trazando la línea de unión entre ambas sombras y la línea indicativa del norte geográfico, se pudieron ubicar los puntos cardinales geográficos. Utilizando una brújula magnética de mano sumergida en alcohol y calibrada como zona 2, se pudo determinar que el sur geográfico se encontraba a $+2^\circ$ del sur magnético.

Este valor ayudó a determinar con rapidez la posición del concentrador solar durante la experimentación de pirólisis. Sin embargo, la diferencia de 2° entre el punto cardinal geográfico con el magnético, indica que se puede trabajar con cualquiera de los dos sin comprometer de manera considerable la eficiencia del concentrador.

2.4 Conclusiones

Se construyó un Año Típico Meteorológico y un Día Típico Solar con los datos meteorológicos del área metropolitana de Monterrey de los años 2001-2010. Igualmente se ubicó el Sur Geográfico para esta zona en el año 2011. Los resultados de estos análisis fueron el argumento para las siguientes conclusiones:

- 1) El área metropolitana de Monterrey recibe típicamente 2,454.49 kW/m²a de energía solar directa. Esta característica meteorológica convierte a esta región en una zona afín al uso de sistemas para el aprovechamiento de la energía solar con la finalidad de promover el desarrollo sustentable de la región.
- 2) Los altos niveles de humedad presentados típicamente en Septiembre, reducen la energía solar a nivel de piso debido a la difracción y la absorción de la radiación directa ocasionada por las nubes.
- 3) De acuerdo con el conteo de horas con luz solar, el suministro de energía solar en el área metropolitana de Monterrey permite que un sistema de energía solar pueda operar 4,838 h/a. Esto implica anualmente 604.75 turnos de trabajo de 8 h.

4) Las horas preferibles para realizar la experimentación con un sistema termo-solar son de 10.00-16.00 horas para así aprovechar las horas de mayor insolación del día. En caso de necesitar realizar un experimento con una duración mayor, será preferible extender el horario por la tarde para encontrarse en un ambiente con una temperatura más alta que por la mañana y tener menor probabilidad de encontrarse con nubosidad.

5) El Sur Geográfico se encuentra a +2° del Sur Magnético registrado en el 2011. Debido a que la diferencia entre ambos puntos es mínima, se puede utilizar cualquiera de los dos puntos de referencia para enfocar un concentrador solar y/o celda fotovoltaica instalada en el área metropolitana de Monterrey.

Una vez disponible la información y descripción del recurso energético solar, se procedió a diseñar, construir y probar el reactor y concentrador solar. Este tema será abordado en el Capítulo 3.

2.5 Referencias

- 1 Bilbao J., Miguel A., Franco J.A., Ayuso A. Test reference year generation and evaluation methods in the continental Mediterranean area. *Journal of Applied Meteorology*. 43: 390-400 (2003).
- 2 Bulut H. Typical solar radiation year for southeastern Anatolia. *Renewable Energy*. 29: 1477-1488 (2004).
- 3 Modica G.D., Lowes S., Nehrkorn T., Wensell J., Baldwin J., McMullin G., Hoffman R. Typical day meteorological data in support of ARD modeling. 20th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Science (2010).
- 4 Morrison G.L., Litvak A. Condensed solar radiation data base for Australia. Solar Thermal Energy Laboratory. University of New South Wales. Sydney, p. 2-4 (1999).
- 5 Janjai S., Deeyai P. Comparison of methods for generating typical meteorological year using meteorological data from a tropical environment. *Applied Energy*. 86: 528-537 (2009).
- 6 Bilbao J., Miguel A.H. Air temperature model evaluation in the north Mediterranean belt area. *Journal of Applied Meteorology*. 41: 872-884 (2002).
- 7 Sánchez M.A. Energía Solar Térmica. LIMUSA, Ed. 1, México, p. 229 (2008).
- 8 Islam M.D., Alili A.A., Kubo I., Ohadi M. Measurement of solar-energy (direct beam radiation) in Abu Dhabi, UAE. *Renewable Energy*. 35: 515-519 (2010).
- 9 Bulut H. Generation of representative solar radiation data for Aegean region of Turkey. *International Journal of the Physical Science*. 5(7): 1124-1131 (2010).

- 10 Dissing D., Wendler G. Solar radiation climatology of Alaska. *Theoretical and Applied Climatology*. 61: 161-175 (1998).
- 11 Walsh J.E., Chapman W.L. Artic cloud-radiation-temperatures associations in observational data and atmospheric reanalyses. *Journal of Climate*. 11: 3030-3045 (1998).
- 12 Anderson T.N., Duke M., Carson J.K. A typical meteorological year for energy simulations in Hamilton, New Zeland. *IPENZ engineering trenz*, 003 (2007).
- 13 Bulut, H. Generation of typical solar radiation data for Istanbul, Turkey. *International Journal of Energy Research*. 27: 847-855 (2003).
- 14 Fast J.D., Foy B., Rosas F.A., Caetano E., Carmichael G., Emmons L., McKenna D., Mena M., Skamarock W., Tie X., Coulter R.L., Barnard J.C., Wiedinmyer C., Madronich S. A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 7: 2233-2257 (2007).
- 15 Ferrante P., La Gennusa M., Nicolosi S., Scaccianoce G., Sorrentino G. Comparison of methodologies for test reference year (TRY) generation for Mediterranean sites. 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. (2008).
- 16 Muzathik A.M., Nik W.M.N.B.W., Samo K.B., Ibrahim M.Z. Reference solar radiation year and some climatology aspects of east coast of west Malaysia. *American Journal of Engineering and Applied Science*. 3(2): 293-299 (2010).
- 17 Florides G., Kalogirou S., Theophilou K., Evangelou E. Analysis of the Typical Meteorological Year (TMY) of Cyprus and House Load Simulation. 8th International IBPSA Conference, Eindhoven. 339-346 (2003).
- 18 Anatuña J.C., Fonte A., Estevan R., Barja B., Acea R., Anatuña J.C.J. Solar radiation data rescue at Camagüey, Cuba. *American Meteorological Society*. 1507-1511 (2008).
- 19 Ransome S., Funtan P. Why hourly averaged measurement data is insufficient to model PV system performance accurately. 20th European PVSEC, Barcelona. (2005).
- 20 Qingyuan Z., Huang J., Siwei L. Proc. 4th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings. 1211-1218 (2001).
- 21 Barrios, R., González V., Raúl A., Cruzado A., Luz G., Barajas D.I., Villagómez R.G. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del área metropolitana de Monterrey 2008-2012. SEMARNAT. Monterrey, p. 38-42 (2008).
- 22 INEGI. Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos, INEGI, Monterrey, p. 51 (2010).
- 23 INEGI. Perspectiva Estadística de Nuevo León 2011, INEGI, Monterrey, p. 13-23 (2011).
- 24 NASA. Earth inconstant magnetic field. National Aeronautic and Space Administration. (2003) <science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/29dec_magneticfield/> Fecha de acceso: 23 de Diciembre de 2011.
- 25 Vastag B. North magnetic pole is shifting rapidly towards Russia. National Geographic (2005) <http://news.nationalgeographic.com/news/2005/12/1215_051215_north_pole.html> Fecha de acceso: 23 de Diciembre de 2011.
- 26 NRCAN. Geomagnetism. Long Term Movement of the North Magnetic Pole. Natural Resources Canada. (2005) <gcs.nrcan.gc.ca/geomag/nmp/long_mvt_nmp_e.php> Fecha de acceso: 16 de Octubre de 2011.
- 27 SIMA. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental. Gobierno de Nuevo León. <http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima> Fecha de acceso: 07 de Octubre de 2011
- 28 Ahrens C.D. Energy that drives the storms. Extreme weather and climate. Warren Faidley, Ed. 1, USA, p. 36-56 (2011).
- 29 Sári M., Huld T.A., Dunlop E.D., Cebecauer T. Photovoltaic solar electricity potential in European countries. European Commission Institute for Environment and Sustainability, p.1 (2006).
- 30 Reda I. Improving the accuracy of using pyranometers to measure the clear sky global solar irradiance. NREL. USA, p. 1-4 (1998).

CAPÍTULO 3

3. REACTOR QUÍMICO SOLAR: DISEÑO Y DESEMPEÑO TÉRMICO

3.1 Introducción

Se ha diseñado, modelado y construido un reactor químico solar el cual tiene la capacidad de llevar a cabo procesos basados en reacciones químicas endotérmicas como: pirólisis, gasificación, combustión, cocción, etc. El objetivo principal fue diseñar, construir, y analizar el desempeño del equipo para llevar a cabo una pirólisis solar de tercera generación a escala banco en las instalaciones de la Facultad de ciencias químicas de la U.A.N.L.

Este equipo será diseñado para poder ser utilizado en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León por un periodo de por lo menos 20 años.

Un sistema pirolítico presenta distintos requerimientos específicos para poder descomponer cada tipo de biomasa. En el presente proyecto se ha cumplido con los requerimientos de la pirólisis de cáscara de naranja, sin embargo aunque esto no descarta el posible uso de otro tipo de biomasa, sí se recomienda realizar una evaluación del sistema antes de cambiar de materia prima. Miranda *et al.* (2009) reportó que durante la pirólisis de naranja se logra

descomponer el 60% peso de la biomasa cuando esta se logra calentar en ausencia de oxígeno hasta una temperatura de 366 °C. Igualmente, se reporta la necesidad de operar en una atmósfera de gas inerte, en este caso Helio; y por último se requiere un tren de enfriamiento de los gases a temperaturas criogénicas con la finalidad de condensar los productos¹.

Por otro lado, el uso de un concentrador solar presenta otra serie de requerimientos que se deben considerar durante el diseño. El primero es la capacidad de operar en la intemperie. Esto implica utilizar materiales con una resistencia considerable contra la corrosión, permanecer durante largo tiempo en temperaturas ambiente de hasta 40 °C, poder ser móvil para reenfocarse con respecto al movimiento del disco solar por el firmamento, y por último poder desplazarse para resguardarlo durante el tiempo que no esté en operación.

3.2 Diseño y construcción

3.2.1 Diseño de reactor químico solar

El reactor químico solar consta de 4 series de componentes principales: concentrador solar, reactor químico, soporte estructural del concentrador y sistema de monitoreo.

3.2.1.1 Concentrador solar

El concentrador solar es una superficie reflejante la cual cumple la función de enfocar la radiación solar de un área mayor en una menor, logrando así una alta irradiancia. La eficiencia de los concentradores se mide en soles, es decir el número de veces que puede concentrar el flux de la energía solar directa que existe en ese momento a nivel de piso.

El artículo reportado por Miranda *et al.* (2009) menciona el uso de un reactor tubular para la realización de la pirólisis de naranja¹. Es por esto que se ha considerado el uso de un concentrador tipo cilindro parabólico, pues a diferencia de los otros tipos de concentradores, tiene la capacidad de concentrar la energía solar en una línea recta. Además, se sabe que los concentradores cilindro-parabólico pueden lograr calentar objetos a 400 °C ².

Una vez definida la geometría del concentrador, se definió el material reflejante a utilizar. La reflectancia de la superficie juega un papel determinante en la eficiencia del concentrador y el desempeño global del equipo. Es por esto que se investigó la reflectancia de distintos materiales y su precio para evaluar la factibilidad de su construcción (Tabla 3.1). Los Espejos Poliméricos suelen ser una opción que por su alta reflectancia y su bajo costo pueden a primera vista ser interesantes, sin embargo los polímeros suelen degradarse en presencia de luz solar y son superficies extremadamente sensibles a las ralladuras por abrasión, que se refleja en un tiempo de vida inferior a 5 años³. Los espejos de aluminio y los de Plata sobre vidrio grueso ($\geq 4\text{mm}$) suelen tener: precio, promedio de vida y una reflectancia aceptables. El parámetro de decisión utilizado para seleccionar uno de estos dos materiales reflejantes fue su reflectancia a lo largo del espectro de luz solar. El aluminio se mantiene relativamente constante sobre todo el espectro, mientras que la de la plata es deficiente en longitudes de onda inferiores a 350 nm. Sin embargo, la plata mantiene un desempeño superior al aluminio en longitudes de onda $\geq 350\text{ nm}$. (Figura 3.1) ⁴. Debido a que solamente 7% de la radiación solar se encuentra en forma de radiación ultravioleta ($\leq 400\text{ nm}$.) ⁵ y el espejo de plata tiene una vida

útil del doble que el del aluminio ^{1,6}, se decidió utilizar una superficie reflejante de espejo de plata.

Tabla 3.1

Comparación de los distintos materiales reflejantes utilizados para realizar concentradores solares.

Material	Reflectancia solar (%)	Durabilidad (años)	Costo (dólares/m ²)
Vidrio grueso tipo Flabeg (4 mm. de grosor)(Plata) ⁶	94	20	40
Espejo polimérico ³	93	5	15-40
Espejo de superficie frontal tipo Solel ⁶	95	NR	NR
Vidrio super delgado Glaverbel ³	93	20	25
Alanod (Aluminio) ³	90	10	20
Espejo de níquel ⁷	85	NR	NR
Espejo de aluminio recubierto con óxido de silicio ⁷	87	15	NR

NR. Dato No Reportado.

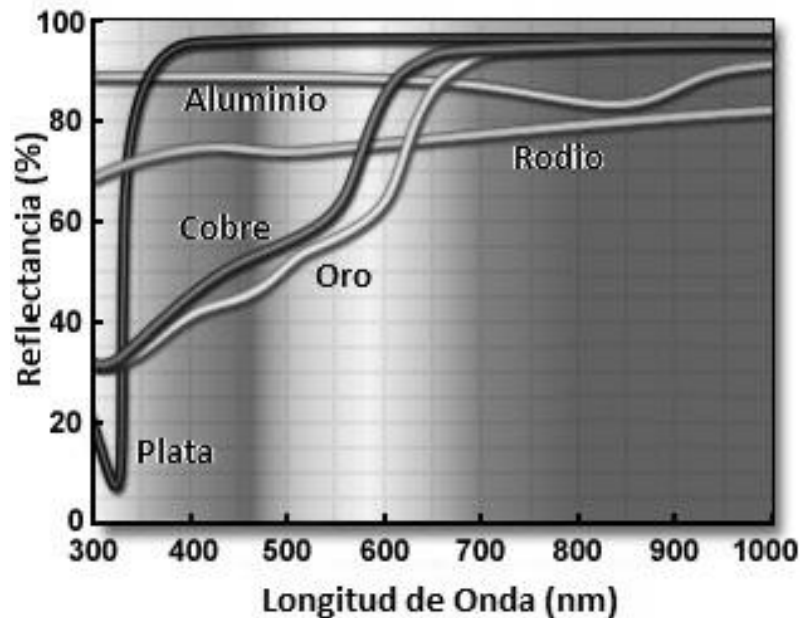


Figura 3.1 - Reflectancia de distintos espejos metálicos en longitudes de onda distintos ⁴.

Antes de ser construido se realizó el plano y modelación en tres y dos dimensiones del espejo en el programa Autodesk Inventor 2010. El concentrador solar fue construido por la empresa mexicana Artesanía en Cristal y Maquinado de Vidrio ubicada en el Estado de México. Se fabricó un espejo

con forma cilindro parabólico con una apertura de 1300x1500 mm. El material reflejante es plata pulida a mano y en mesa depositado sobre un vidrio de 6 mm. de grosor. Se ha utilizado el mayor grosor de vidrio posible para disminuir la fragilidad del espejo (Figura 3.2). De acuerdo con la investigación bibliográfica antes mostrada, este espejo debe tener una reflectancia de 94%. Para mayor detalle sobre dimensiones del concentrador, referirse a Apéndice I.

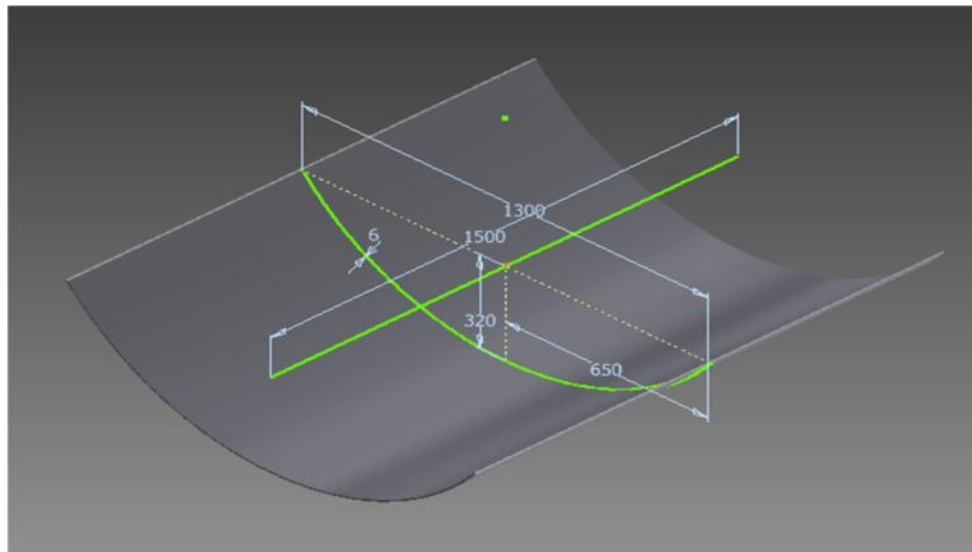


Figura 3.2 - Dimensiones del espejo concentrador de plata construido para el presente trabajo. Unidades de longitud reportadas en milímetros. Esquema construido en Inventor 2011.

3.2.1.2 Reactor químico

Se utilizó un reactor tubular el cual recibe la irradiancia del concentrador. Con la finalidad de lograr radiar la biomasa con la mayor irradiancia, se seleccionó el material del concentrador considerando su transmitancia, capacidad de operar a temperaturas ≤ 500 °C y costo. El vidrio flotado, a pesar de tener buena transmitancia, tiene un punto de ablandamiento muy bajo y no es capaz de resistir choques térmicos. Sin embargo, el cuarzo y el borosilicato tienen buena resistencia a los cambios bruscos de temperatura y su punto de

ablandamiento superior al necesario para la pirólisis de naranja (Tabla 3.2). El cuarzo demuestra una transmitancia mejor que el borosilicato a bajas y altas longitudes de onda, sin embargo su costo es considerablemente superior (Figura 3.3). Debido a que los beneficios del cuarzo sobre el borosilicato no brindan un considerable valor agregado y el aumento en el costo del material es alto, se consideró que el cuarzo implica un sobrediseño innecesario para esta aplicación. Se decidió utilizar un reactor de Borosilicato tipo 7740 PYREX. Igualmente esta decisión fue reforzada con el hecho del uso de borosilicato como primera superficie en colectores tubulares para concentradores cilindro parabólicos producidos por SIEMENS (producto UVAC)⁸ y SCHOTT (producto PTR 70)⁹.

Tabla 3.2
Propiedades físicas del Vidrio Flotado, Bolosilicato y Cuarzo.

Material	Transmitancia (%)	Temp. máxima de operación recomendada (°C)	Punto de ablandamiento (°C)	Costo* (dólar/m ²)
Borosilicato (7740 PYREX) ¹⁰	92	510	821	1,395.0
Cuarzo (Silica fundida) ¹¹	94	893	1585	11,680.0
Vidrio flotado ¹¹	94	490	575	70.4

* Placa plana de 6 mm. de grosor.

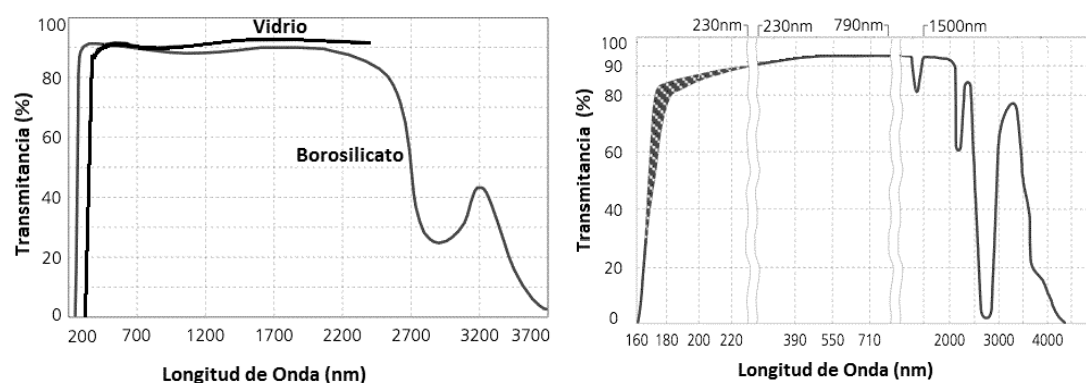


Figura 3.3 - Curvas de transmitancia del Vidrio, Borosilicato y Cuarzo ¹¹.

Una vez definido el material de construcción, se procedió a modelar la geometría del reactor en el programa Autodesk Inventor 2010. Se decidió utilizar una forma similar a las trampas de enfriamiento para gases utilizadas por Miranda *et al.* (2009) durante la pirólisis de biomasa¹. Los argumentos principales para utilizar esta geometría fueron: lograr precalentar el gas de arrastre de la pirólisis sin sacrificar superficie del concentrador, promover un flujo turbulento, y tener las corrientes de entrada y salida fuera de la línea focal. La Figura 3.4 muestra la forma del reactor utilizado. El gas inerte pasa primero por el tubo de precalentamiento (tubo delgado interior) y después fluye por la cámara de pirólisis (tubo ancho exterior).



Figura 3.4 - Reactor tubular utilizado con vistas desde distintos ángulos. Simulación realizada en Inventor 2010.

Tanto la entrada como la salida se encuentran de manera transversal alejadas del eje axial del reactor tubular con la finalidad de alejar las conexiones de la línea focal. El reactor tiene un peso de 565.9 g. y una transmitancia de

92%. La manufactura del reactor fue llevada a cabo por la empresa mexicana Taller y artesanía en vidrio ubicada en Monterrey, Nuevo León. Para mayor detalle sobre dimensiones del reactor, referirse al Apéndice II.

3.2.1.3 Soporte estructural

El soporte estructural cumple la función de proteger el equipo, dar soporte mecánico, y enfocar el concentrador solar. Este consta de 3 partes principales. La primera es la Cuna 001, la cual soporta el concentrador solar por medio de soleras forjadas en parábola (llamadas Costillas 001) y varillas de soporte. El haber utilizado soleras y varillas redujo el peso y costo de la estructura comparado con haber utilizado láminas completas para fabricar la cuna. La segunda parte es el Carro 001, el cual cuenta con llantas para el desplazamiento del equipo y con un dispositivo compuesto por dos chumaceras y una flecha para poder inclinar al Cuna 001. El ajuste de la inclinación se logra con un volante conectado a la flecha. Este diseño de Carro 001 permite poder girar el concentrador solar en 2 planos debido a flecha sobre las chumaceras y a las llantas. La tercera parte son los Extensores 001, los cuales son dos soportes cilíndricos anclados a la Cuna 001 que ayudan a sujetar el equipo de experimentación por medio de pinzas de laboratorio extendidas (Figuras 3.5 y 3.6).

Se utilizó acero tipo “cold rolled” que proporciona una alta dureza y se le recubrió con una capa protectora contra corrosión y pintura acrílica amarilla. Se utilizó soldadura de acero inoxidable. La construcción del soporte estructural fue llevada a cabo por el autor de esta tesis. Para mayor detalle sobre dimensiones del reactor, referirse a Apéndice I.



Figura 3.5 - Componentes principales con concentrador solar diseñado en el presente trabajo. Modelación realizada en Inventor 2010.



Figura 3.6 - Soporte del concentrador solar utilizado en el presente trabajo. Registro fotográfico de unos momentos antes de montar el espejo concentrador.

3.2.1.4 Sistema de monitoreo

Se diseñó un sistema de monitoreo con la finalidad de poder mantener un registro de la experimentación realizada y que además retroalimente al investigador durante el uso del equipo. La serie de instrumentación que se utilizó durante una pirólisis solar fue la mostrada en la Tabla 3.3

Tabla 3.3

Instrumentación utilizada para monitorear y registrar una pirólisis solar.

Dispositivo	Marca	Modelo	Variable registrada
Piranometro	Hukseflux	LP02	Insolación
Sensor de Flux Concentrado	Hukseflux	SG01	Irradiancia
Anemometro	Fisher Scientific	02-401-5	Velocidad de gas
Compas	VINCI	N/A	Angulo de inclinacion
Multímetro	NEWPORT	HHM290/N	Temperatura ambiental IR
Multímetro de Alta Resolución	EXTECH	MM570	Voltaje lineal
Flexometro	CADENA	MGA7525	Distancias pertinentes
Termometro de Papel	Paper Thermometer CO.,INC.	TL-8-290	Temperatura interna y externa del reactor
Camara Fotografica	NIKON	L22	Atributos visuales del sistema

Las variables que presentaron un mayor reto en su medición fueron la insolación, la irradiancia y la temperatura del reactor. La insolación se midió con el LP02 y la Irradiancia con el SG01 los cuales son sensores que trabajan con termopilas las cuales entregan un voltaje lineal como señal de respuesta^{12,13}. Estos sensores no requieren baterías o alimentación externa de energía para su funcionamiento, sin embargo presentan la desventaja de aumentar su incertidumbre cuando se calientan. Por esta razón, es recomendable llevarlos a un lugar fresco después de realizar cada medición. El voltaje lineal fue leído por el multímetro EXTECH MM570 el cual tiene una resolución de 1microvolt¹⁴ y esto permite que el traductor de señal no aumente la incertidumbre de la medición ($\pm 6\%$ total). Por último se alimentó la información en un colector de datos digital programado en VBA Excel 2007 para convertir el voltaje leído por el multímetro en unidades de potencia sobre área y registrar las mediciones realizadas (Figura 3.7).

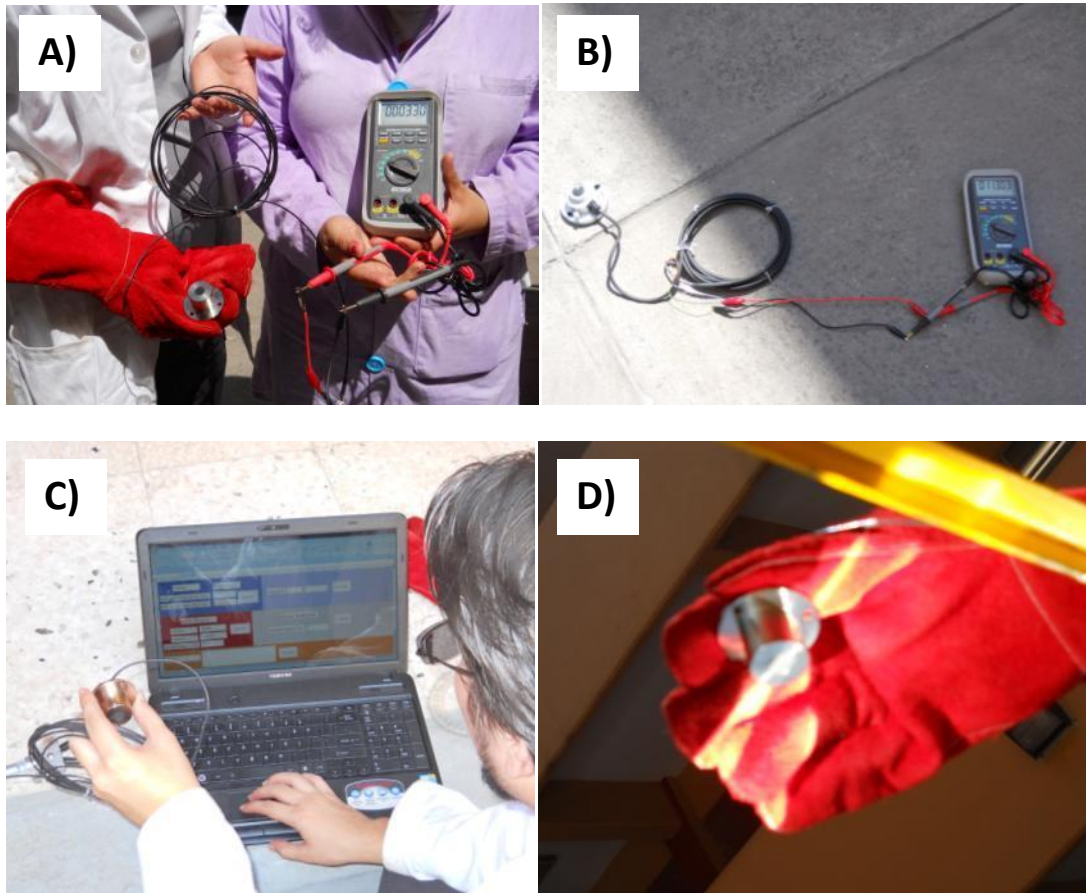


Figura 3.7 – Sistema de medición y monitoreo utilizado durante la experimentación.

A) SG01 conectado a multímetro MM570 para la medición de irradiancia.

B) LP02 conectado a multímetro MM570 para la medición de insolación.

C) Colector de datos programado en VBA Excel 2007.

D) Medición de la irradiancia sobre la línea focal.

Después de haber realizado algunas pruebas experimentales, los termómetros de IR a distancia se encontraron altamente deficientes para medir la temperatura a través y sobre las paredes del vidrio PYREX del reactor. Esto se debe a la alta transmitancia del vidrio PYREX y a la elevada cantidad de radiación infrarroja proveniente de la irradiancia proyectada por el concentrador solar. Los termopares fueron igualmente imposibles de utilizar al no lograr insertarlos a través del vidrio o las tuberías de entrada y salida sin comprometer el ambiente inerte dentro del reactor. Además, se prevé una interacción entre

los termopares y la irradiancia, lo cual produciría mediciones erróneas. La imposibilidad de utilizar termopares fue igualmente encontrada y publicada por Lédé (2003) durante la pirólisis de pellets de celulosa con alta irradiancia en un reactor de cuarzo¹⁵. Por esta razón se procedió a utilizar termómetros de papel sobre la superficie del reactor. Esta problemática para la medición de temperaturas dentro de contenedores de vidrio PYREX bajo alta concentración de radiación es una limitante actual de la tecnología a lo que Bardie *et al.* (2007) han respondido con una técnica de espectrometría acoplada con fibra óptica para la medición de la temperatura de gases producidos por un sólido en un reactor solar¹⁶. Lédé igualmente concluye que la única forma actual para la medición de la temperatura dentro de un reactor de cuarzo es por medio de espectrometría¹⁵. Sin embargo este método requiere de equipo costoso y complicado de acoplar en el exterior de un laboratorio.

3.3 Desempeño térmico

3.3.1 Metodología

3.3.1.1 Modelación óptica por trazado de rayos por Monte Carlo

El Laboratorio nacional de energías renovables de Estados Unidos (NREL) ha diseñado un simulador de concentradores solares llamado SolTrace. El SolTrace utiliza el método de trazado de rayos de Monte Carlo, el cual discretiza la radiación solar directa y la simula en forma de vectores. Estos vectores interactúan con cuerpos en el espacio los cuales pueden absorberlos o reflejarlos en el ángulo que corresponda según las leyes de la óptica. Este paquete computacional ha sido utilizado con grandes resultados por Lichty *et*

al., (2010) para la simulación de un gasificador solar que utilizaba un heliostato y un concentrador paraboidal secundario¹⁷. El SolTrace permite: obtener el perfil de la irradiancia sobre superficies, ubicar el punto focal de un concentrador y trazar el paso de los rayos a través del sistema.

En el presente trabajo se ha simulado el concentrador solar construido y la superficie exterior del reactor en el momento en el que el área de apertura se encuentra perpendicular a los rayos solares. Tal como lo recomienda el SolTrace, se simulará el disco solar con una distribución gaussiana de los rayos solares con una desviación estándar de 2.73 miliradianes. Los rayos solares serán representados por 100 000 vectores, tal como lo hizo Lichty *et al.* (2010)¹⁷ y Steinfeld *et al.* (2010)¹⁸.

La simulación del sistema óptico se desarrollo en 2 etapas. La primera etapa es la superficie reflejante del concentrador solar, la cual fue definida como una etapa óptica por tener una interacción directa con los rayos solares. A la etapa uno se le asignó una transmitancia de 0%, reflectividad de 94%, una desviación estándar de especularidad de 0.5 mrad, y una geometría idéntica al concentrador construido. La segunda etapa es la superficie exterior del reactor, la cual se definió como una etapa virtual, lo cual implica que no tiene interacción con los rayos y solo se desea analizar la irradiancia interceptada por esa superficie. La superficie del reactor simulado es de 1.5 m de largo aun cuando el reactor disponible para la experimentación es de solo 0.445 m. Esto es para brindar y registrar suficiente información del sistema que pueda ayudar a continuar con esta línea de investigación en futuros proyectos de escalamiento o rediseño del proceso. Se trazaron 200 vectores escogidos al azar para

conocer su trayectoria a través del sistema. Con esta información se pudo ubicar el punto focal, y obtener predicciones de los perfiles de irradiancia interceptados por la pared exterior del concentrador.

3.3.1.2 Ubicación de la línea focal

El punto focal real del sistema construido se ubicó por medio de un barrido con un láser. El emisor de láser se movió en línea recta transversal al eje axial del concentrador apuntando hacia la superficie reflejante. El láser rebotó en la superficie reflejante de la misma manera en la que lo haría la radiación solar directa. Se utilizó un tubo sólido de 2 in. de diámetro exterior (igual que el reactor) para ubicar el punto en donde el láser fuera siempre interceptado por el tubo. El barrido se realizó en las 2 orillas del concentrador.

3.3.1.3 Niveles de concentración y temperaturas alcanzadas.

Se realizaron una serie de pruebas térmicas para el sistema de concentración térmica solar diseñado en este proyecto. En estas pruebas se sometió al reactor a una alta irradiancia ubicándolo sobre la línea focal del concentrador. Durante esta experimentación se trabajó sin un ambiente de helio y sin biomasa. Se realizaron mediciones con el sistema de monitoreo antes mencionado para poder después ser comparados con la simulación en SolTrace. Se realizaron 3 repeticiones del experimento los cuales fueron realizados de las 12 a las 15 horas el 7, 12 y 21 de Septiembre de 2011 en el patio central del edificio CELAES de la Facultad de Ciencias Químicas de la U.A.N.L. La Figura 3.8 muestra el Reactor de vidrio PYREX y el concentrador durante la prueba térmica.

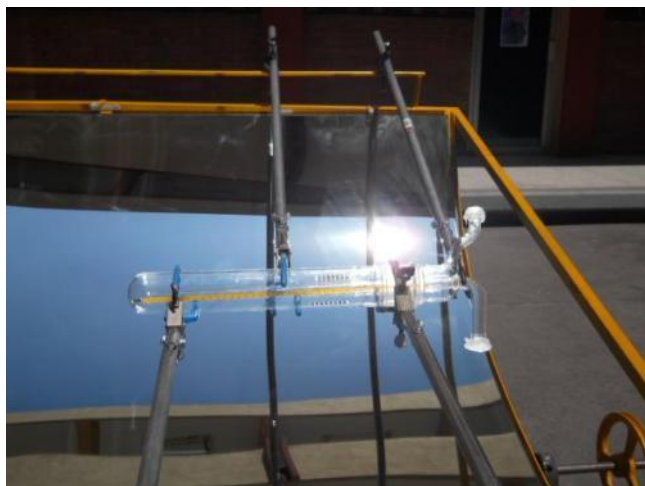


Figura 3.8 - Arreglo del sistema concentrador-reactor de PYREX para pruebas térmicas.

3.3.2 Resultados y discusión

3.3.2.1 Resultados de modelación óptica por trazado de rayos de Monte Carlo

La modelación computacional proporcionó una descripción del desempeño del sistema en tres dimensiones. El punto focal se encontró a 0.39 m. del concentrador. Sobre esta línea se interceptan el 95.9% de los rayos emitidos. Los rayos que no fueron interceptados fueron aquellos referentes al 4% de absorbancia de la plata y a la especularidad del espejo (Figura 3.1). La línea focal se proyecta sobre 0.08 m de la superficie del reactor en donde se logró alcanzar un pico máximo de 33 soles (Figura 3.9). Sin embargo, la irradiancia promedio es de 15.65 soles.

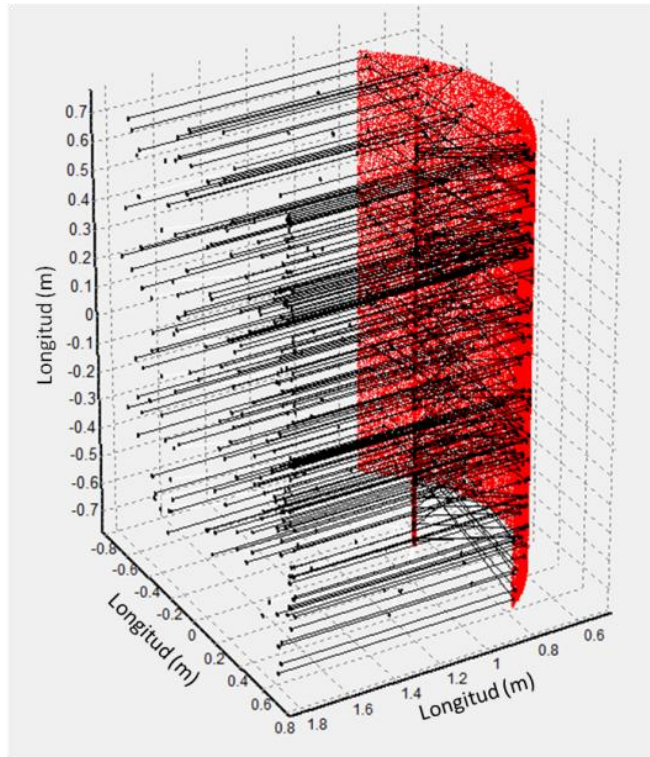


Figura 3.9 - Trayectoria de 200 rayos escogidos al azar de manera representativa, los cuales se juntan en el punto focal. Simulación en SolTrace.

La distribución de la irradiancia interceptada sobre la superficie presenta una distribución Gaussiana sobre su circunferencia debido a que es la misma distribución con la que radia el disco solar y la forma del concentrador parabólico promueve además este perfil. Sin embargo, la irradiancia se mantiene casi constante en el eje axial del reactor (Figura 3.10). La poca variación vista sobre el eje axial es atribuible a la specularidad del espejo de plata y al uso de variables aleatorias durante la aproximación de integrales que utiliza el método de Monte Carlo. Steinfeld *et al.* (2010)¹⁸ publicaron distribuciones de irradiancia sobre la superficie de colectores para aire que presentan una distribución igualmente Gaussiana, sin embargo reportan 210

soles como irradiancia pico para un concentrador de 3.5 m. de cuerda (270% de cuerda del utilizado en el presente proyecto).

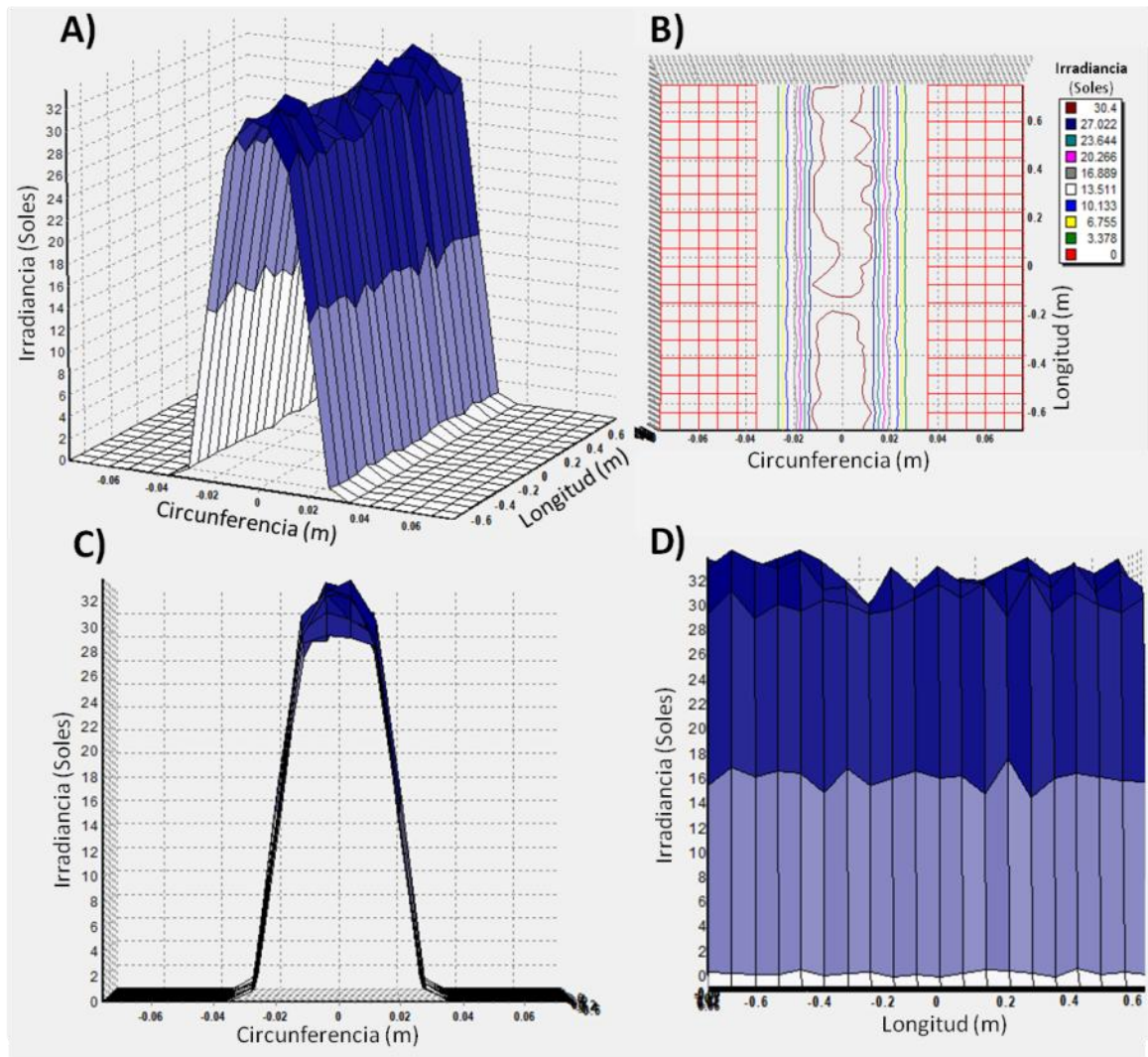


Figura 3.10 – Simulaciones realizadas en SolTrace.

- A)** Gráfico en tres dimensiones la distribución de la irradiancia sobre la superficie exterior del reactor.
- B)** Gráfico en dos dimensiones de la distribución de la irradiancia sobre la superficie exterior del reactor.
- C)** Gráfico con el desarrollo de la irradiancia contra la superficie exterior a del reactor.
- D)** Gráfico con el desarrollo axial de la irradiación sobre la superficie exterior del reactor.

3.3.2.2 Resultados de ubicación de la línea focal

La línea focal se ubicó utilizando el método de barrido con láser. Este experimento se realizó el 1 de septiembre de 2011. En una de las orillas se encontró el punto focal a 32.5 cm. del concentrador y la otra a 34 cm. del concentrador. Este resultado revela la existencia de irregularidades en la geometría del concentrador debido a su manufactura. La óptica del sistema se verá afectada por este hecho, así como su eficiencia, sin embargo la irregularidad es pequeña (1.5 cm en una separación de 150 cm) y no compromete el desarrollo de la pirólisis solar. La línea focal se encontró debajo de la línea focal modelada en SolTrace, 5.5 cm y 4 cm respectivamente. Se presume que esta discrepancia pudo ser producida por las imperfecciones durante la manufactura del espejo. Para la futura experimentación se utilizará la línea focal medida con láser para así compensar los errores de fabricación del espejo.

3.3.2.3 Resultados de experimentación de niveles de concentración y temperaturas alcanzadas

La experimentación de este proyecto se realizó durante el mes de Septiembre de 2011, es decir durante otoño. La temperatura ambiente a la que se operó oscilaba entre los 29-31 °C y se tuvo una insolación promedio de 864 W/m². Se ideó colocar un termómetro de mercurio para alta temperatura en el interior del tubo de precalentamiento del reactor para monitorear su temperatura en esta zona. La Tabla 3.4 muestra los resultados de la experimentación. Cabe mencionar que las irradiancias pico reportadas pueden ser menores a las reales, sin embargo estos son los datos que se lograron recabar antes de que la

alta irradiancia dañara el sensor o incendiara el guante de protección para calor diseñado para uso en hornos (observaciones de humo sobre el guante eran frecuentes).

Tabla 3.4

Resultados de la experimentación sobre los niveles de concentración y temperaturas alcanzadas.

Día	Temperatura Ambiente Promedio (°C)	Insolación Promedio (W/m ²)	Temperatura Interna de Reactor (°C)	Temperatura Máxima de pared (°C)	Irradiancia Pico Promedio (W/m ²)	Irradiancia Promedio (Soles)	Irradiancia Pico Max. Alcanzada (W/m ²)
07.09.2011	30.1	895.34	73	<143 °C	15,260.56	17.04	16,942.15
12.09.2011	29.33	834.20	53.88	<143 °C	16,584.54	19.88	20,626.03
21.09.2011	29.8	862.56	69.33	<143 °C	22,306.47	25.86	27,086.78

La irradiancia lograda fue cada vez mayor en los experimentos aun cuando el primer día presentó la mejor insolación. Esto es debido a que con cada prueba se comprendía más sobre la operación del equipo y se lograba subir la eficiencia del mismo. Durante esta experimentación se comprendió la alta importancia que conlleva el correcto enfoque del concentrador solar. Igualmente se encontró que la temperatura que alcanzaba el reactor, era mucho menor a la esperada y los termómetros de papel que tienen un rango de medición de 143-182 °C no se activaron. La alta transmitancia del reactor solar de vidrio PYREX ocasionó que la irradiancia atravesara el reactor completo y se perdiera una gran parte de la energía. Esto se reflejó en la temperatura del interior del reactor relativamente baja (70 °C). Durante una pirólisis solar es recomendable cubrir la parte superior con un material reflejante para redirigir la energía hacia dentro del reactor. Según el análisis de materiales reflejantes realizados, es posible utilizar aluminio. Weimer *et al.* (2008) publica que los

reactivos dentro de un reactor solar pueden alcanzar una mayor temperatura comparados con la ventana del reactor por la cual pasa la irradiación¹⁹.

Se ha encontrado que el sistema termosolar sin reactivo en el interior del reactor tarda 1 hora en alcanzar una temperatura estable. Después de esta hora de operación, la temperatura se mantiene relativamente estable (± 6 °C) viéndose levemente afectada por diferencias en la insolación debido a nubes o en la calidad del enfoque del concentrador. La Tabla 3.5 muestra el tiempo en el que la temperatura del reactor tardaba en estabilizarse y a la temperatura a la que se estabilizó. Durante el día 12.09.2011 se registró un cielo con nubosidad parcial, y esto se ve reflejado en una temperatura del reactor menor a las de los otros días. Con estos resultados se puede prever que durante una pirólisis se debe considerar como mínimo, una hora para poder llevar el sistema a una temperatura estable.

Tabla 3.5

Temperatura a la que se estabilizó el interior del reactor y tiempo que tardó en llegar a esta.

Día	Tiempo para estabilizar Temperatura (horas)	Temperatura Estabilizada (°C)
07.09.2011	1	84
12.09.2011	0.86	59
21.09.2011	1.12	70

La eficiencia del equipo varió con cada corrida. Esta fue mejorando y el 21 de Septiembre de 2011 se logró medir una irradiación pico de 27,086.78 W/m² equivalente a 31.03 soles. Comparados con los 33 soles predichos por SolTrace se puede decir que en ese momento se estaba operando a un 94% de la eficiencia óptima. Durante esta corrida experimental, se logró mantener el sistema operando a >91.4% de la eficiencia óptima por más de 23 minutos

(Figura 3.11). La Tabla 3.6 muestra la eficiencia a la que se logró llevar el sistema en cada corrida. La eficiencia promedio más alta alcanzada fue de 78.63% y la mínima de 51.64%.

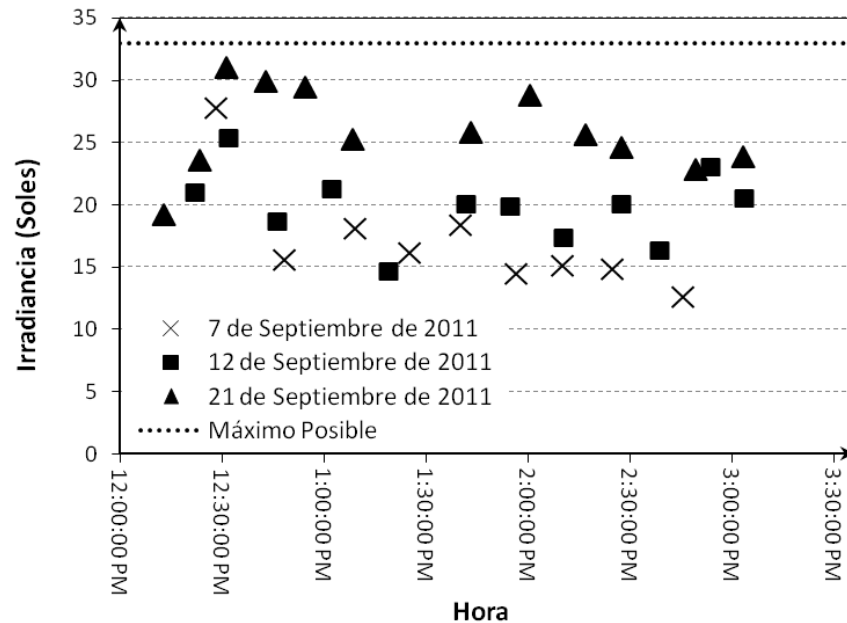


Figura 3.11 - Irradiancia pico registrada sobre la línea focal a través del tiempo para las tres corridas experimentales.

Tabla 3.6

Eficiencias promedio de operación y la eficiencia máxima alcanzada durante cada corrida experimental.

Día	Eficiencia Promedio (%)	Eficiencia Máxima Alcanzada (%)
07.09.2011	51.64	84.27
12.09.2011	60.24	76.88
21.09.2011	78.36	94.03

Durante los momentos de mayor eficiencia de operación se logró obtener resultados experimentales bastante cercanos a los predichos por la modelación del SolTrace. La discrepancia en los valores se puede atribuir a los siguientes factores:

- Alto porcentaje de radiación difusa la cual no puede ser utilizada por el concentrador pero que igualmente es registrada por el piranómetro como parte de la radiación global.
- Error de enfoque del concentrador solar. Esto puede ser remediado adquiriendo un piroheliómetro y montándolo sobre el concentrador con el sensor paralelo al área de apertura del concentrador. Esto permitirá retroalimentar al operador sobre la cantidad de radiación solar directa que se recibe en el área de apertura en determinado ángulo de enfoque.
- Anomalías geométricas sobre la superficie reflejante.
- Incertidumbre de $\pm 6\%$ de la medición realizada con el SBG01 y LP01.

Con la información recolectada durante la experimentación y uniendo esta información el año típico solar construido durante este trabajo, se puede lograr proyectar el desempeño de esta tecnología en el área metropolitana de Monterrey. Asumiendo:

- La irradiancia promedio sobre la línea focal es de 15.65 soles y la irradiancia pico es 33 soles.
- El concentrador solar puede llegar a operarse con el 91.4% de eficiencia de manera estable.
- Se tienen condiciones solares típicas a lo largo del año.
- Se opera durante el 100% de las horas con luz solar.

Durante un año típico se puede lograr conseguir a lo largo del día un promedio de 125.92 kWh/m²d. Sin embargo el máximo anual lo ofrece junio con un promedio sobre la línea focal de 157.93 kWh/m²d y el mínimo se encuentra

en diciembre con 89.29 kWh/m²d (Figura 3.12). Igualmente durante el año se tiene en promedio una irradiancia pico de 20.16 kW/m² a la hora de mayor insolación. Durante junio la irradiancia pico es de 26.89 kW/m² y en diciembre es de 14.43 kW/m² (Figura 3.13). Con esta información es posible realizar cálculos de escalamiento de esta tecnología para la producción de calor en cualquier proceso industrial o doméstico.

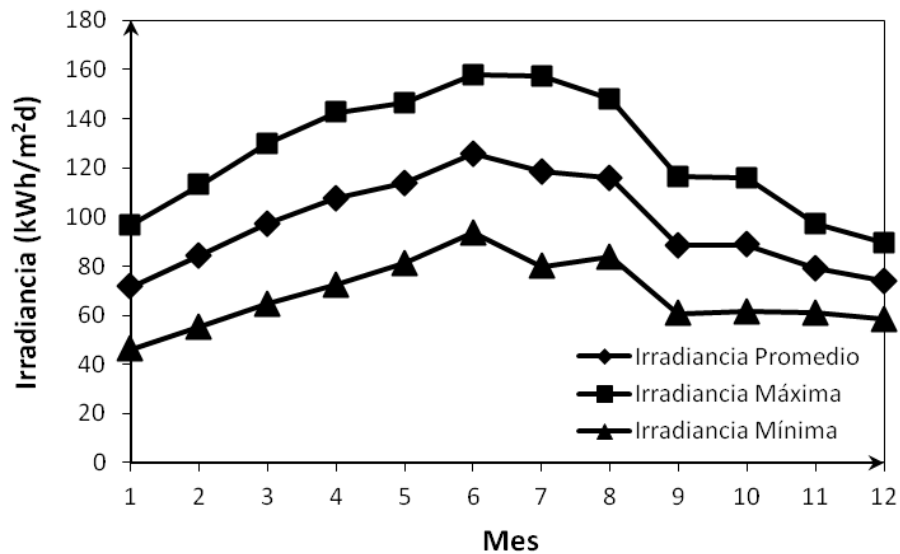


Figura 3.12 - Irradiancia promedio sobre la línea focal. Modelación del desempeño del concentrador solar a lo largo del año operando durante el 100% de horas con luz solar. Datos para el área metropolitana de Monterrey.

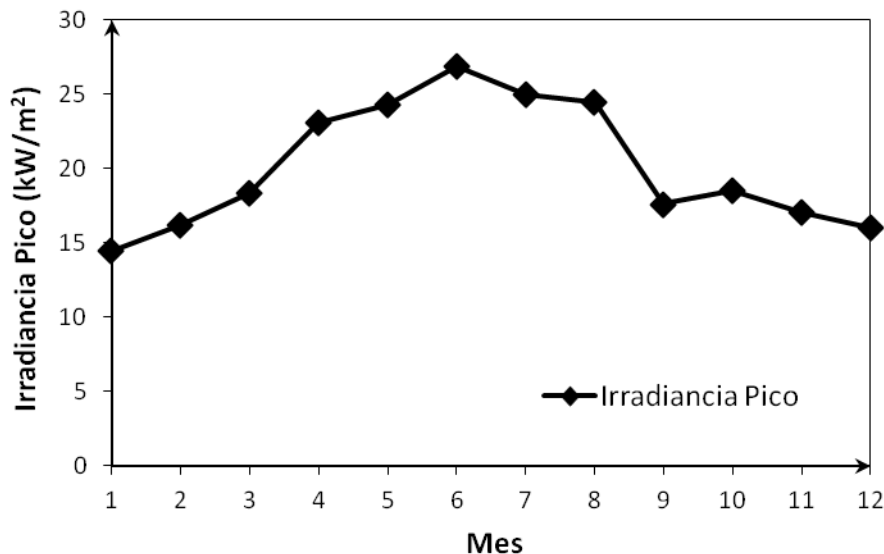


Figura 3.13 - Promedio de irradiancia Pico en la hora de mayor insolación durante un año típico. Información válida para el área metropolitana de Monterrey.

3.4 Conclusiones

Durante este capítulo se diseñó, construyó, simuló y caracterizó un reactor químico solar y su concentrador cilindro parabólico. Los resultados obtenidos son los argumentos base para las siguientes conclusiones:

- 1) El espejo de plata sobre vidrio grueso ha mostrado ser el material óptimo para la construcción de la superficie reflejante del concentrador solar. Esto se debe a su alta reflectancia en el espectro electromagnético (0.94), a su bajo costo (40 dólares/m²) y larga vida útil (20 años).
- 2) El material óptimo para la construcción de un reactor solar para pirólisis de cáscara de naranja es el vidrio 7740 PYREX por su alta transmitancia a lo largo del espectro electromagnético y su costo accesible.
- 3) Con excepción del sistema de monitoreo, todos los componentes del reactor químico y concentrador solar fueron manufacturados por empresas

mexicanas lo cual demuestra el alto potencial que tiene el utilizar productos y mano de obra nacional en el desarrollo y producción de sistemas termo-solares. Teniendo como ventajas la generación de productos de alto valor y el impulso de las tecnologías sustentables en territorio mexicano.

4) Se encontró una alta similitud entre la irradiancia pico registrada y la simulación en SolTrace, sugiriendo así la validez de la simulación realizada a manera de referencia como punto óptimo de operación.

5) Es posible obtener irradiancias pico superiores a 30 soles con un concentrador cilindro parabólico con un área de apertura de 1300x1500 mm en el área metropolitana de Monterrey. Esto sugiere la factibilidad técnica de llevar a cabo procesos termoquímicos como la pirólisis de cáscara de naranja.

6) El sistema termo-solar construido puede alcanzar eficiencias de por lo menos 94% con referencia a lo proyectado por la simulación de SolTrace. El 6% restante puede atribuirse a: la incertidumbre de medición, inexactitud al enfocar el concentrador solar, alto porcentaje de radiación difusa en el ambiente e irregularidades geométricas en la superficie reflejante.

7) Típicamente el área metropolitana de Monterrey cuenta con suficiente insolación para irradiar un tubo de 2 in. de diámetro con 125.92 kWh/m²d con una irradiancia pico de 20.16 kW/m² utilizando un concentrador cilindro parabólico de plata de 1300 mm de cuerda en el área metropolitana de Monterrey. Este calor puede ser aplicable tanto en procesos domésticos como industriales.

Una vez construido y caracterizado el reactor termo-solar, es posible realizar la experimentación necesaria para llevar a cabo una pirólisis solar de biomasa. Este tema será abordado en el Capítulo 4.

3.5 Referencias

- 1 Miranda R., Bustos-Martinez D., Sosa Blanco C., Gutiérrez Villareal M.H., Rodríguez Cantú M.E. Pyrolysis of sweet orange (*Citrus sinensis*) dry peel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 86: 245-251 (2009).
- 2 Fernández-García, A., Zarza E., Valenzuela, L., Pérez, M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 1695-1721 (2010).
- 3 Zarza, E. Situación tecnológica de los captadores cilindroparabólicos. CIEMAT. p.6-11 Madrid (2011).
- 4 Spring K.R., Fellers T.J., Davidson M.W. Introduction to Mirrors. Molecular Expressions. (2003) <<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/mirrorsintro.html>> Fecha de consulta: 12 de Octubre de 2010.
- 5 Ahrens C.D. Energy that drives the storms. Extreme weather and climate. Warren Faidley, Ed. 1, USA, p. 36-56 (2011).
- 6 Price H., Lüpfert E., Kearney D., Zarza E., Cohen G., Gee R., Mahoney R. Advances in parabolic trough solar power technology. *Journal of Solar Energy Engineering*. 124: 109-125 (2002).
- 7 Ibañez M., Rosell J.R., Rosell J.I. Tecnología Solar. Mundi Prensa, España. Vol 1. p. 515 (2004).
- 8 Siemens AG. Siemens UVAC 2010. Siemens Energy Sector. Alemania p.1-2 (2010).
- 9 SCHOTT. Schott PRT 70 Receiver. Setting the benchmark. SCHOTT Solar Inc. p. 1-4 (2011).
- 10 CORNING. Care and safe handling of laboratory glassware. Corning Incorporated. New York, p. 1-6 (2008).
- 11 Präzisions glas & optik. Thermal Glass. Block- Rolled Glass (2011) <<http://www.pgo-online.com/intl/katalog/pyrex.html>> Fecha de consulta: 21 de Noviembre de 2011.
- 12 Hukseflux. SBG01 Water cooled heat flux sensor according to Schmidt-Boelter. Hukseflux Thermal Sensors. p. 6-8 (2008).
- 13 Hukseflux. LP02 Solar radiation sensor compliant with ISO and WMO standards. Hukseflux Thermal Sensors. p. 8-10 (2006).
- 14 Extech Instruments. Users Guide. MultiMaster Digital Multimeter Series MM560 MM570. Extech Instruments Corporation. p. 5 (2002).
- 15 Lédé J. Comparison of contact and radiant ablative pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 70: 601-618 (2003).
- 16 Badie J.M., Cassan L., Granier B., Agudelo Florez S., Chejne Janna F. Gas temperature measurements in high concentration solar furnace environments: Evidence of nonequilibrium effects. *Journal of Solar Energy Engineering*. 129: 412-415 (2007).
- 17 Lichty P., Perkins C., Woodruff B., Bingham C., Weimer A. Rapid high temperature solar thermal biomass gasification in a prototype cavity reactor. *Journal of Solar Energy Engineering*. 132: 1-7 (2010).
- 18 Steinfeld A., Bader R., Barbato M., Pedretti A. An air-based cavity-receiver for solar trough concentrators. *Journal of Solar Energy Engineering*. 132: 1-7 (2010).
- 19 Weimer A., Perkins C., Mejic D., Lichty P. Rapid solar-thermal conversion of biomass to syngas. Patent cooperation treaty. WO 2008/027980 A1 (2008).

CAPÍTULO 4

4. PIRÓLSIS SOLAR DE BIOMASA PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIOCOMBUSTIBLE DE TERCERA GENERACIÓN Y OTROS PRODUCTOS DE ALTO VALOR.

4.1 Introducción

La pirólisis de biomasa ha demostrado ser ya una forma sustentable para la obtención de productos de alto valor¹⁻⁶. La pirólisis es definida como la descomposición termoquímica de un material carbonoso en ausencia de oxígeno, la cual genera productos en 3 fases: sólido, líquido y gaseoso¹. La composición y proporción de estos productos depende tanto del material carbonoso utilizado como de las condiciones del proceso (presión y temperatura)⁷. Bajo las condiciones de procesos adecuadas, el proceso de pirólisis puede producir biocombustibles en fase líquida lo cual facilita su manipulación, almacenamiento y traslado, además de ser afines al uso en motores de combustión interna⁸⁻⁹. Sin embargo, la pirólisis de biomasa es un proceso que sucede a través de reacciones endotérmicas¹⁰. Esto implica la necesidad de inyectar energía al proceso para poder llevar a cabo las reacciones químicas y mantener la temperatura del reactor en condiciones pirolíticas.

La pirólisis de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) es un proceso que fue estudiado y reportado por Miranda *et. al* (2009) en donde se demostró el potencial de utilizar este residuo agro-industrial como materia prima para la producción de un biocombustible de segunda generación utilizando un reactor de acero al carbón calentado con una resistencia eléctrica⁵. La composición de los productos fue 53.1, 21.1 y 28.8 % peso de bioaceite, carbón mineral y gases respectivamente. La descomposición térmica ocurrió durante los 114-569 °C y los productos fueron mayormente aromáticos, ácidos carboxílicos y alcoholes⁵. Este proceso es considerado como productor de un biocombustible de segunda generación por utilizar un material lignocelulósico sin valor como alimento y llegar hasta un producto líquido. Sin embargo, en este artículo se abordará el desarrollo para llevar este proceso hasta uno de producción de biocombustibles de tercera generación. Es decir, que utilice una biomasa lignocelulósica sin valor como alimento, que el producto se encuentre en estado líquido y que utilice de manera parcial una energía renovable durante su producción¹¹. En este trabajo, la energía renovable utilizada será energía solar térmica. La integración de la energía solar térmica a los procesos industriales es un área de oportunidad para satisfacer las necesidades ambientales de la sociedad actual.

La energía solar de alta concentración se ha comenzado a integrar a los procesos de descomposición termoquímica de materiales carbonosos, principalmente a la gasificación¹²⁻¹⁵ y en menor medida a la pirólisis¹⁶⁻¹⁸. Actualmente se han reportado resultados experimentales sobre la pirólisis flash de celulosa en ambientes solares simulados con lámparas de xenón¹⁸⁻¹⁹. En estas publicaciones se ha logrado demostrar la factibilidad del proceso. Los

resultados publicados actualmente se realizan en reactores a escala laboratorio de unos pocos centímetros cúbicos. Igualmente Beattie, (1983) reportó el resultado de la pirólisis flash solar de carbón mineral en el horno solar del Laboratoire des ultra-refractaires en Odeillo, Francia con una irradiancia de 2000 kW/m². La desvolatilización lograda a esta irradiancia fue de un 51% ¹⁷. Actualmente no se han encontrado resultados experimentales de una pirólisis solar lenta que utilice biomasa real y llegue a un producto líquido con alto potencial como combustible de tercera generación. La Tabla 4.1 muestra un resumen de las publicaciones de pirólisis solares encontradas durante la investigación bibliográfica para el presente proyecto.

Tabla 4.1

Comparación de publicaciones referentes pirólisis solar incluyendo el presente trabajo.

Materia Prima	Fuente de Irradiancia	Concentrador	Reactor			Fase del Producto
			Forma	Material	Dimensiones	
Celulosa microcristalina de Avicel PH105 ¹⁸	Lámpara de Xenon	2 Paraboidales	Cilindrico	Silica Fundida	φ 3.5 x 64 cm	Gas y sólido
Carbón Mineral del Sureste de Arizona ¹⁷	Sol	1 Heliostato y 1 Paraboidal	Cilindrico con ventana de cuarzo tipo domo	Silica fundida y acero	399 cm ³	Gas y sólido
Pelets de Celulosa Whatman ¹⁶	Lámpara de Xenon	2 Paraboidales	Cilindrico	Silica fundida	φ 3 x 5 cm	Gas y sólido
Cáscara de naranja Citrus sinensis*	Sol	1 Cilindrico-Parabólico	Cilíndrico de entrada y saldas transversales	7740 PYREX	φ 5.08 x 45.72 cm	Gas, líquido y sólido

* *Presente trabajo*

El primer objetivo de este estudio es demostrar la factibilidad de llevar a cabo la pirólisis solar de la cáscara de naranja en una escala banco utilizando un concentrador cilindro parabólico. El segundo, realizar un análisis cualitativo y

cuantitativo de las especies químicas presentes en el producto líquido de la pirólisis solar de la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*). Esto con la finalidad de evaluar usos potenciales de dicho producto.

4.2 Metodología

El proceso en conjunto lleva 4 etapas principales: secado, triturado, descomposición térmica, y recuperación de productos. Durante las primeras 2 etapas se retira el exceso de humedad y se disminuye el tamaño de partícula. El trabajar con biomasa seca evitará que se genere una gasificación en vez de una pirólisis. El triturado facilitará la introducción de la biomasa al reactor. Posteriormente se encuentra la etapa de descomposición térmica en la que se lleva a cabo la pirólisis solar y por último la recuperación de los productos líquidos de alto valor a través de un tren de enfriamiento (Figura 4.1).

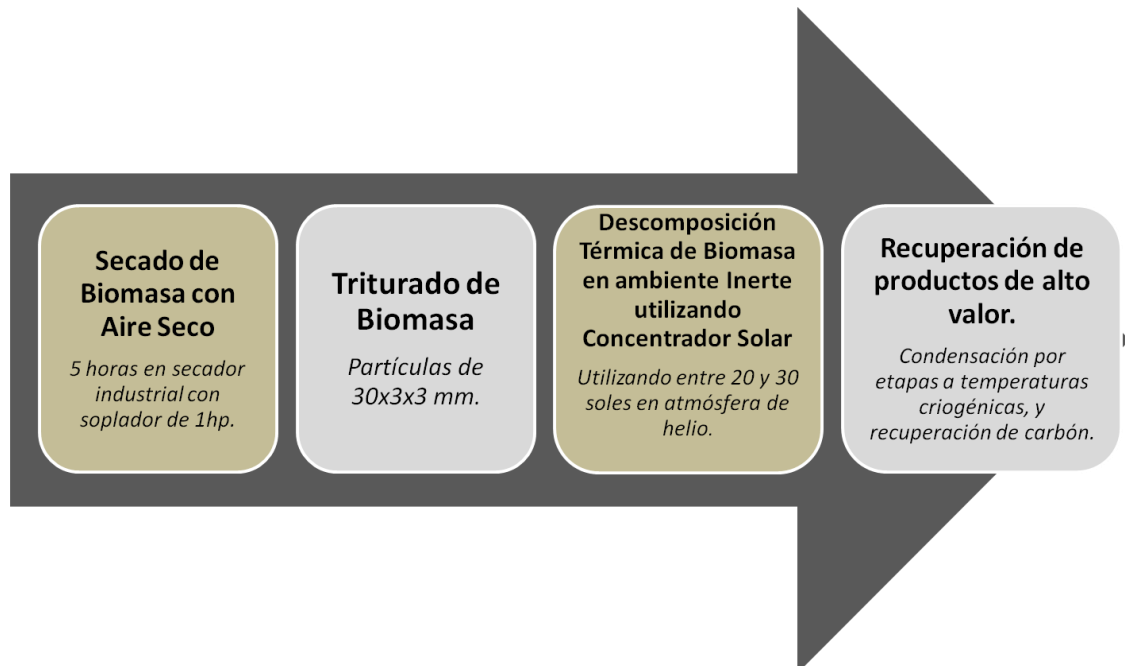


Figura 4.1 - Diagrama de proceso global de pirólisis solar.

4.2.1 Muestra

La biomasa utilizada es cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) provenientes de una juguera ubicada en Monterrey, México. La muestra fue secada en un túnel de viento con un soplador de 1 hp a temperatura y presión ambiente durante 5 horas. La humedad desprendida de esta manera fue del 29% másico. Posteriormente la cáscara se trituró en segmentos más pequeños. Se realizaron dos tamaños de partícula para realizar 2 corridas experimentales y observar la influencia del tamaño de partícula sobre el proceso. Las muestras para las dos corridas experimentales fueron obtenidas del mismo lote de materia prima. La primera serie de tamaño de partículas tuvo un tamaño promedio de 20x20x3 mm, mientras que la segunda serie de 30x3x3 mm. Se espera observar una diferencia en la forma en la que la transferencia de calor tomará lugar debido a que poseen geometrías distintas. Igualmente, se espera que en la partícula de dimensiones 30x3x3 mm se reduzca el fenómeno de ablación²⁰, el efecto del encogimiento de la biomasa sobre la pirólisis sea despreciable²¹, y la transferencia de calor suceda de manera análoga a la de un cilindro de longitud infinita²¹. Todos estos factores estarán presentes e influyen en la pirólisis de la partícula de 20x20x3 mm. Igualmente se cuenta con el análisis elemental realizado para el lote de la materia prima utilizado para el presente trabajo, el cual fue previamente publicado por Miranda *et. al* (2009)⁵ (Tabla 4.2).

Tabla 4.2

Análisis elemental realizado para el lote de cáscara de naranja seca. Miranda *et al.* (2009)⁵.

Cáscara de Naranja	
Componente	% Másico
C	39.71
H	6.20
N	0.46
O	53.03
S	0.60
Humedad	9.20
FC	13.07
Ceniza	2.94

C, Carbono; H, Hidrógeno, N, Nitrógeno; O, Oxígeno; S, Azufre; FC, Carbón Fijo.

4.2.2 Configuración de equipo experimental

La experimentación se llevó a cabo los días 19 y 21 de Septiembre de 2011 en el patio central del edificio CELAES de la Facultad de ciencias químicas, U.A.N.L. en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México bajo las coordenadas 25° 43' 32" norte, 100° 19' 00" oeste y una elevación de 529 m sobre el nivel del mar.

La alta irradiancia se obtuvo utilizando un concentrador cilindro-parabólico el cual fue descrito en el Capítulo 3. Igualmente se utilizó el reactor de vidrio PYREX descrito en el mismo capítulo sin embargo se le acopló una hoja de papel aluminio en la parte superior del reactor con la intención de evitar pérdidas por la transmitancia del vidrio PYREX como fue observado en el Capítulo 2. La hoja de aluminio aplicada tuvo un peso de 1.3 g. Dentro del reactor se colocó la biomasa y se selló para evitar fugas (Figura 4.2).

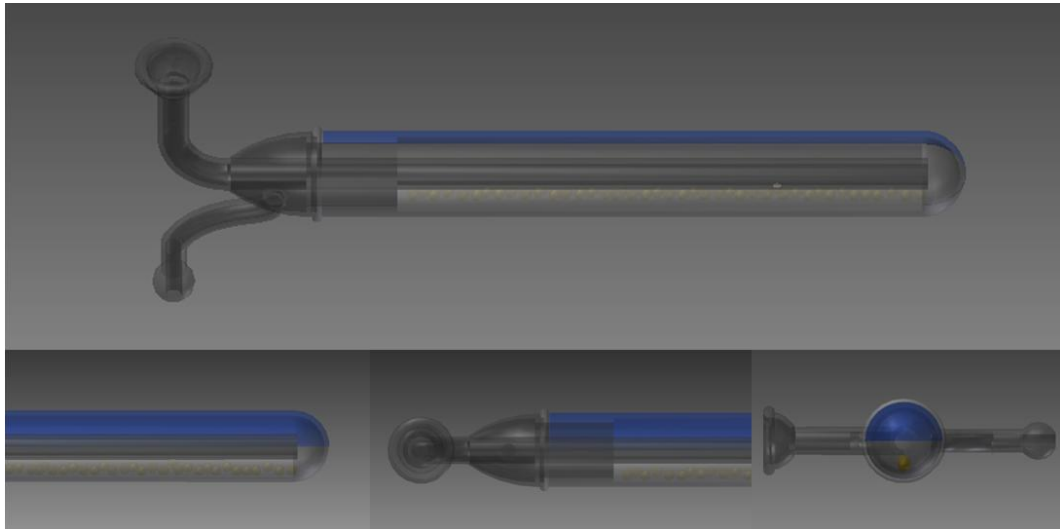


Figura 4.2- Configuración del reactor de vidrio PYREX con hoja de aluminio en la parte superior representada como una cubierta azul y biomasa como esferas amarillas en el interior. Modelación realizada en Inventor 2011.

NOTA: La biomasa fue representada en forma de esferas para facilitar su modelación en computadora sin embargo esta no necesariamente tuvo esta forma durante la experimentación real.

El reactor se montó en el concentrador solar por medio de pinzas de soporte de laboratorio y se inertizó con helio de ultra alta pureza. El helio se precalentó al pasar por el tubo interior del reactor. Posteriormente hizo las veces de gas de arrastre para acarrear los gases generados durante la pirólisis solar de la cáscara de naranja. Los gases de salida del reactor se hacen pasar por un tren de enfriamiento compuesto por 3 etapas refrigeradas con nitrógeno líquido a $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por último, el helio y los gases incondensables de pirólisis se hicieron pasar por un lavado húmedo en acetona para disminuir la emisión de posibles contaminantes al ambiente (Figuras 4.3, 4.4). El sistema operó a presión atmosférica.

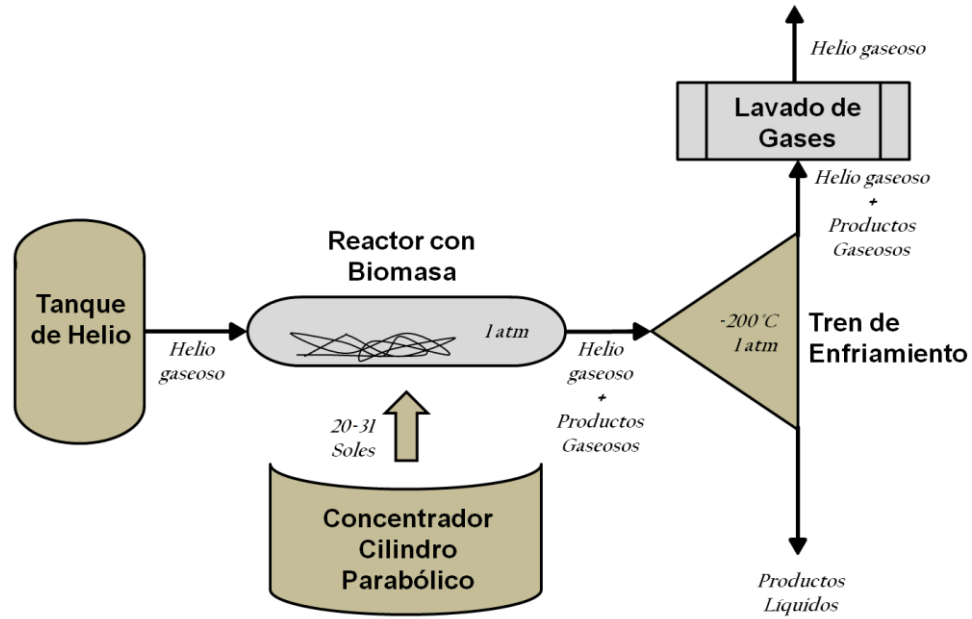


Figura 4.3- Diagrama de flujo de pirólisis solar de biomasa.

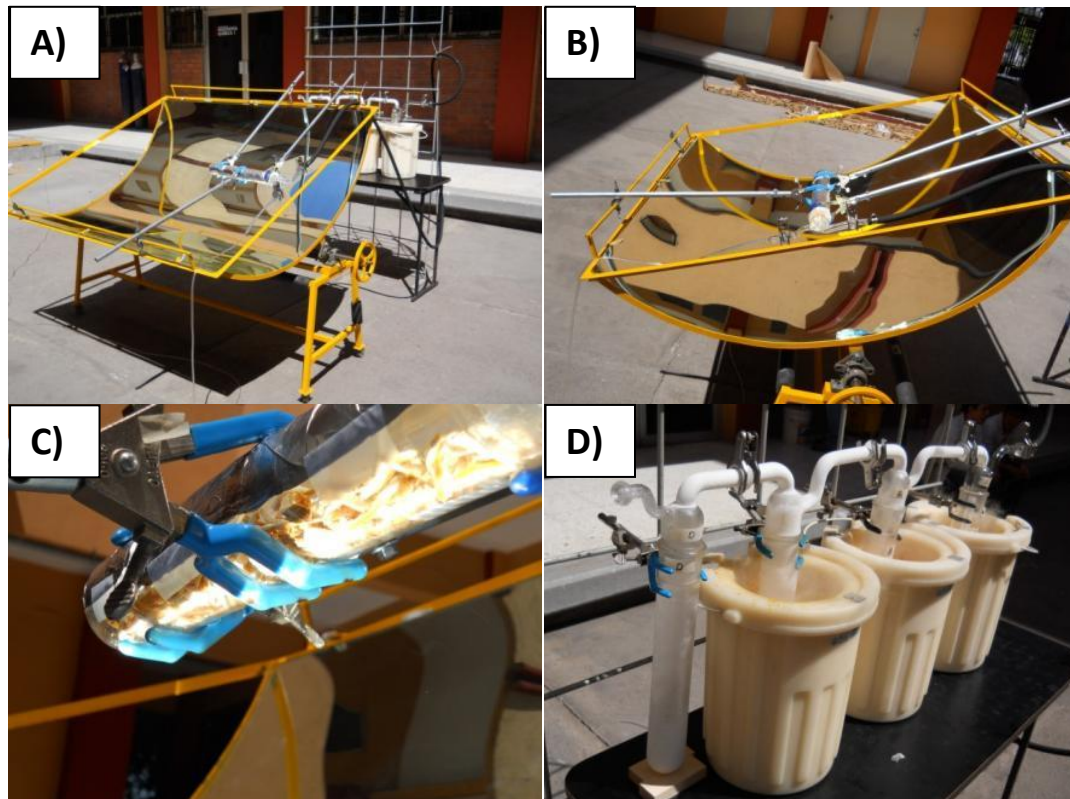


Figura 4.4- Registro fotográfico de pirólisis solar de biomasa. Fotografías realizadas el 21 de septiembre de 2011.

A) Configuración de equipo experimental para pirólisis de biomasa.

B) Reactor de vidrio PYREX acoplado al concentrador solar y conectado de manera transversal para evitar pasar las líneas de alimentación y salida por el foco.

C) Reactor de vidrio PYREX con la biomasa sobre el foco.

D) Tren de enfriamiento y lavadora de gases húmeda.

Los experimentos se corrieron bajo las condiciones de operación reportadas en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 - Condiciones de operación del sistema durante la pirólisis solar de biomasa.

	Tamaño de Partícula	Tiempo de Pirólisis	Temp. Ambiental	Presión de Operación	Flujo de gas acarreador	Biomasa	Fecha
	mm	s	°C	atm	ml/min	g	dd.mm.aa
Experimento 1	20x20x3	1230	28	1	359	50.1	19.09.2011
Experimento 2	30x3x3	10225	30	1	1068	30.1	21.09.2011

4.2.3 Método analítico

Se le realizó un análisis cualitativo y cuantitativo al aceite pirolítico recaudado en el tren de enfriamiento. La técnica utilizada fue cromatografía de gases acoplada a una espectrometría de masas. El cromatógrafo de gases es marca Agilent Technologies modelo 6890 que está acoplado a un espectrómetro de masas marca Agilent Technologies modelo 5973 Network. La columna utilizada es marca Agilent Technologies modelo HP5MS de 30 metros de longitud y 0.25 mm de diámetro. La temperatura inicial del horno fue de 50 °C con una isoterma de 5 minutos y una rampa posterior de +10 °C/min hasta alcanzar los 300 °C con una isoterma de 10 minutos. La temperatura del inyector fue de 250 °C, mientras que el espectrómetro se encontraba a 300 °C. Se inyectaron de 10-20 microlitros de muestra. El gas acarreador utilizado fue nitrógeno.

Para monitorear las variables del proceso se utilizó el sistema y equipo de medición descrito en el Capítulo 3.

4.2.4 Balance de materia y energía

El balance de materia se realizó utilizando principalmente el peso de la materia prima y comparándolo con el de los productos sólidos y el aceite pirolítico. Se asumirá que la diferencia entre el peso de materia prima contra productos sólidos y líquidos corresponde a productos gaseosos no condensables a menos de -200°C . La masa de productos líquidos comprenderá los productos recaudados en las 3 trampas del tren de enfriamiento. Igualmente se calculó el porcentaje de conversión de biomasa a producto líquido. El balance de materia se realizó utilizando las Ecuaciones 1-3. Este mismo sistema de ecuaciones fue utilizado por Miranda *et al.* (2009)⁵.

$$M_{\text{biomasa}} = M_{\text{sólidos}} + M_{\text{líquidos}} + M_{\text{gases}} \quad (1)^5$$

$$M_{\text{conversión}} = \frac{M_{\text{líquidos}}}{M_{\text{biomasa}}} \quad (2)^5$$

$$M_{\text{líquidos}} = M_{\text{líquido}}^{\text{Trampa 1}} + M_{\text{líquido}}^{\text{Trampa 2}} + M_{\text{líquido}}^{\text{Trampa 3}} \quad (3)^5$$

El balance de energía se realizará con los objetivos principales de calcular la temperatura alcanzada sobre la superficie del reactor y evaluar la eficiencia térmica del proceso. En el Capítulo 2 se observó que la irradiancia sobre el reactor sería constante en el eje axial pero cambiaría con respecto a la posición sobre la circunferencia. Teniendo esto en cuenta e intentando simplificar un poco el balance de energía, se propone un modelo isotérmico en los ejes axiales y radiales, sin embargo cambiante según la posición sobre la circunferencia. Se considerará que las pérdidas de calor al ambiente ocurrirán únicamente por radiación y convección, considerando despreciable las pérdidas

de calor por conducción con las pinzas que soportan el concentrador. Estas pérdidas al ambiente serán regidas por el coeficiente de transferencia de calor h sugerido por Kern, (1999) para cilindros horizontales de 2 pulgadas expuestos al ambiente²². Igualmente se tomaron los datos presentados en el Capítulo 2 respecto al desempeño de los materiales y el reactor como base para estos cálculos. Para este análisis se tomó como cierta la proposición de Jacques Lédé sobre la formación de un producto líquido intermediario antes de ocurrir la pirólisis de biomasa, por lo tanto se tomará la absorbancia de este producto como la absorbancia de la biomasa pues la que recibe directamente la alta irradiancia²³. Para evaluar la eficiencia energética del proceso, se realizó un análisis sobre las pérdidas térmicas. En este análisis, se calculó el porcentaje de energía perdido por ineficiencia óptica, operación del concentrador, y por pérdidas al ambiente. Para el balance de energía se modificó el método utilizado por Lédé, (1998) para cumplir con las consideraciones antes mencionadas¹⁹. El sistema de ecuaciones para el balance de materia se muestra a continuación (Ecuaciones 4-13):

$$dQ_{absorbido}^{solar} = \frac{dQ_{reactor}}{dM_{reactor}} + \frac{dQ_{biomasa}}{dM_{biomasa}} + \frac{dQ_{ambiente}^{perdido}}{dA} + \frac{dQ_{rxn}}{dM_{biomasa}} \quad (4)$$

$$dQ_{absorbido}^{solar} = dq_0[\alpha_{PYREX} + \tau_{PYREX}\alpha_{biomasa}] \quad (5)$$

$$\eta_{termoquimico}^{proceso} = 1 - \frac{Q_{ambiente}^{perdido} + Q_{optica}^{perdido} + Q_{operacion}^{perdido}}{I * A} \quad (6)$$

$$dq_0 = \varphi \eta_{optica} \eta_{operacion} dAdt \quad (7)$$

$$dQ_{reactor} = dM_{reactor} \int_{T_{\infty}}^{T_f} Cp_{PYREX} dT \quad (8)$$

$$dQ_{biomasa} = dM_{biomasa} \int_{T_{\infty}}^{T_f} C_{p_{biomasa}} dT \quad (9)$$

$$dQ_{perdido} = h(T_f - T_{\infty})dAdt \quad (10)$$

$$dQ_{rxn} = H_{rxn}dM_{biomasa} \quad (11)$$

$$\varphi = I(2 * 10^7 c^4 + 2 * 10^{-10} c^3 - 44828 c^2 - 3 * 10^{-13} c + 33) \quad (12)^{\ast}$$

$$h = 0.0001T^2 + .0358T + 12.192 \quad (13)^{\ast\ast}$$

Notas:

[∗] φ : [W/m²]; c: [m]. Ecuación obtenida con los resultados del análisis de trazado de rayos de Monte Carlo expuestos en la figura 3.9 del Capítulo 3.

^{∗∗} h: [W/m²°C]; T: [°C]. Ecuación propuesta por Kern para pérdidas de calor por radiación y convección en tubos horizontales de 2 pulgadas de diámetro expuestos al ambiente²².

4.2.5 Disposición de residuos

El proceso de pirólisis solar, no genera residuos de manera directa debido a que los productos sólidos, líquidos y gaseosos son sustancias deseadas las cuales fueron colectadas. Los residuos generados de manera indirecta como: guantes de laboratorio y papel para limpiar fueron tratados conforme a los reglamentos establecidos en el laboratorio de química I de la FCQ. En su mayoría fueron tratados como basura industrial.

4.3 Resultados y discusión

La pirólisis solar de la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) se realizó durante el primer experimento con 8.20 kW/m² y el segundo experimento con 12.55 kW/m². La diferencia en la irradiancia se debió a la irradiación disponible ese día y la habilidad del operador de enfocar el concentrador solar. El resumen de la operación del concentrador está reportado en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4

Resumen de la operación del concentrador.

Prueba	Irradiancia Promedio (W/m ²)	Concentración Promedio (Soles)	Irradiancia Pico (W/m ²)	Concentración Pico (Soles)	Eficiencia de concentración [‡] (%)
Experimento 1	8195	11.88	16376	19.80	60
Experimento 2	12553	20.28	25084	26.00	78

[‡] La eficiencia de concentración incluye las pérdidas por óptica y por operación del concentrador.

4.3.1 Resultados del balance de materia

Los resultados del balance de materia han sido considerablemente distintos entre los experimentos 1 y 2 (Tabla 4.5). En el primer experimento se observó una descomposición termoquímica de la biomasa de manera parcial y superficial. La pérdida de masa fue del 15.13% y los productos fueron: 7.31% a bioaceite, 7.82% a biogas y un 84.87% (% másico) permaneció sólido. La descomposición parcial de la biomasa en el primer experimento se debió a los siguientes factores: el tamaño de la partícula el cual promovía la ablación de la biomasa y la irradiancia relativamente baja con la que se llevó a cabo el experimento. Sin embargo, durante el segundo experimento se logró incrementar el nivel de conversión de la biomasa por medio de una reducción en el tamaño de partícula y se aumentó en la irradiancia. Durante el segundo experimento se observó que el volumen de las partículas disminuía considerablemente conforme la biomasa se descomponía debido a la pérdida de masa la cual fue del 79.08%. El producto mayoritario obtenido durante el segundo experimento fue bioaceite. La composición de los productos fue la siguiente: 77.64% bioaceite, 1.43% biogás y 20.93% carbón vegetal. La pérdida de masa del experimento 2 presenta una alta semejanza con la reportada por Miranda *et al.*, (2009) para la pirólisis de cáscara de naranja utilizando una

resistencia eléctrica en un reactor tubular de acero al carbón⁵ (Tabla 4.5). Sin embargo, la proporción de obtención de bioaceite y biogás se muestra con una discrepancia la cual se puede atribuir a tres posibles razones: la utilización de un método distinto de calentamiento, el uso de un reactor con una geometría distinta, o el uso de temperaturas superiores a -200°C en el tren de enfriamiento durante el experimento de Miranda *et al.*, (2009)⁵. La diferencia en los productos entre una pirólisis con calentamiento por irradiancia y otra por conducción ha sido igualmente reportado por Lédé, (2003) aunque en este caso para una pirólisis flash de celulosa utilizando una lámpara de xenón como fuente de radiación²⁰. Igualmente el uso de un reactor de geometría distinta puede influenciar sobre factores como la turbulencia del gas acarreador dentro del reactor, promoviendo así un desarrollo distinto de los fenómenos de transferencia de masa. Por último, debido a que el porcentaje de productos sólidos generados y el porcentaje de pérdida total de masa son similares entre esta investigación y la realizada por Miranda *et al.*, (2009), se abre la posibilidad de que el tren de enfriamiento para la recolección de líquidos de Miranda *et al.*, (2009) no fue enfriada hasta -200 °C lo cual pudo influir en la eficiencia de captación de líquidos (temperatura del tren de enfriamiento no reportada por el autor)⁵.

Tabla 4.5

Resultados de balance de materia de pirólisis solar y pirólisis tradicional de la cáscara de naranja *Citrus sinensis*.

	Experimento 1*	Experimento 2*	Miranda <i>et al.</i> (2009) ⁵
Tipo de pirólisis	Solar	solar	tradicional
Biomasa (g)	50.10	30.10	NR
Producto Líquido (g)	3.66	23.37	NR

Producto Sólido (g)	42.52	6.30	NR
Producto Gaseoso (g)	3.92	0.43	NR
Pérdida de masa (g)	7.58	23.80	NR
% Pérdida de masa	15.13	79.07	80
% Bioaceite	7.31	77.64	53.1
% Biogas	7.82	1.43	25.8
% Sólido	84.87	20.93	21.1

* Resultados del presente trabajo

4.3.2 Resultados del análisis de transferencia de calor

El sistema de ecuaciones para el balance de energía se resolvió utilizando como apoyo algunos valores reportados por otros investigadores o medidos en campo durante el presente trabajo (Apéndice III).

La Figura 4.5 muestra el perfil de temperatura sobre la superficie del reactor. El origen del eje de las abscisas representa la zona del reactor ubicada en el centro de la línea focal, siendo esta la zona de mayor temperatura por ser la que recibe la más alta irradiancia. La temperatura promedio del reactor en la zona que recibe la irradiancia es de 203 y 290 °C para el experimento 1 y 2 respectivamente. En ambos casos se ha logrado alcanzar temperaturas pirolíticas. La temperatura alcanzada en el punto de irradiancia pico para el experimento 1 fue de 343 °C y para el experimento 2 de 465 °C. El haber alcanzado una mayor temperatura en el segundo experimento es solo un resultado por haber operado bajo una mayor irradiación, tener una carga menor de biomasa en el reactor y haber alcanzado una mayor eficiencia de operación del concentrador. La temperatura promedio de 290 °C concuerda con la temperatura de operación de 300 °C para los concentradores marca Solel Solar Systems modelo IND-300 con un ancho de apertura idéntico al utilizado en el presente trabajo (1.3 m) ²⁴. Durante la operación, los termómetros de papel

sobre la línea focal registraron ≥ 182 °C por ser la temperatura máxima de medición, sin embargo el termómetro de papel ubicado en la orilla de la línea focal registró una temperatura de ≤ 143 °C por ser la medición mínima posible. Esto concuerda con el balance de energía realizado en este trabajo que propone una temperatura ~ 50 °C para esa zona. El perfil de temperatura presentado sugiere que el encogimiento que sufre la biomasa durante la degradación irá acercando la materia prima de las orillas más frías al centro más caliente, favoreciendo así al proceso de pirólisis. La Tabla 4.6 muestra el desempeño reportado para distintos concentradores solares tipo parabólicos. Como se puede observar, la temperatura de operación promedio aumenta conforme aumenta el ancho de apertura. El concentrador solar IND-300 marca Solel de un ancho de apertura igual al construido para el presente proyecto reporta una temperatura promedio de 300 °C, es decir solamente 10°C superior a la reportada en esta tesis. Igualmente se puede observar que en caso de ser necesario operar a mayores temperaturas, es posible utilizar un concentrador cilindro-parabólico con un ancho de apertura de hasta 5.76m y llegar hasta los 390 °C.

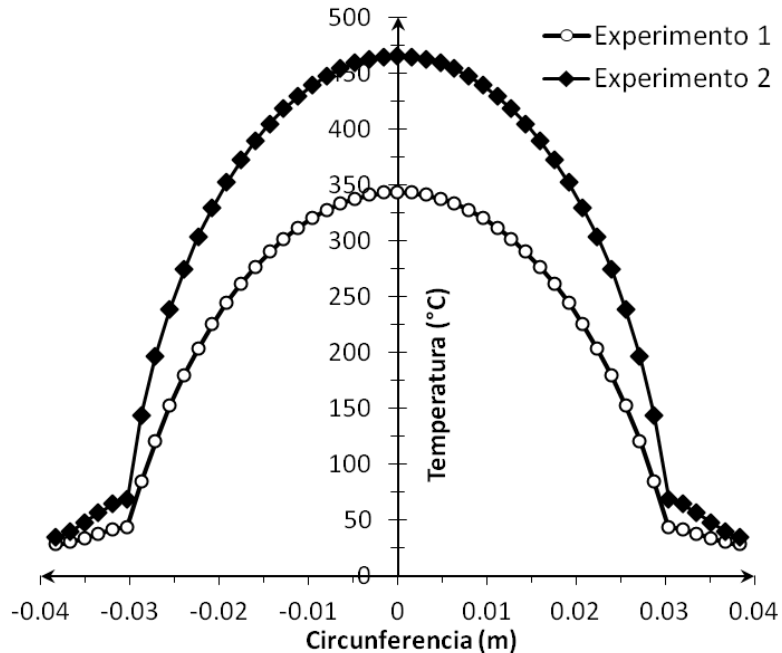


Figura 4.5- Perfil de temperatura a través de la circunferencia del reactor. El origen de las abscisas representa el centro de la línea focal.

Tabla 4.6

Desempeño de distintos concentradores solares tipo cilindro parabólicos.

Marca	Modelo	Escala de Producción	Ancho de Apertura (m)	Temperatura de Operación (°C)
AEE INTEC ²⁴	Parasol	Prototipo	0.5	200
Soliterm ²⁴	PTC 1000	Prototipo	1	200
UANL FCQ*	PROMETO 01	Prototipo	1.3	290
Solel Solar Systems ²⁴	IND-300	Comercial	1.3	300
Acurex Corp. ²⁴	3001	Comercial	1.83	320
Acurex Corp. ²⁴	3011	Comercial	2.13	320
Solar Kinetics Inc. ²⁴	T-700	Comercial	2.13	350
Instituto de Investigaciones Electricas ²⁴	IIE	Prototipo	2.3	400
Solar Kinetics Inc. ²⁴	T-800	Comercial	2.36	320
Luz International Ltd. ²⁴	LS-1	Comercial	2.5	307
Suntec Systems Inc. ²⁴	IV	Comercial	3.05	320
Luz International Ltd. ²⁴	LS-2	Comercial	5	349
Luz International Ltd. ²⁴	LS-3	Comercial	5.76	390

* Presente trabajo. Concentrador solar diseñado y construido por la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

La temperatura promedio durante el experimento 1 (203 °C) revela que la descomposición de la cáscara de naranja no llegó a ser total según el análisis

termogravimétrico reportado por Miranda *et al.*, (2009) que sugiere un máximo de pérdida de masa de ~28% a dicha temperatura⁵. Esto igualmente se comprueba a través del balance de materia que revela una pérdida de masa de 15.13% en la experimentación del presente trabajo. Siendo este valor inferior al del análisis termogravimétrico, se infiere que aparte de la temperatura de operación existieron otros factores presentes que desfavorecieron la pirólisis, como el tamaño de partícula de la biomasa el cual fue lo suficientemente grande como para generar una resistencia a la transferencia de calor hacia el interior e igualmente pudo promover otros fenómenos como la ablación de la superficie.

Durante el experimento 2 se alcanzó una descomposición mayor a la esperada. A una temperatura de 290 °C se esperaría una pérdida de masa del 67% según lo reportado para la pirólisis de cáscara de naranja calentada con una resistencia eléctrica (Miranda *et al.*, 2009), sin embargo se obtuvo una pérdida de masa del 79% que equivale a lo reportado para 420°C⁵. El aumento en la eficiencia de la descomposición termoquímica por alta irradiancia solar comparada contra el calentamiento por resistencias eléctricas o por láser ha sido reportado por diversos investigadores, sin embargo la razón de este fenómeno aun sigue siendo tema de un arduo debate. Las teorías actuales que explican esta mejora en la eficiencia son las siguientes:

- Dellinger *et al.* (1990) propone que existe una fotólisis generada por longitudes de onda de la luz ultravioleta e incluso también de la luz visible. Esto sucede debido a un elevado bombardeo de fotones lo cual ya fue comprobado en la descomposición termoquímica del 3,3',4,4'-tetraclorobifenil expuesto a 95

soles emitidos por una lámpara de xenón. La descomposición del 80% del compuesto se logró a 490°C por método solar, mientras que por método eléctrico se alcanzó el mismo nivel de descomposición a 690 °C. Además, la generación del tetraclorodibenzofurano como producto intermedio de la descomposición se vio igualmente alterada, sugiriendo así que el mecanismo de reacción pudo haber sido alterado ²⁶.

- Lédé, (2003) observó el mismo resultado en la descomposición de celulosa expuesto a una irradiancia emitida por una lámpara de xenón. Lédé concluye que la transmitancia de la biomasa en partículas de un diámetro inferior a 3 mm permite que la irradiancia llegue hasta el centro de la misma, disminuyendo la resistencia a la transferencia de calor comparado con el uso de resistencias eléctricas que calientan la partícula por fuera y promoviendo la descomposición química a menores temperaturas de operación ²⁰.

- Beattie, (1983) observó el mismo aumento en la eficiencia de la descomposición por pirólisis solar de carbón mineral comparada con la pirólisis por láser. En esta investigación se propone que la irradiancia incidida sobre el reactor tiene la forma de una gaussiana y esto produce que la transferencia de calor cambie en gran medida y crea zonas donde se alcanzan temperaturas puntuales más altas a la temperatura promedio donde ocurre la descomposición. Igualmente refuta la opción de la fotólisis al haber instalado filtros para longitudes de onda ≤ 350 nm. Sin embargo, en este trabajo no se discute la fotólisis a longitudes de onda mayor ¹⁷.

- Tabatabaie-Raissi *et al.*, (1989) se encontró con el mismo fenómeno durante la pirólisis de celulosa bajo la irradiancia de una lámpara de celulosa y propone como posible explicación una autocatálisis promovida por los mismos productos de la pirólisis, mencionando al ácido fórmico y acético como los posibles responsables ¹⁸.

El balance de energía permitió realizar un análisis de las pérdidas de calor que se tuvieron durante las corridas experimentales (Tabla 4.7). Este análisis ha servido para dilucidar áreas de oportunidad del proceso que podrán ser atacadas en futuras investigaciones. Se observó que conforme la temperatura de operación aumenta, las pérdidas de calor al ambiente pueden llegar a convertirse en una fuga energética considerable, como lo fue durante el experimento 2 (290 °C). Igualmente se ha encontrado que la eficiencia con la que se enfoca y opera el concentrador solar es un factor determinante para poder alcanzar una pirólisis solar completa. La pérdida de la irradiancia debido a la reflectividad de la biomasa fue de 29.38%. Este factor puede ser el más difícil de mejorar por ser una propiedad intrínseca de la materia prima, sin embargo Lédé *et al.*, (2002) han reportado mejoras en la absorptividad durante una pirólisis flash en un ambiente solar simulado cuando mezcló la materia prima (celulosa) con carbón¹⁶. Aun así, un cambio de esta naturaleza en la composición de la materia prima tendrá efectos contundentes sobre los productos obtenidos. Por otro lado, las pérdidas ópticas del concentrador (4.1%) no generaron fugas energéticas alarmantes. Por último se observa que la eficiencia térmica del proceso disminuye conforme aumenta la irradiancia

debido a la reflectividad de la biomasa y a un aumento de la temperatura que acentúa las pérdidas de calor con el ambiente.

Tabla 4.7

Análisis de las pérdidas energéticas de la pirólisis solar.

Parámetro	Experimento 1		Experimento 2	
	Magnitud (kJ)	Porcentaje (%)	Magnitud (kJ)	Porcentaje (%)
Energía solar disponible	665.16	100.00	5130.78	100.00
Energía perdida por óptica del concentrador	27.27	4.10	210.36	4.10
Energía perdida por operación del concentrador	255.15	38.36	1082.49	21.10
Energía perdida por reflectividad de biomasa	193.66	29.12	1941.99	37.85
Calor perdido al ambiente	143.74	21.61	1858.95	36.23
Eficiencia térmica del proceso	NA [‡]	6.81	NA [‡]	0.72

[‡] NA: No Aplica

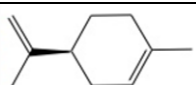
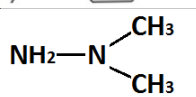
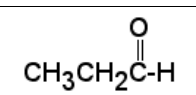
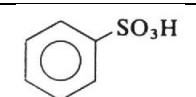
4.3.3 Análisis cualitativo y cuantitativo del bioaceite

El análisis de cromatografía de gases acoplado a la espectrometría de masas sobre el bioaceite reveló que en el experimento 1 y experimento 2 no se produjeron los mismos compuestos. En el primer experimento se encontró como componente mayoritario el D-limoneno el cual se presentó en un 3.59% másico de la biomasa alimentada al reactor. Igualmente se encontraron compuestos aromáticos, fenol, alquenos e hidracina. En la Tabla 4.8 se pueden observar los compuestos mayoritarios identificados para el bioaceite producido en el experimento 1. Durante el experimento 2, se obtuvo la (Z)-9-octadecenamida como el compuesto principal del bioaceite. Este compuesto se presentó en un 27.6 % másico del bioaceite que implica una conversión del 24.43% de la cáscara de naranja a este compuesto. La (Z)-9-octadecenamida es también conocida como oleamida la cual está comprobado que puede inducir el sueño sobre animales como las ratas y los seres humanos. Por esta misma

característica se está estudiando como un posible medicamento para el tratamiento para pacientes con desórdenes del sueño ²⁶⁻²⁸. Otros de los compuestos encontrados en cantidad considerable en el bioaceite generado durante el experimento 2 fueron: di-isooctil-ftalato (11.99%), escualeno (8.13%), D-limoneno (6.06%), fenol (2.17%), etc. (Tabla 4.9). El escualeno se utiliza como precursor en la síntesis de esteroides²⁹ e igualmente se utiliza como componente de las vacunas FLUAD y Chiron para evitar la influenza como parte del adyuvante ³⁰. El D-limoneno es un terpeno de baja toxicidad utilizado ampliamente en la industria de los alimentos como un saborizante, mientras que en el campo de la medicina es utilizado para tratar la litiasis biliar y actualmente se está probando como tratamiento contra el cáncer de seno y de colon³¹. La composición del bioaceite abre la posibilidad de utilizarlo no solo como combustible, sino en la producción de productos de alto valor como productos para la industria química y producción de medicamento.

Tabla 4.8

Caracterización del bioaceite resultante del Experimento 1. Bioaceite producido por pirólisis solar de cáscara de naranja. Tamaño de partícula pirolizada 20x20x3 mm.

Producción (g)	Composición (% másico)	Conversión de biomasa (% másico)	Especie	Estructura
1.80	49.11	3.59	D-Limoneno	
0.64	17.57	1.28	1,1-dimetil Hidracina	
0.35	9.61	0.70	Propanal	
0.18	4.86	0.36	Ácido bencenosulfónico	

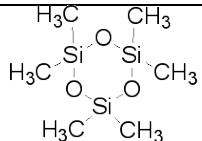
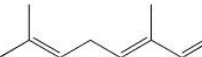
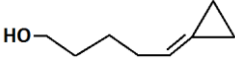
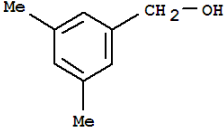
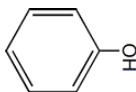
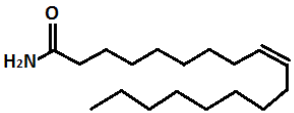
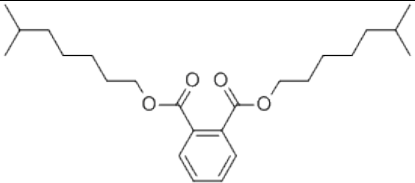
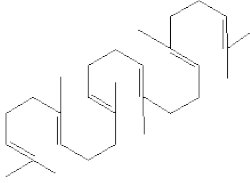
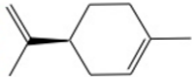
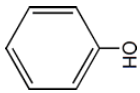
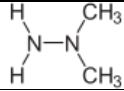
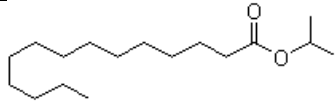

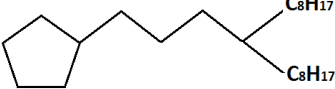
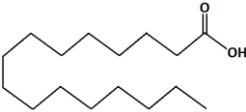
0.16	4.38	0.32	Hexametil-ciclotrisiloxano	
0.12	3.26	0.24	(Z) 3,7-dimetil-1,3,6-Octatrieno	
0.06	1.60	0.12	5-cyclopropilideno- 1-Pentanol	
0.05	1.46	0.11	3,5-dimetil-benzenometanol	
0.04	1.22	0.09	Fenol	
0.25	6.93	0.51	Mezcla de compuestos existentes en concentración <1%	
3.66	100	7.31	Total	

Tabla 4.9

Caracterización del bioaceite resultante del Experimento 2. Bioaceite producido por pirólisis solar de cáscara de naranja. Tamaño de partícula pirolizada 30x3x3 mm.

Producción (g)	Composición (% másico)	Conversión de biomasa (%másico)	Especie	Estructura
6.45	27.60	21.43	(Z)-9-Octadecenamida	
2.80	11.99	9.31	Di-isooctil-ftalato	
1.90	8.13	6.31	Escualeno	
1.82	7.80	6.06	D-Limoneno	

0.51	2.17	1.69	Fenol	
0.39	1.65	1.28	1,1-dimetil Hydrazina	
0.34	1.47	1.14	Miristato de isopropilo	
0.34	1.47	1.14	Ácido hexil ester decanóico	
0.33	1.40	1.09	(4-octildodecil)- ciclopentano	
0.27	1.17	0.91	Ácido n- Hexadecanóico	
8.21	34.18	27.28	Mezcla de compuestos existentes en concentración <1%	
23.37	100	77.64	Total	

Los compuestos con contenido de nitrógeno como la hidracina y la (Z)-9-octadecenamida de el contenido de nitrógeno existente en la cáscara de naranja encontrado en el análisis elemental (Tabla 4.2). Las amidas suelen producirse durante la pirólisis de biomasa con contenido de nitrógeno el cual se encuentra en la materia prima en forma de proteínas³²⁻³⁵, sin embargo si el reactor se encuentra a temperaturas pirolíticas en su totalidad, las amidas se descomponen en HCN, NH₃ y HNCO y se reflejan como gases incondensables³²⁻³³. En el caso de la pirólisis solar en donde solamente la biomasa y parte del reactor inferior es la que llega a temperaturas pirolíticas, la descomposición de las amidas nunca sucede. Lédé, (2003) reportó este mismo efecto de la heterogeneidad de la temperatura del reactor quien propone la

pirólisis solar como un método para estudiar los compuestos generados directamente por la pirólisis sin que estos continúen descomponiéndose antes de abandonar el reactor²⁰. Esto por pasar de una zona de temperaturas pirolíticas a otra más fría casi de manera inmediata. Igualmente, Sanchez *et al.*, (2009) comprobó que durante la pirólisis de los lodos de aguas residuales, las amidas se producen en mayor cantidad a 350 °C y conforme la temperatura del reactor aumentaba, la producción de amidas disminuía. Basándose en la información anterior, se asume que la razón por la que los compuestos con nitrógeno no aparecen reportados en el bioaceite generado por Miranda *et al.*, (2009)⁵ es debido a que estos se descompusieron a lo largo del reactor. Específicamente, la (Z)-9-octadecenamida es una amida proveniente del ácido oleico y Volli y Singh, (2012) lo reportaron como componente mayoritario en la pirólisis eléctrica de la pasta de sésamo (16% peso) operando a 300°C³⁶.

4.4 Conclusiones

Durante la pirólisis solar de cáscara de naranja estudiada durante la presente investigación, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La pirólisis solar de cáscara de naranja se muestra técnicamente factible alcanzando una pérdida de masa de 79% peso, siendo la composición de los productos: 77.64, 1.43, y 20.93% peso de bioaceite, biogás y carbón vegetal respectivamente.
2. El tamaño de partícula tiene un efecto considerable sobre la eficiencia de la pirólisis solar, siendo las partículas de mayor tamaño las más difíciles de

pirolizar. La cáscara de naranja triturada a 30x3x3 mm puede descomponerse hasta en un 79% peso bajo una irradiancia promedio de 12.55 kW/m².

3. Un reactor de vidrio PYREX de 2 pulgadas de diámetro exterior puede elevarse hasta una temperatura promedio de 290 °C y alcanzar una temperatura máxima en el centro de la línea focal de 465 °C utilizando un concentrador cilindro parabólico con un ancho de apertura de 1.3 m.

4. Las fugas energéticas más importantes operando a 290 °C son: la energía reflejada por las propiedades ópticas de la biomasa (37.85% de la energía solar disponible) y la pérdida de calor del reactor al ambiente por convección y radiación (36.85% de la energía solar disponible).

5. La especie química encontrada en mayor medida (27.60% peso) en el bioaceite generado por una pirólisis solar fue la (Z)-9-Octadecenamida. Además se identificaron el Di-isooctil-ftalato, escualeno, D-Limoneno, fenol, entre otros.

6. El bioaceite generado por la pirólisis solar de cáscara de naranja presenta un contenido mayor de amidas comparado con la llevada a cambio en un reactor con calentamiento por resistencia eléctrica. Esto es debido a la heterogeneidad de la temperatura en el reactor lo cual evita la descomposición de las aminas a lo largo del reactor.

A pesar de que en este capítulo se ha demostrado una factibilidad técnica de llevar a cabo la pirólisis solar de la cáscara de naranja, sin embargo, es necesario conocer el nivel de sustentabilidad del proceso y si este es realmente una posible solución a los problemas medioambientales que enfrenta el mundo actualmente. El Capítulo 5 aborda este análisis de sustentabilidad que cuantifica en materia ambiental el avance logrado en el presente trabajo.

4.5 Referencias

- 1 Basu P. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design. Academic Press, Ed. 1, USA, p. 1-13 (2010).
- 2 Milne T.A., Evans R. Molecular Characterization of the pyrolysis of biomass. 1 Fundamentals. *Energy and Fuels*. 1: 123-127(1987).
- 3 Cypres R., Ibarra J.V., Moliner R., Miranda J.L. Pyrolysis under H₂ and He of utrillas coal. *Fuel*. 67: 464-468 (1988).
- 4 Miranda R., Sosa_Blanco C., Bustos-Martínez D., Vasile C. Pyrolysis of textile wastes I. Kinetics and yields. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 80: 489-495 (2007).
- 5 Miranda R., Bustos-Martinez D., Sosa Blanco C., Gutiérrez Villareal M.H., Rodríguez Cantú M.E. Pyrolysis of sweet orange (*Citrus sinensis*) dry peel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 86: 245-251 (2009).
- 6 Varanasi S., Maddi B., Viamajala S. Comparative study f pyrolysis of algal biomass from natural lake blooms with lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 102: 11018-11026 (2011).
- 7 Bridgwater A.V., Grassi G. Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization, Elsevier, UK, (1992).
- 8 International Energy Agency. Biofuels for Transport. OECD, Ed. 1, Francia, p. 33-47 (2004).
- 9 Kirtania K., Bhattacharya S. Application of the distributed activation energy model to the kinetic study of pyrolysis of the fresh water algae *Chlorococcum humicola*. *Bioresources Technology*. (2011).
- 10 Van de Velde M., Baeyens J., Brems A., Janssens B., Dewil R. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. *Renewable energy*. 35(1):323-242 (2010).
- 11 Hertwich E.G., Zhang X. Concentrating-Solar Biomass Gasification Process for a 3rd Generation Biofuel. *Environmental Science Technology*. 43: 4207-4212. (2009).
- 12 Steinfeld A., Z'Graggen A., Haueter P., Maag G., Vidal A., Romero M. Hydrogen production by steam-gasification of petroleum coke using concentrated solar power – III. Reactor experimentation with slurry feeding. *International journal of hydrogen energy*. 32: 992-996 (2007).
- 13 Petrasch J., Osch P., Steinfeld A. Dynamics and control of solar thermochemical reactors. *Chemical engineering journal*. 145: 362-370 (2009).
- 14 Lichty P., Perkins C., Woodruff B., Bingham C., Weimer A. Rapid high temperature solar thermal biomass gasification in a prototype cavity reactor. *Journal of solar energy engineering*. 132: (011012)1-7 (2010).
- 15 Steinfeld A., Z'Graggen A. Heat and mass transfer analysis of a suspension of reacting particles subjected to concentrated solar radiation – Application to the steam-gasification of carbonaceous materials. *International journal of heat and mass transfer*. 52: 385-395 (2009).
- 16 Lédé J., Boutin O., Ferrer M. Flash pyrolysis of cellulose pellets submitted to a concentrated radiation: experiments and modelling. *Chemical Engineering Science*. 57: 15-25 (2002).
- 17 Beattie, W. High-temperature solar pyrolysis of coal. *Solar Energy*. 31: 137-143 (1983).
- 18 Tabatabaie-raissi A., Mok W.S.L., Antal M.J. Cellulose pyrolysis kinetics in a simulated solar environment. *Ind. Eng. Chem. Res*. 28: 856-865 (1989).
- 19 Lédé J., Boutin O., Ferrer M. Radiant flash pyrolysis of cellulose – Evidence for the formation of short life time intermediate liquid species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 47: 13-31 (1998).
- 20 Lédé J. Comparison of contact and radiant ablative pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 70: 601-618 (2003).

- 21 Babu B.V., Chaurasia A.S. Heat transfer and kinetics in the pyrolysis of shrinking biomass particle. *Chemical engineering science*. 59: 1999-2012 (2004).
- 22 Kern D. Process heat transfer. MacGraw Hill, Ed. 31, USA. p. 34 (1999).
- 23 Lédé J., Boutin O., Olalde G., Ferriere A. Solar flash pyrolysis of biomass direct measurement of the optical properties of biomass components. *Journal of Physics IV France*. 9: 369-372 (1999).
- 24 Fernández-García, A., Zarza E., Valenzuela, L., Pérez, M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14: 1695-1721 (2010).
- 25 Dellinger B., Graham J., Berman J.M., Klosterman D. High temperature photochemistry induced by concentrated solar radiation. Workshop on potential applications of concentrated solar photons, NRC. Colorado (1990).
- 26 Huitron-Resendiz S., Gombart L., Cravatt B.F., Henriksen S.J. Effect of oleamide on sleep and its relationship to blood pressure, body temperature and locomotor activity in rats. *Experimental neurology*. 172 (1):235-243.
- 27 Fedorova I., Hashimoto A., Fecik R.A. Behavioral evidence for the interaction of oleamide with multiple neurotransmitter system. *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 299 (1): 332-42.
- 28 Cravatt B.F., Prospero-Gracia O., Siuzdak G., Gilula N.B., Henriksen S.J., Boger D.L., Lerner R.A. Chemical characterization of a family of brain lipids that induce sleep. *Science*. 268 (5216):1506-1509.
- 29 Konrad B.E. Sterol, structure and membrane function. *Critical reviews in biochemistry and molecular biology*. 14: 47-92 (1983).
- 30 World Health Organization. Squalene-based adjuvants in vaccines, Global Advisory Committee on Vaccine Safety, (2008).
<http://www.who.int/vaccine_safety/topics/adjuvants/squalene/questions_and_answers/en/> Fecha de Acceso: 30 de Enero de 2012.
- 31 Sun, J. D-limonene: safety and clinical applications. *Alternative medicine review*. 12(3): 259-264 (2007).
- 32 Hansson K.M., Samuelsson J., Tullin C., Amand L.E. Formation of HNCO, HCN, NH₃ from the pyrolysis of bark and nitrogen-containing model compounds. *Combustion and flame*. 137: 265-277 (2004).
- 33 Di Blasi, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34: 47-90 (2008).
- 34 Fonts I., Azuara M., Gea G., Murillo M.B. Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 85: 184-191 (2009).
- 35 Monreal C.M., Schnitzer M., Facey F.A., Fransham P.B. The conversion of chicken manure to biooil by fast pyrolysis chicken manure, biooils and char by ¹³C and ¹H NMR and spectrophotometry. *Journal of environmental science and health*. 42 (1): 71-77 (2007).
- 36 Volli V., Singh R.K. Production of bio-oil from de-oiled cakes by thermal pyrolysis. *Fuel*. 96:579-585 (2012).

CAPÍTULO 5

5. INVENTARIO DE EMISIONES

5.1 Introducción

La evaluación del nivel de sustentabilidad de un proceso permite localizar áreas de oportunidad para la mejora. Además, en el caso del presente trabajo, ayudará a cuantificar de manera objetiva las mejoras logradas y se podrán identificar posibles avances o retrocesos en la reingeniería realizada sobre el proceso de la pirólisis de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) desarrollado por Miranda *et al.*, (2009) ¹.

Actualmente existen distintos estándares y normas con los cuales se puede realizar un análisis de la sustentabilidad de un producto o proceso, como: la norma ISO 14031², ISO 14044³, ISO 14064⁴, Protocolo de Kyoto⁵, Guía para la elaboración y uso de inventario de emisiones del Instituto nacional de ecología de México (INE)⁶, PAS 2050⁷, y el Protocolo de gases de efecto invernadero: estándar de conteo y reporte para productos 2011⁸. Este último es el que se ha seleccionado para realizar el análisis y comparación de huella de carbono entre distintos procesos de pirólisis y combustibles líquidos, por ser el protocolo más completo y recomendado por el Programa GEI México⁹. El Programa GEI México es un programa nacional voluntario de contabilidad y

reporte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el cual está liderado por la Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT) y la Comisión de estudios del sector privado para el desarrollo sustentable del consejo coordinador empresarial. Igualmente, a nivel internacional está abalado por el Instituto de recursos del mundo (World resources institute) de origen estadounidense y el Consejo para el desarrollo sustentable de negocios mundiales (World business council for sustainable development) de origen suizo⁸.

El Protocolo para gases de efecto invernadero: estándar de conteo y reporte para productos 2011 es uno de los más robustos, completos, y recientes que se haya publicado. La primera versión de este protocolo se publicó en el 2004 y actualmente existe en el mercado la tercera versión publicada en el 2011. Durante el análisis realizado por el presente trabajo se empleará la tercera versión del protocolo. Esta norma se creó con el objetivo de proveer los requerimientos y lineamientos para el conteo de las emisiones generadas por un producto y por la cadena de suministro de manera confiable y auditable. La confiabilidad del análisis realizado se evalúa por medio de un análisis de incertidumbre realizado sobre la información recolectada y el conteo de huella de carbono realizado. Además, provee de los parámetros para realizar comparaciones entre las emisiones de distintos productos de manera válida y objetiva⁸. Son estas las características que ponen al Protocolo para gases de efecto invernadero: estándar de conteo y reporte para productos 2011 por encima de los demás, sin embargo no quiere decir que las otras normas se

encuentren equivocadas, sino que este estándar cumple con los requerimientos exigidos por todos los otros y los complementa.

Cabe recalcar que el siguiente análisis cumplirá con los requerimientos que establecen los siguientes organismos e instituciones^{8,9}:

1. **Consejo coordinador empresarial:** Programa de gases de efecto invernadero México.
2. **Consejo para el desarrollo sustentable de negocios mundiales:** Protocolo para gases de efecto invernadero: estándar de conteo y reporte para productos 2011.
3. **Convención de las naciones unidas para el cambio climático:** Protocolo de Kioto.
4. **Instituto de estandarización británica:** PAS 2050.
5. **Instituto de recursos del mundo:** Protocolo para gases de efecto invernadero: estándar de conteo y reporte para productos 2011.
6. **Organización internacional de estandarización:** ISO 14031, ISO 14044, e ISO 14064.
7. **SEMARNAT:** Ley general de equilibrio ecológico y protección al ambiente.

Como lo requiere el estándar de conteo y reporte para productos 2011, el siguiente análisis se llevará a cabo utilizando los siguientes criterios de decisión: relevancia, completo, consistencia, transparencia, y precisión⁸.

El objetivo principal de este capítulo es el contabilizar la huella de carbono del biocombustible generado por medio de una pirólisis solar y la

pirólisis realizada por Miranda *et al.*, (2009)¹. Así mismo, comparar los resultados de ambos inventarios y proponer mejoras de proceso para disminuir la emisiones.

5.2 Metodología

El análisis del inventario de emisiones de GEI se realizó según los requerimientos establecidos por el Protocolo para GEI. Este comprende de 4 etapas básicas: definición de alcance del inventario, análisis de ciclo de vida, cálculo de huella de carbono, y un análisis de incertidumbre⁸ (Figura 5.1). El lector deberá tomar en cuenta que este análisis se realizó para un proceso a escala banco, el cual se acerca al tamaño del equipo industrial, sin embargo es posible que exista diferencia en este inventario para una escala de producción a nivel industrial.

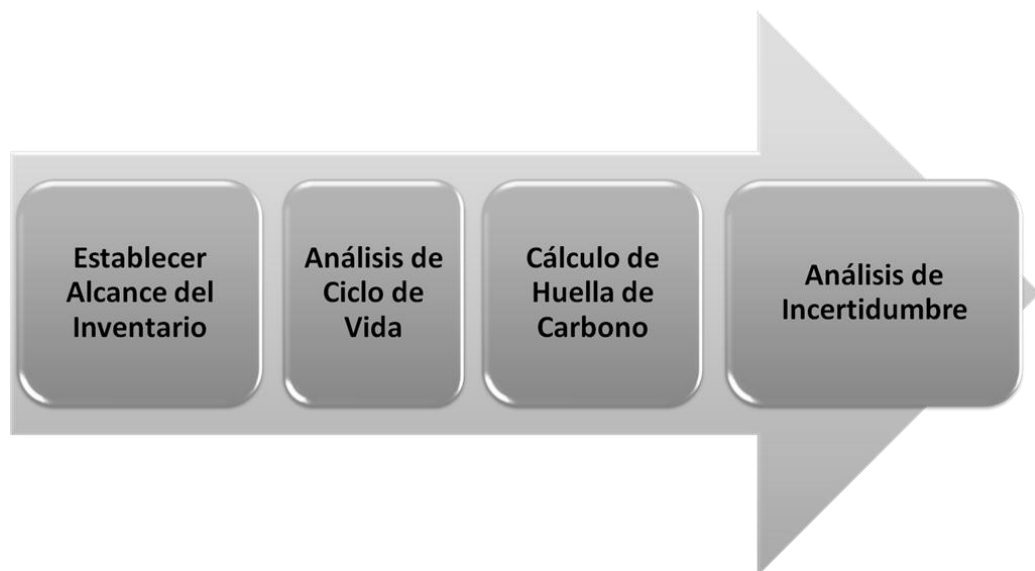


Figura 5.1 - Etapas de análisis del nivel de sustentabilidad.

5.2.1 Alcance de inventario

Se ha definido el alcance del inventario de GEI definiendo el producto de estudio, unidad funcional, unidad de análisis, flujo de referencia, y productos finales (Tabla 5.1). Se utilizó la misma frontera para el inventario del biodiesel producido por pirólisis solar y para el biodiesel generado por Miranda *et al.*, (2009)¹.

Tabla 5.1

Frontera del inventario de emisiones realizado para el biodiesel producido por pirólisis solar y para el biodiesel producido por Miranda *et al.*, (2009).

Parámetro	Concepto	Definición
Producto de Estudio	Producto por el cual se realiza este análisis	Biodiesel
Unidad Funcional	Base cuantitativa de la necesidad del usuario	100 MJ, producidos durante la combustión de un líquido en máximo 1 hora
Unidad de Análisis	Base cuantitativa para producto de estudio	1 kg de combustible tipo diesel
Flujo de Referencia	Flujo de producto para satisfacer la unidad funcional	2.66 kg
Productos Finales	Productos generados durante la pirólisis	Biodiesel, biogas, y carbón vegetal

La huella de carbono de los activos fijos necesarios para montar una línea de producción se ha dejado fuera del alcance de este análisis. Esto es debido a que sería necesario conocer los parámetros específicos de la planta manufacturera e incluir factores regionales, temporales y las características del equipo. A falta de esta información se considerarán solamente las entradas de proceso (energía y materia prima) como fuentes responsables de GEI.

5.2.2 Análisis de ciclo de vida

Se realizó un análisis de ciclo de vida de tipo cuna-a-tumba ("Cradle-to-grave") y de cuna-a-puerta ("Cradle-to-gate") para el biodiesel por ser el producto de estudio. El análisis de cuna-a-tumba consta de 5 etapas: adquisición de materia prima, producción, distribución y almacenamiento, uso y fin de vida (Figura 5.2); mientras que el análisis de cuna-a-puerta comprendió solamente las primeras 2 etapas antes mencionadas⁸.

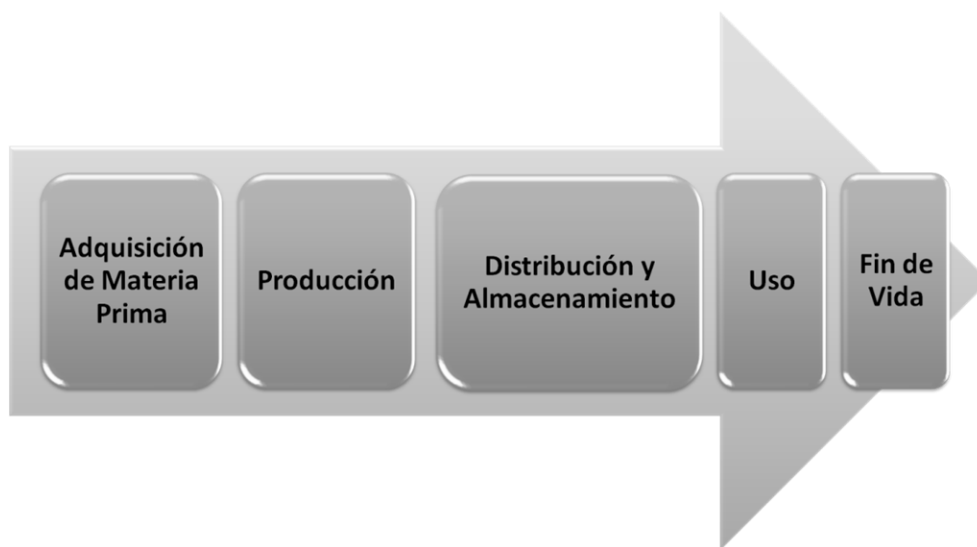


Figura 5.2 - Etapas de ciclo de vida tipo de cuna-a-tumba de un producto.

La etapa de producción se subdividió a la vez en: secado, molienda, descomposición termoquímica, y recuperación de productos de alto valor. Esto comprende el pre-tratamiento que lleva la biomasa antes de ser pirolizada y el proceso de pirólisis.

5.2.3 Cálculo de la huella de carbono

Se realizó un cálculo de la huella de carbono de los productos a lo largo de su vida útil. Para la asignación de la huella de carbono a cada producto final

durante las etapas de adquisición de materia prima y de producción, se utilizó el método de asignación por un parámetro físico, en este caso: fracción másica.

El cálculo de la huella de carbono se realizó con la Ecuación 1 lo sugiere el Protocolo⁸.

$$\textit{Emisión de GEI} = \textit{Unidad Consumida} * \textit{Factor de Emisión} \quad (1)^8$$

De acuerdo con el protocolo utilizado en el presente trabajo, se considerará que utilizar la cáscara de naranja tiene un impacto de disminución de GEI por ser un desecho agroindustrial que de otra manera sería un remanente de un proceso con un impacto negativo sobre el medio ambiente⁸.

Se considerará como vehículo de transporte un camión marca Mercedes Benz modelo Actros 2012 con un motor 12.0 V6 de 320 hp y una capacidad de carga de 25 ton. La trituradora de referencia será la Bel-Art modelo Scienceware H37252, por ser la disponible en el Laboratorio de ingeniería química I de la FCQ. El secador utilizado dispone de un motor eléctrico de 1 hp de potencia y está ubicado en el Laboratorio de ingeniería química de la Escuela de graduados de la FCQ. El lugar de origen de la cáscara de naranja se considerará el centro de Montemorelos, por ser el municipio con la mayor producción de naranja de Nuevo León¹². El lugar de producción la Facultad de ciencias químicas de la UANL, y el centro de Monterrey será el lugar de venta del biodiesel. Se considerarán 77.4 km de distancia entre el centro de Montemorelos, hasta la FCQ de la UANL, y 8 km entre este punto y el centro de Monterrey.

5.2.4 Análisis de incertidumbre

Se evaluó la calidad de cada factor de emisión utilizado durante el cálculo de la huella de carbono. El criterio de evaluación utilizado será el expuesto en el protocolo de GEI, donde cada factor se califica en base a la semejanza de tecnología, tiempo, geografía, nivel de completo, y precisión con respecto al proceso evaluado⁸ (Tablas 5.2 y 5.3). En caso de desconocer alguno de estos parámetros, se le asignó la peor calificación. Después de tener calificada la calidad del factor de emisión, se utilizó la Ecuación 2 para asignarle un intervalo de confianza de un 95%. En esta fórmula se incluye además un factor de incertidumbre básico, el cual es asignado según el tipo de proceso con respecto a lo que el protocolo de GEI sugiere⁸. Por último, se realiza una propagación del parámetro de incertidumbre utilizando el método de expansión de series de Taylor para establecer un intervalo de confianza del 95% para la huella de carbono del producto final (Ecuación 3).

Tabla 5.2 -

Criterios de evaluación de la calidad de los factores de emisión utilizados para el cálculo de huella de carbono⁸.

EVALUACIÓN	PARÁMETRO				
	<i>Tecnología</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Geografía</i>	<i>Completo</i>	<i>Precisión</i>
Muy Bueno	Dato generado utilizando la misma tecnología	Dato con menos de 3 años de antigüedad	Dato de la misma zona	Dato que incluye todas las etapas relevantes del proceso durante un lapso de tiempo adecuado	Desviación estándar es menor de $\pm 5\%$
Bueno	Dato generado utilizando tecnología similar	Dato con menos de 6 años de antigüedad	Dato de una zona similar	Dato que incluye 50% de las etapas relevantes del proceso durante un lapso de tiempo adecuado	Desviación estándar es menor de $\pm 20\%$
Justo	Dato generado con tecnología distinta	Dato con menos de 10 años de antigüedad	Dato de una zona diferente	Dato que incluye menos del 50% de las etapas relevantes del proceso y un lapso de	Desviación estándar es menor de $\pm 50\%$

				tiempo adecuado	
Pobre	La tecnología es distinta	Dato con más de 10 años de antigüedad	Dato de una zona desconocida	Dato que incluye menos del 50% de las etapas relevantes del proceso y un lapso de tiempo corto	Desviación estándar de >±50%

Tabla 5.3

Factor de incertidumbre asignado según la evaluación sobre cada parámetro⁸.

	Muy Bueno	Bueno	Justo	Pobre
Tecnología	1	1.2	1.5	2
Tiempo	1	1.1	1.2	1.5
Geografía	1	1.02	1.05	1.1
Completo	1	1.05	1.1	1.2
Precisión	1	1.1	1.2	1.5

$$GDE_{g95} = \sigma_g^2 = \exp^{\sqrt{[\ln(U_1)]^2 + [\ln(U_2)]^2 + [\ln(U_3)]^2 + [\ln(U_4)]^2 + [\ln(U_5)]^2 + [\ln(U_b)]^2}} \quad (2)^8$$

$$(\ln GDE_y)^2 = S_1^2 (\ln GDE_1)^2 + S_2^2 (\ln GDE_2)^2 + \dots + S_n^2 (\ln GDE_n)^2 \quad (3)^8$$

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Análisis de ciclo de vida

Se realizó un análisis de ciclo de vida para el biodiesel producido por el proceso de pirólisis solar de cáscara de naranja (Figura 5.3) y otro por la pirólisis con un horno calentado por una resistencia eléctrica (Figura 5.4). En ambos el ciclo de vida comienza por la adquisición de materia prima que implica el traslado por vía terrestre de la cáscara de naranja desde el municipio de Montemorelos hasta el municipio de San Nicolás de los Garza. Posteriormente se encuentran las sub-etapas de producción: secado, triturado y pirólisis. Estas tienen una huella de carbono la cual debe ser distribuida entre el biodiesel,

biogás y carbón según el porcentaje másico generado. En el proceso solar se requiere procesar 1.288 kg de cáscara de naranja seca para generar 1 kg. de biodiesel. Además, como subproductos de este proceso se generan: 0.270 kg de carbón vegetal y 0.258 kg de biogás. Sin embargo, por cada kilogramo de biodiesel producido en una pirólisis eléctrica se requiere consumir 1.883 kg de cáscara de naranja, y se generan 0.486 kg de biogás y 0.397 kg de carbón vegetal. Por lo tanto, la pirólisis eléctrica requiere 46 % másico más cáscara de naranja que la pirólisis solar para producir 1 kg de biodiesel. La lista de las entradas energéticas y de materia prima necesarias para producir 1 kg de biodiesel por medio de una pirólisis solar y una pirólisis en horno eléctrico está desglosada en las Tablas 5.4 y 5.5 respectivamente. Con el análisis de ciclo de vida se pueden observar 4 diferencias en las entradas de materia prima y energía de los dos procesos de producción. La primera es que en la pirólisis solar se utilizó un concentrador solar y en la pirólisis eléctrica se utilizó una resistencia eléctrica¹. La segunda es que la pirólisis solar se realizó en una atmósfera de helio y la pirólisis eléctrica en una atmósfera de nitrógeno¹. La tercera diferencia, es la cantidad de biomasa alimentada al reactor en ambos procesos con la finalidad de producir 1 kg de biodiesel. La cuarta fue que en la pirólisis solar se utilizó nitrógeno líquido como fluido refrigerante en el condensador, y en la pirólisis eléctrica se utilizó un refrigerador eléctrico criogénico.

La etapa de distribución y almacenamiento representa la huella de carbono del traslado del biodiesel de la planta de producción hasta el centro de la ciudad de Monterrey y el impacto ambiental que tiene la gasolinera. Por

último se tiene la etapa de uso y final de vida, que para el caso del biodiesel, ambos se engloban en un solo proceso: la combustión.

Figura 5.3- Diagrama de ciclo de vida del biodiesel producido por una pirólisis eléctrica de cáscara de naranja seca.

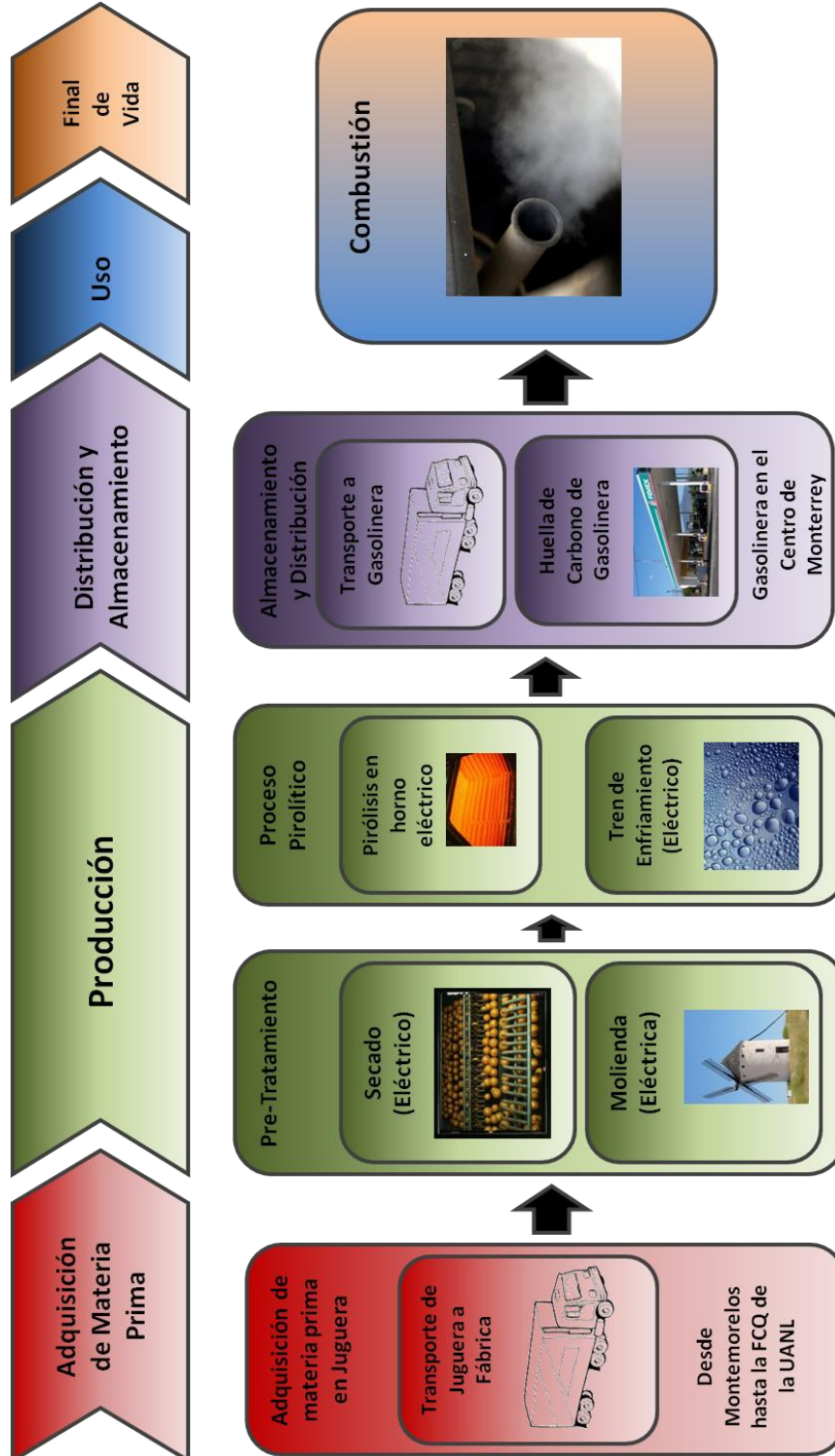


Figura 5.4 - Diagrama de ciclo de vida del biodiesel producido por una pirólisis solar de cáscara de naranja seca.

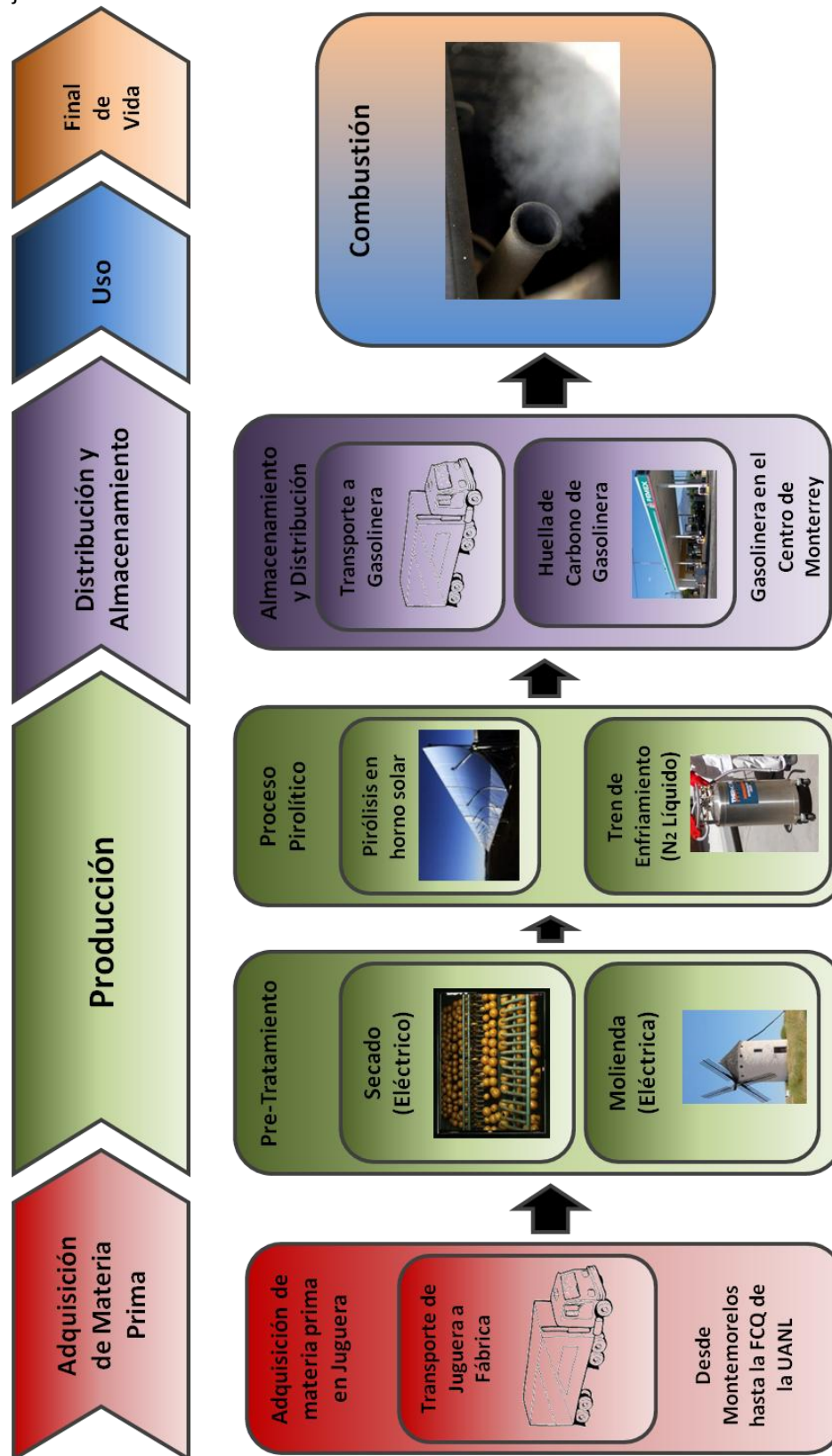


Tabla 5.4

Lista de entradas por proceso para la producción de 1 kilogramo de biodiesel por medio de una pirólisis solar de cáscara de naranja.

PROCESO	CONSUMO					
	Recursos Materiales	Cantidad (kg)	Energía Eléctrica	Cantidad (kWh)	Residuos Generados	Cantidad (kg)
Transporte de Montemorelos a la FCQ (77.4 km)	Gasolina	0.0009	-	-	-	-
Secado (5 horas)	-	-	Secador	2.6404	-	-
Triturado	-	-	Triturador	0.1932	-	-
Pirólisis solar	Helio	23.0000	-	-	-	-
	Cáscara de Naranja	1.2880	-	-	-	-
Condensador	Nitrógeno Líquido	75.0000	-	-	-	-
Transporte a Gasolinera (8 km)	Gasolina	0.0001	-	-	-	-
Venta	-	-	Gasolinera	NR	-	-
Combustión	-	-	-	-	Gases de combustión	1.0000

Tabla 5.5

Lista de entradas por proceso para la producción de 1 kilogramo de biodiesel por medio de una pirólisis eléctrica de cáscara de naranja.

PROCESO	CONSUMO					
	Recursos Materiales	Cantidad (kg)	Energía Eléctrica	Cantidad (kWh)	Residuos Generados	Cantidad (kg)
Transporte de Montemorelos a la FCQ (77.4 km)	Gasolina	0.0013	-	-	-	-
Secado (5 horas)	-	-	Secador	3.8606	-	-
Triturado	-	-	Molino	0.2825	-	-
Pirólisis eléctrica	Nitrogeno	0.0433	Horno (2.66 horas)	60.3213	-	-
	Cáscara de Naranja	1.8832	-	-	-	-
Condensador	-	-	Enfriador Criogénico (2.66 horas)	1.9165	-	-
Transporte a Gasolinera (8 km)	Gasolina	0.0001	-	-	-	-
Venta	-	-	Gasolinera	NR	-	-
Combustión	-	-	-	-	Gases de combustión	1.0000

5.3.2 Huella de carbono

La Figura 5.5 reporta una comparación de las huellas de carbono de los ciclos de vida de 1 kg. de biodiesel manufacturado por medio del proceso de pirólisis solar y por pirólisis con un horno eléctrico realizado por Miranda *et al.*, (2009)¹. Además se ha incluido la huella de carbono para un tercer proceso el cual es el resultado de la combinación de los mejores aspectos de los dos procesos antes mencionados. Los resultados de la huella de carbono de las etapas de cada proceso se encuentran reportados en la Tabla 5.6. El proceso de pirólisis solar y la pirólisis de Miranda *et al.*,(2009)¹ presentan diferencias considerables en la huella de carbono debido a dos factores principales: diferencia en el porcentaje de conversión de biomasa a biodiesel y diferencias en el proceso de manufactura. La pirólisis solar requiere de un 32% menos de cáscara de naranja seca en comparación con el proceso eléctrico para generar 1 kg. de biodiesel, lo cual repercute sobre las etapas de adquisición de materia prima y producción de los ciclos de vida. Por otro lado, la etapa de producción presenta diferencias substanciales en las sub-etapas de pirólisis y condensador debido a diferencias en los métodos de manufactura empleados.

La huella de carbono de la sub-etapa de pirólisis produce en global la mitad de emisiones de GEI cuando es solar comparada de cuando se realiza con un horno eléctrico. Sin embargo, la pirólisis solar se desarrolló en una atmósfera de helio y la pirólisis eléctrica en una de nitrógeno. Aun cuando técnicamente el producto líquido de la pirólisis no es afectado por el gas inerte en el que se desarrolla, el helio demostró tener una huella de carbono 530 veces mayor a la del nitrógeno¹³⁻¹⁴, disminuyendo así el grado de

sustentabilidad de la pirólisis solar realizada. La diferencia en el grado de impacto ambiental de ambos gases es debido a que el helio proviene de los pozos de gas natural en donde se encuentra en una cantidad reducida¹³, mientras que el nitrógeno proviene del proceso de licuefacción de aire troposférico el cual se ha optimizado ya a través de los años¹⁴. Este resultado ha revelado la necesidad de proponer una mejora en el proceso solar, que se ve reflejado en el tercer proceso de la Tabla 5.6. Una sub-etapa de pirólisis solar de cáscara de naranja que se realice en un ambiente de nitrógeno tendrá una huella negativa de $-1.81 \text{ kg}_{\text{CO}_2}$ debido a que remueve más carbono del medio ambiente al eliminar el residuo agroindustrial (cáscara de naranja) comparado con el que se emite durante la manufactura del biodiesel.

La segunda diferencia en la etapa de producción se encuentra en el condensador. Durante la pirólisis solar se utilizaron trampas de nitrógeno líquido, mientras que en la pirólisis eléctrica se utilizó un enfriador criogénico de 183 W de potencia eléctrica de entrada. El resultado fue que la huella de carbono de la pirólisis solar fue 48 veces menor que utilizando refrigeración eléctrica¹⁴. El uso de nitrógeno líquido como método de refrigeración con un grado de sustentabilidad superior a los sistemas eléctricos es una solución ya ofrecida a las industrias responsables con el medio ambiente¹⁵. Debido a los resultados obtenidos comparando los diferentes sistemas de refrigeración, se ha decidido proponer el nitrógeno líquido para el tercer proceso de la Tabla 5.6.

La última propuesta de mejora ha sido sobre el secado de la materia prima. El proceso solar del presente trabajo y la pirólisis de Miranda *et al.*, (2009)¹ realizaron la sub-etapa de secado utilizando un túnel de aire con un

motor eléctrico de 1 hp. En el tercer proceso de la Tabla 5.6 se propone la implementación de un secador solar el cual calentará el aire atmosférico con colectores solares y por medio de la convección entre la cáscara de naranja y el aire caliente se disminuya la humedad de la misma.

La Figura 5.5 revela que en el proceso de pirólisis solar del presente trabajo y en la pirólisis eléctrica de Miranda *et al.*, (2009)¹ las sub-etapas del ciclo de vida que más impacto ambiental tienen son la pirólisis y la combustión del biodiesel. Igualmente se revela que el transporte de materia prima y la venta del biodiesel tendrían una huella de carbono despreciable (inferior al 0.25% de la huella total del producto).

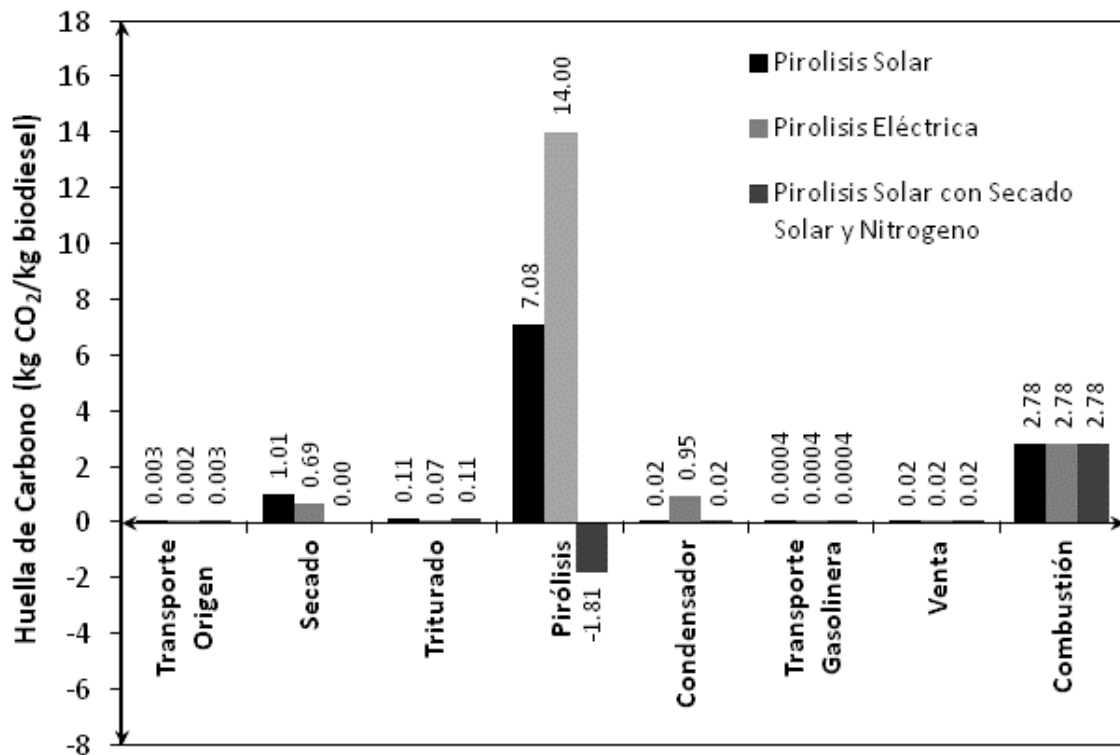


Figura 5.5 - Huella de carbono de la pirólisis solar, pirólisis eléctrica y por la pirólisis solar con mejoras en el proceso. Huella de carbono para las etapas del ciclo de vida de 1 kg de biocombustible.

Tabla 5.6

Resultado de la huella de carbono y la contribución en las emisiones en porcentaje base 100% del biodiesel producido por medio de 3 métodos de manufactura distintos: la pirólisis solar, la pirólisis eléctrica utilizado por Miranda *et al.*, (2009) y una pirólisis solar con mejoras en el proceso.

PROCESO	PIRÓLISIS SOLAR		PIRÓLISIS Miranda <i>et al.</i> , (2009)		PIRÓLISIS SOLAR EN NITROGENO Y SECADO SOLAR	
	<i>Huella de CO₂</i> <i>(kg_{CO2})</i>	<i>% de contribution</i>	<i>Huella de CO₂</i> <i>(kg_{CO2})</i>	<i>% de contribution</i>	<i>Huella de CO₂</i> <i>(kg_{CO2})</i>	<i>% de contribution</i>
Transporte de Montemorelos a la FCQ (77.4 km)	<0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	0.09
Secado (5 horas)	1.01	9.19	0.69	3.74	0.00	0.00
Triturado	0.11	0.98	0.07	0.40	0.11	3.69
Pirólisis	7.08	64.20	14.00	75.59	-1.81	N/A
Condensador	0.02	0.20	0.95	5.12	0.02	0.77
Transporte a Gasolinera (8 km)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
Venta	0.02	0.18	0.02	0.11	0.02	0.68
Combustión	2.78	25.22	2.78	15.03	2.78	94.75
TOTAL	11.04	100.00	18.52	100.00	1.13	100.00

5.3.3 Análisis de incertidumbre

Se realizó una matriz (Tabla 5.7) de incertidumbre con los factores de emisión encontrados en la literatura para cada material, energético o proceso involucrado en el ciclo de vida del biodiesel. Se calculó un factor de incertidumbre (GDE_{95}) con un intervalo de confianza de un 95% para cada factor de emisión utilizando el factor de incertidumbre por: tecnología, tiempo, geografía, nivel de completo, precisión, y el factor básico de incertidumbre⁸. La combustión de la gasolina fue el proceso que presentó el factor de mayor incertidumbre ($GDE_{95} = 2.236$) debido a que se utilizó un factor reportado para

Alemania por ser el único encontrado que incluyera emisiones directas por combustión y emisiones indirectas por exploración, perforación, extracción, manufactura, venta y distribución del combustible; además el objetivo final de este factor es el calcular la huella de carbono de los traslados de materiales en el ciclo de vida, por lo cual se le asignó un factor básico de incertidumbre de 2 según el protocolo para gases de efecto invernadero. El factor con menor incertidumbre fue el de la energía eléctrica con $GDE_{g95} = 1.504$ por ser un factor local, actual, completo, pero se desconoce la precisión del factor. La precisión de los factores de emisión fue el dato menos reportado en las fuentes bibliográficas disponibles actualmente, posiblemente debido a que el protocolo para gases de efecto invernadero es el primer estándar que lo exige y este fue publicado en el año 2011⁸.

Tabla 5.7

Matriz de factores de emisión con factores de incertidumbre. Factor de incertidumbre global con un intervalo de confianza de un 95%.

Material o Proceso	Factores de Emisión*	Tecnología	Tiempo	Geografía	Completo	Precisión	Factor Básico de Incertidumbre	Factor de Incertidumbre (GDE_{g95})
Cáscara de Naranja <i>Factor de Incertidumbre</i> <i>Descripción</i>	1.8446 ¹⁶	Bueno	Muy Bueno	Justo	Muy Bueno	Bajo		
		1.2	1	1.05	1	1.5	1.05	1.568
		Similar	2009	Holanda	Presente Trabajo	Desconocido	Materia Prima	
Combustión del Diesel (Emisiones Directas) <i>Factor de Incertidumbre</i> <i>Descripción</i>	3.0941 ¹⁷	Muy Bueno	Muy Bueno	Justo	Completo	Bajo		
		1	1	1.05	1	1.5	1.05	1.509
		Identica	2009	Alemania		Desconocido	Emisiones de CO ₂	
Combustión del Biodiesel (Emisiones Directas) <i>Factor de Incertidumbre</i> <i>Descripción</i>	2.7830 ¹⁸	Bueno	Muy Bueno	Justo	Muy Bueno	Bajo		
		1.2	1	1.05	1	1.5	1.05	1.568
		Similar	2011	Canada		Desconocido	Emisiones de CO ₂	
Energía Eléctrica <i>Factor de Incertidumbre</i> <i>Descripción</i>	0.4946 ¹⁹	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno			
		1	1	1	1	1.5	1.05	1.504
		Identica	2010	Mexico		Desconocida	Energía Eléctrica	

Combustión de Gasolina (Emisiones directas e indirectas)		Muy Bueno	Muy Bueno	Justo	Completo	Bajo		
<i>Factor de Incertidumbre</i>	3.8867¹⁷	1	1	1.05	1	1.5	2	2.236
<i>Descripción</i>		Identica	2009	Alemania		Desconocido	Transporte	
Helio		Muy Bueno	Muy Bueno	Bueno	Bueno	Bajo		
<i>Factor de Incertidumbre</i>	0.5000¹³	1	1	1.02	1.05	1.5	1.05	1.509
<i>Descripción</i>		Identica	2009	EUA		Desconocido	Materia Prima	
Nitrógeno en Cilindros		Muy Bueno	Muy Bueno	Bueno	Bueno	Bajo		
<i>Factor de Incertidumbre</i>	0.0020¹⁴	1	1	1.02	1	1.5	1.05	1.505
<i>Descripción</i>		Identica	210	EUA		Desconocido	Materia Prima	
Nitrógeno Líquido		Muy Bueno	Muy Bueno	Bueno	Bueno	Bajo		
<i>Factor de Incertidumbre</i>	0.0003¹⁴	1	1	1.02	1	1.5	1.05	1.505
<i>Descripción</i>		Identica	210	EUA		Desconocido	Materia Prima	
Venta y almacenamiento de Diesel		Muy Buena	Pobre	Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno		
<i>Factor de Incertidumbre</i>	0.0201²⁰	1	1.5	1.02	1	1	1.05	1.505
<i>Descripción</i>		Identica	1998	EUA		±2.21%	Comercialización	

* La huella de carbono está expresado en unidades según corresponda:

- materiales: $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{material}}$
- energía eléctrica: $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}$
- combustión: $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{combustible}}$

La Tabla 5.8 muestra la huella de carbono considerando un análisis de cuna-a-puerta y de cuna-a-tumba para el biodiesel por pirólisis solar, por pirólisis eléctrica y por pirólisis solar con mejoras en el proceso. El biodiesel producido por Miranda *et al.*, (2009) tiene una huella de carbono de cuna-a-tumba de $18.52 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{biodiesel}} \pm 55.35$, mientras que el biodiesel producido por pirólisis solar es de $11.04 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{biodiesel}} \pm 5.82$. Esto representa una disminución del 40% en las emisiones. Por último, un biodiesel que se produjera en una pirólisis solar en una ambiente de nitrógeno, utilizando una refrigeración a base de nitrógeno líquido, y con un secador solar de biomasa tendría una huella de carbono de $1.13 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{biodiesel}} \pm 0.64$. La huella de carbono de la cuna-a- puerta

es inferior por no incluir la combustión del biodiesel, ni distribución y venta. Es decir, solo incluye la adquisición de materia prima y la manufactura del biodiesel. Para el caso de la pirólisis solar mejorada la huella de carbono de la cuna-a- puerta es negativa (-1.70 kg_{CO2}/kg_{biodiesel}) lo cual implica que se retira una mayor cantidad de carbono del medioambiente del que se libera durante la adquisición de materia prima y la manufactura del biocombustible.

Tabla 5.8

Huella de carbono global con grado de incertidumbre utilizando un análisis de cuna-a-puerta y de cuna-a-tumba para el biodiesel producido por medio de 3 métodos de manufactura distintos: la pirólisis solar, la pirólisis eléctrica utilizado por Miranda *et al.*, (2009) y una pirólisis solar con mejoras en el proceso.

PROCESO	CUNA A PUERTA	CUNA A TUMBA	
	Huella de Carbono (kg _{CO2})	Huella de Carbono(kg _{CO2})	Incertidumbre +/- (kg _{CO2})
PIRÓLISIS SOLAR	8.21	11.04	5.82
PIRÓLISIS MIRANDA <i>et al.</i> , (2009)	14.78	18.52	55.35
PIRÓLISIS SOLAR CON SECADOR SOLAR Y ATMOSFERA DE NITRÓGENO	-1.70	1.13	0.64

La Tabla 5.9 muestra la huella de carbono de la unidad de análisis y de la unidad funcional. Es decir, la huella de carbono que genera cada kilogramo de combustible quemado, y la huella de carbono que genera la producción de 100 MJ considerando que cada combustible tiene distinto calor de combustión.

El petrodiesel y la gasolina tienen una huella de carbono de 3.2 kg_{CO2}/kg_{petrodiesel} y 3.89 kg_{CO2}/kg_{gasolina} respectivamente¹⁷, por lo que el proceso de pirólisis solar mejorado (en ambiente de N₂, refrigeración con N₂ líquido y secador de biomasa solar) disminuiría las emisiones en un 65% comparado con el petrodiesel y un 71% comparado con la gasolina (Tabla 5.9). Sin embargo, las pirólisis en atmósferas de helio son ambientalmente poco competitivas en el

área de la producción de combustibles. Igualmente se deben proponer mejoras ambientales al proceso de pirólisis eléctrica para aumentar su nivel de sustentabilidad.

El biodiesel por pirólisis solar mejorado ha presentado el menor impacto ambiental (3 kg_{CO2}) en la producción de 100 MJ. Comparado con el petrodiesel (7.43 kg_{CO2}) que es el segundo combustible menos contaminante de la Tabla 5.9, se ha disminuido la huella de carbono en un 60%. La pirólisis eléctrica fue el combustible con el mayor impacto ambiental con 49.26 kg_{CO2}. Sin embargo, la investigación realizada por Miranda *et al.*, (2009) tenía como objetivo el estudio de la descomposición de la lignina, celulosa y hemicelulosa presentes en la cáscara de naranja durante la pirólisis, y no el crear un biocombustible con una baja huella de carbono.

Tabla 5.9

Huella de carbono de la unidad de análisis (1 kg) y de la unidad funcional (100 MJ) para distintos combustibles.

Combustible	Origen	Huella de Carbono (kg _{CO2} /kg combustible)	Huella de Carbono (kg _{CO2} /100 MJ)
Pirólisis Solar	Cáscara de Naranja	11.04	29.35
Pirólisis Miranda <i>et al.</i> (2009)	Cáscara de Naranja	18.52	49.26
Pirólisis solar en atmósfera de N₂ y secador solar	Cáscara de Naranja	1.13	3.00
Petrodiesel¹⁷	Petróleo	3.20	7.43
Gasolina¹⁷	Petróleo	3.89	8.64

5.4 Conclusiones

El análisis de la huella de carbono y ciclo de vida realizado durante este trabajo brinda los argumentos para las siguientes conclusiones:

1. La huella de carbono con análisis de cuna-a-tumba del biodiesel solar es de $11.04 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{biodiesel}} \pm 5.82$, el del biodiesel producido por Miranda *et al.* (2009) es de $18.52 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{biodiesel}} \pm 55.35$, y el de la pirólisis solar con mejoras en su proceso es de $1.13 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{biodiesel}} \pm 0.64$.
2. Para la obtención de 100 MJ de energía, el biodiesel producido por pirólisis solar con mejoras en el proceso emite 3 kg_{CO_2} representando una disminución de un 60% de emisiones de gases de efecto invernadero comparado con el petrodiesel.
3. La pirólisis y la combustión producen más del 90% de las emisiones de GEI generadas durante el ciclo de vida del biodiesel.
4. Las emisiones de gases de efecto invernadero generados por las etapas de transporte, venta y distribución del producto mostraron ser despreciables (<0.25% de las emisiones en el ciclo de vida).
5. La huella de carbono de inertizar un proceso como la pirólisis con nitrógeno es 530 veces menor que cuando se utiliza helio. Por lo tanto, utilizar una atmósfera de nitrógeno aumenta el nivel de sustentabilidad de los procesos comparado con utilizar una atmósfera de helio.
6. La refrigeración utilizando nitrógeno líquido demostró emitir 54 veces menos emisiones que utilizando un sistema eléctrico para refrigeración criogénica.
7. El uso de un secador solar de biomasa lograría disminuir las emisiones de carbono a 0 kg_{CO_2} en la sub-etapa de secado de la materia prima.

8. El protocolo para gases de efecto invernadero: estándar de conteo y reporte para productos 2011 es una herramienta que puede revelar áreas de oportunidad para mejorar y comparar procesos experimentales que buscan brindar soluciones medioambientales, como lo es la pirólisis de biomasa.

5.5 Referencias

1. Miranda R., Bustos-Martinez D., Sosa Blanco C., Gutiérrez Villareal M.H., Rodríguez Cantú M.E. Pyrolysis of sweet orange (*Citrus sinensis*) dry peel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 86: 245-251 (2009).
2. ISO. ISO 14031:1999 Environmental management-Environmental Performance Evaluation. International organization for standardization, Ed. 1, Ginebra, p. 1-40 (1999).
3. ISO. ISO 14044: 2006 Environmental management-Life cycle assessment. International organization for standardization, Ed. 1., p. 1-46 (2006).
4. ISO. ISO 14064-1: 2006 - Greenhouse gases. International organization for standardization, Ed. 1., p. 1-20 (2006).
5. Presidencia de la República. Decreto promulgatorio del protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Diario oficial de la nación. p. 1-36 (2000).
6. INE. Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. SEMARNAT, Ed. 1, México, p. 75-278 (2005).
7. BSI. PAS 2050:2011. BSI, Ed. 1, Inglaterra, p. 2-45 (2011).
8. Ranganathan J., Moorcroft D., Koch J., Bhatia P. Protocolo de gases de efecto invernadero: Estándar de conteo y reporte para productos 2011. World business council for sustainable development, Ed. 1, Ginebra, p. 1-138 (2011).
9. SEMARNAT. Programa GEI México. (2010). <<http://www.geimexico.org>> Fecha de acceso: 22 de Febrero de 2012.
10. Mercedes-Benz presenta su nuevo Actros 2012. Revista Coche (2011). <<http://revistacoche.blogspot.mx/2011/06/mercedes-benz-presenta-su-nuevo-actros.html>> Fecha de acceso: 2 de Marzo de 2012.
11. Bel-Art. User Manual: Micro-mill Grinder Scienceware H37252. Bel-Art Products. EUA, p. 1-6 (2009).
12. Actividades económicas. Gobierno del municipio de Montemorelos (2010). <http://www.montemorelos.gob.mx/newsite/index.php?option=com_content&view=article&id=443&Itemid=84> Fecha de acceso: 2 de Marzo de 2012.
13. Lattin W.C., Utgikar V.P. Global warming potential of the sulfur-iodine process using life cycle assessment methodology. *Hydrogen Energy*. 34: 737-344 (2009).
14. Air Liquide. Sustainable Development Report. Air Liquide, Ed. 1, Francia, p. 46-76 (2010).
15. Stiles D., Nash S. Nitrogen alternative to diesel powered truck fridges. Global cold chain news. Inglaterra, p. 1-5 (2011).
16. Vreuls H.H.J., Zijlema P.J. The Netherlands: list of fuels and standard CO₂ emission factors. SenterNovem, Ed. 1, Holanda, p. 1-13 (2009).
17. Hensler G., Hochhuber J., Linckln V. Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie un Gewerbe. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Ed. 1, p. 1-43 (2009).
18. Ministry of environment. Methodology for reporting 2011 B.C. public sector greenhouse gas emissions. British Columbia Ministry of Environment, Ed. 1, p. 1-40 (2011).

19. SEMARNAT. Factor de emisión eléctrico 2010. Programa GEI México. (2010). <<http://www.geimexico.org/factor.html>> Fecha de acceso: 22 de Febrero de 2012.
20. Sheehan J., Camobreco V., Duffield J., Graboski M., Shapouri H. An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles. NREL, Ed. 1, p. 1-60 (1998).

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente proyecto se logró alcanzar una serie de conclusiones y descubrimientos los cuales fueron brindando los cimientos para alcanzar los objetivos generales y comprobar la hipótesis general. Las principales conclusiones a las que se llegó en este proyecto de investigación fueron:

- El estudio del potencial de la tecnología solar térmica reveló que en el área metropolitana de Monterrey recibe típicamente 2,454.49 kW/m²a de energía solar directa. Esta característica meteorológica convierte a esta región en una zona afín al uso de sistemas de energía solar como lo son la fotovoltaica y la termo-solar. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que los altos niveles de humedad presentados típicamente en septiembre, reducen la energía solar a nivel de piso debido a la difracción y la absorción de la radiación directa ocasionada por las nubes. Para compensar los meses con menor energía solar disponible se recomienda utilizar durante el dimensionamiento del sistema de energía solar el año y día típico meteorológico propuestos en el presente trabajo.

- El análisis realizado del recurso solar en Monterrey, México revela que el suministro de energía solar en dicha zona, permite que un sistema de energía solar pueda operar 4,838 h/a. Esto implica anualmente 604.75 turnos de trabajo de 8 h.
- Para el aprovechamiento del recurso solar, se puede utilizar un sistema termo-solar. En cuyo caso la superficie reflejante del concentrador será preferentemente de plata depositado sobre vidrio. Esto se debe a su alta reflectancia en el espectro electromagnético, a su costo accesible y larga vida útil. Sin embargo, el vidrio es un material frágil ante el estrés mecánico y los golpes el cual se deberá tratar con cuidado. Por otro lado, el material óptimo para la construcción de un reactor solar para pirólisis de cáscara de naranja es el vidrio 7740 PYREX por su alta transmitancia a lo largo del espectro electromagnético y su costo accesible.
- La caracterización térmica del reactor solar nos ha llevado a concluir que es posible obtener irradiancias pico superiores a 30 soles con un concentrador cilindro parabólico con un área de apertura de 1300x1500 mm en el área metropolitana de Monterrey. Esto sugiere la factibilidad técnica de llevar a cabo procesos termoquímicos como la pirólisis de cáscara de naranja y el abastecimiento de energía térmica a procesos industriales. El sistema termo-solar construido alcanzó eficiencias de por lo menos 94% con referencia a lo proyectado por la simulación de trazado de rayos por el método de Monte Carlo. El 6% restante puede atribuirse a: la incertidumbre de medición, inexactitud al enfocar el concentrador solar, alto porcentaje de radiación difusa en el ambiente e irregularidades geométricas en la superficie reflejante.

- Durante la construcción y diseño del reactor solar, se llegó a demostrar que con excepción del sistema de monitoreo, todos los componentes del reactor químico y concentrador solar fueron manufacturados por empresas mexicanas lo cual demuestra el alto potencial que tiene el utilizar productos y mano de obra nacional en el desarrollo y producción de sistemas termo-solares. Teniendo como ventajas la generación de productos de alto valor y el impulso de las tecnologías sustentables en territorio mexicano.
- Los datos experimentales de la pirólisis solar y producción de un biocombustible de tercera generación nos llevaron a concluir que un reactor tubular de vidrio PYREX de 2 pulgadas de diámetro exterior puede elevarse hasta una temperatura promedio de 290 °C y alcanzar una temperatura máxima en el centro de la línea focal de 465 °C utilizando únicamente un concentrador cilindro parabólico con un ancho de apertura de 1.3 m como fuente de suministro de energía. Bajo esta temperatura, la pirólisis solar de cáscara de naranja fue posible, alcanzando una pérdida de masa de 79% peso, siendo la composición de los productos: 77.64, 1.43, y 20.93% peso de bioaceite, biogás y carbón vegetal respectivamente.
- La evaluación de la eficiencia del reactor solar nos brindó suficiente evidencia como para concluir que las fugas energéticas más importantes operando el reactor solar a 290 °C son: la energía reflejada por las propiedades ópticas de la biomasa (37.85% de la energía solar disponible) y la pérdida de calor del reactor al ambiente por convección y radiación (36.85% de la energía solar disponible).

- La especie química encontrada en mayor medida (27.60% peso) en el bioaceite generado por pirólisis solar fue la (Z)-9-octadecenamida. Además se identificaron el di-isooctil-ftalato, escualeno, D-limoneno, fenol, entre otros. Esta composición abre la posibilidad de utilizar el bioaceite no solo como combustible, sino en la producción de productos de alto valor como productos para la industria química y producción de medicamento.
- La evaluación del nivel de sustentabilidad del biodiesel de tercera generación reveló que la huella de carbono con análisis de cuna-a-tumba del biodiesel solar es de $11.04 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{biodiesel}} \pm 5.82$, el de el biodiesel producido por Miranda *et al.* (2009) es de $18.52 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{biodiesel}} \pm 55.35$, y el de la pirólisis solar con mejoras en su proceso es de $1.13 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{biodiesel}} \pm 0.64$. Para la obtención de 100 MJ de energía el biodiesel producido por pirólisis solar con mejoras en el proceso emite 3 kg CO₂ representando una disminución de un 60% emisiones de gases de efecto invernadero comparado con el petrodiesel.
- Las emisiones de gases de efecto invernadero generados por las etapas de pirólisis y de combustión del biodiesel son las etapas de mayor impacto ambiental durante el ciclo de vida del biodiesel. La huella de carbono de inertizar un proceso como la pirólisis con nitrógeno es 530 veces menor cuando se utiliza helio. Por lo tanto, es preferible utilizar atmósferas de nitrógeno para aumentar el nivel de sustentabilidad de los procesos. La refrigeración utilizando nitrógeno líquido demostró emitir 54 veces menos emisiones que utilizando un sistema eléctrico para refrigeración criogénica.

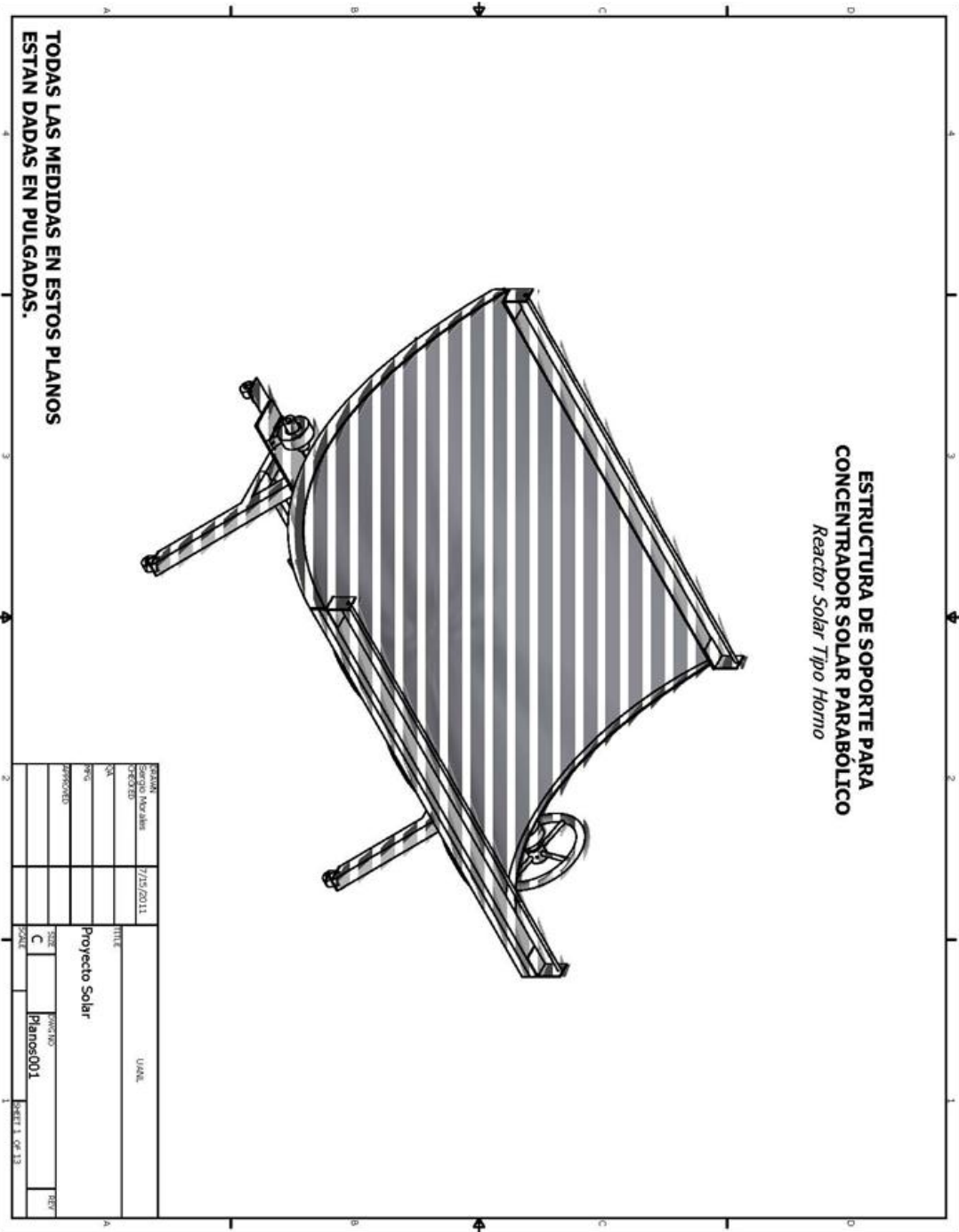
- **La última conclusión de este trabajo es que la hipótesis:**

"Un reactor solar permite disminuir la huella de carbono de un proceso de pirólisis de cáscara de naranja (Citrus sinensis) para la generación de productos de alto valor, como: biocombustibles de tercera generación, bioaceites, biogás y carbón vegetal."

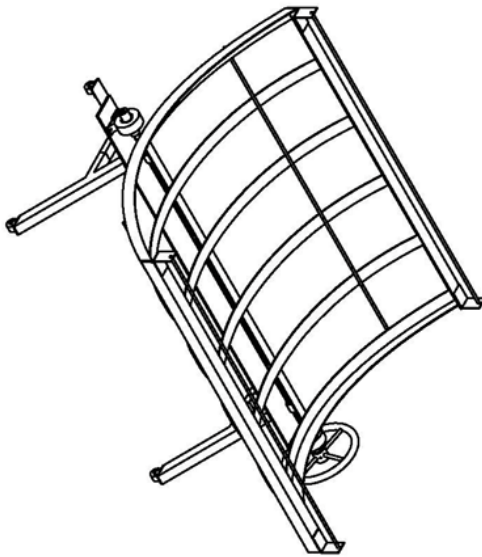
es verdadera.

APÉNDICES

APÉNDICE I- Planos del soporte estructural y concentrador solar cilindro parabólico Modelo PROMETEO 001 desarrollado y construido como parte de los objetivos del presente trabajo.

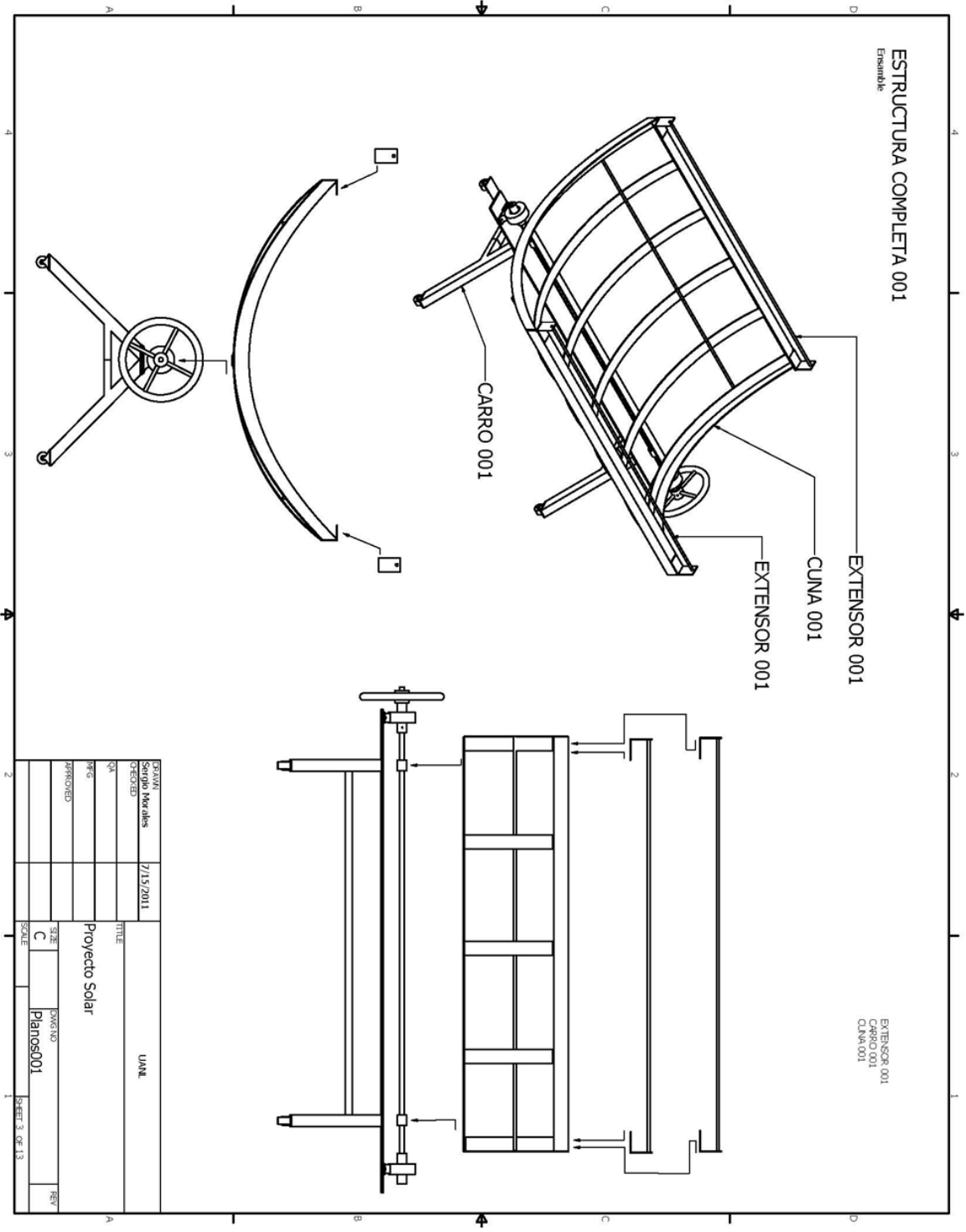


LISTA DE MATERIALES



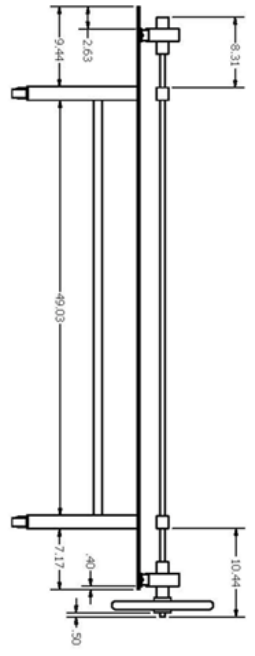
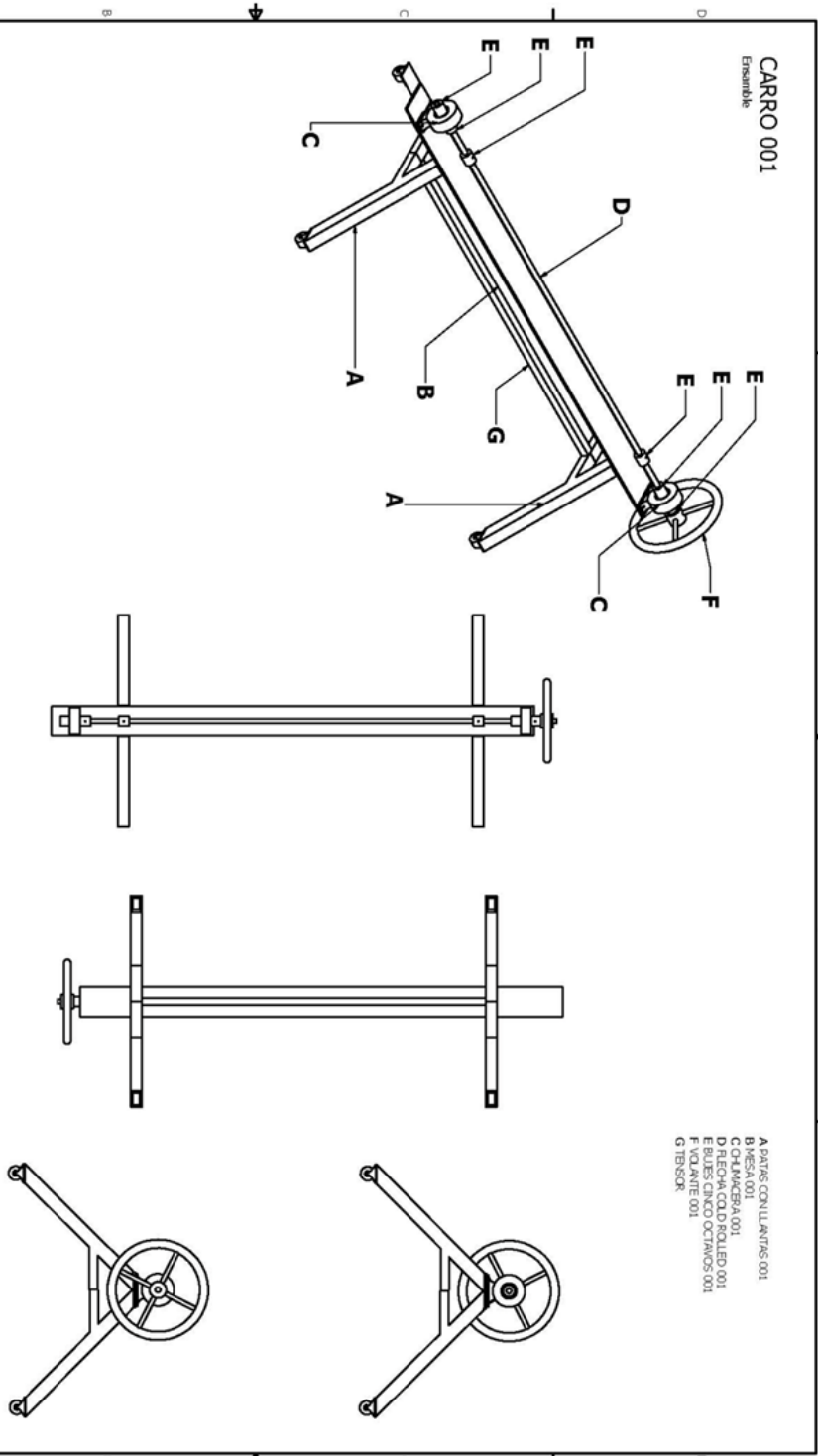
CANTIDAD	LISTA DE MATERIALES	PARTICULAR
2	ARCO 001	
4	VARILLA TRES OCTAVOS 001	
6	BUJE CINCO OCTAVOS 001	
2	CHAMACERA 001	
1	FLECHA COLD ROLLED 001	
1	MESA 001	
2	PATAS CON LUNFAS 001	
1	SOLETA 001	
4	SOPORTE 001	
1	VOLANTE 001	
2	ANGULO 001	
4	COSTILLA 001	
1	TENSOR 001	

DISEÑADO Sergio Morales	TÍTULO Proyecto Solar	UNIDAD U.M.N.
REVISADO _____	FECHA 7/15/2011	ESCALA C
APROBADO _____	DISEÑADO Planos001	SHEET 2 OF 13

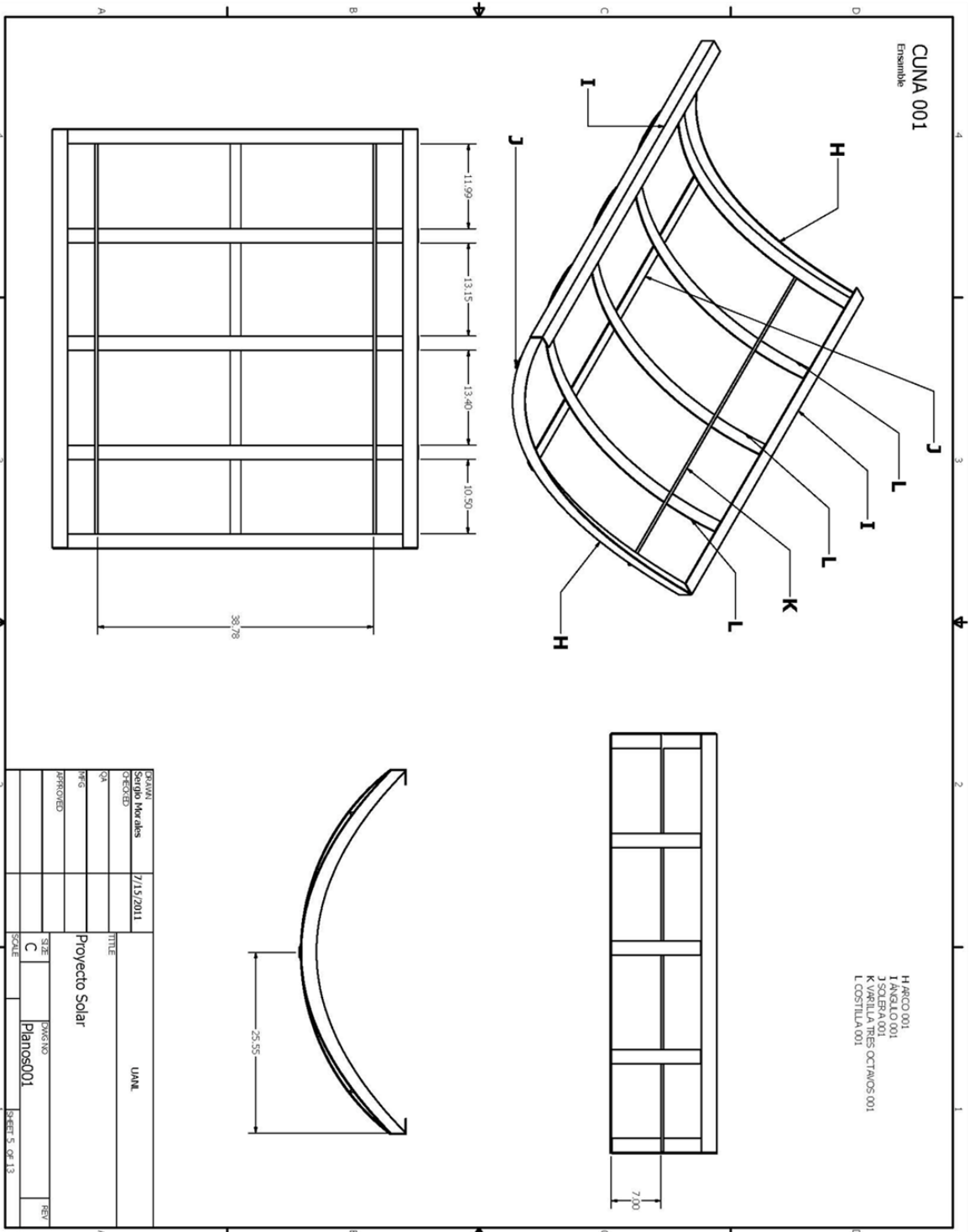


CARRO 001
Ensamble

- A PARTES CONSULTANTAS 001
- B BARRIL
- C CHAMBERA 001
- D RECIPIEN CILINDRICO ROLADO 001
- E BULOS CINCO OCTAVOS 001
- F VOLANTE 001
- G TENSOR

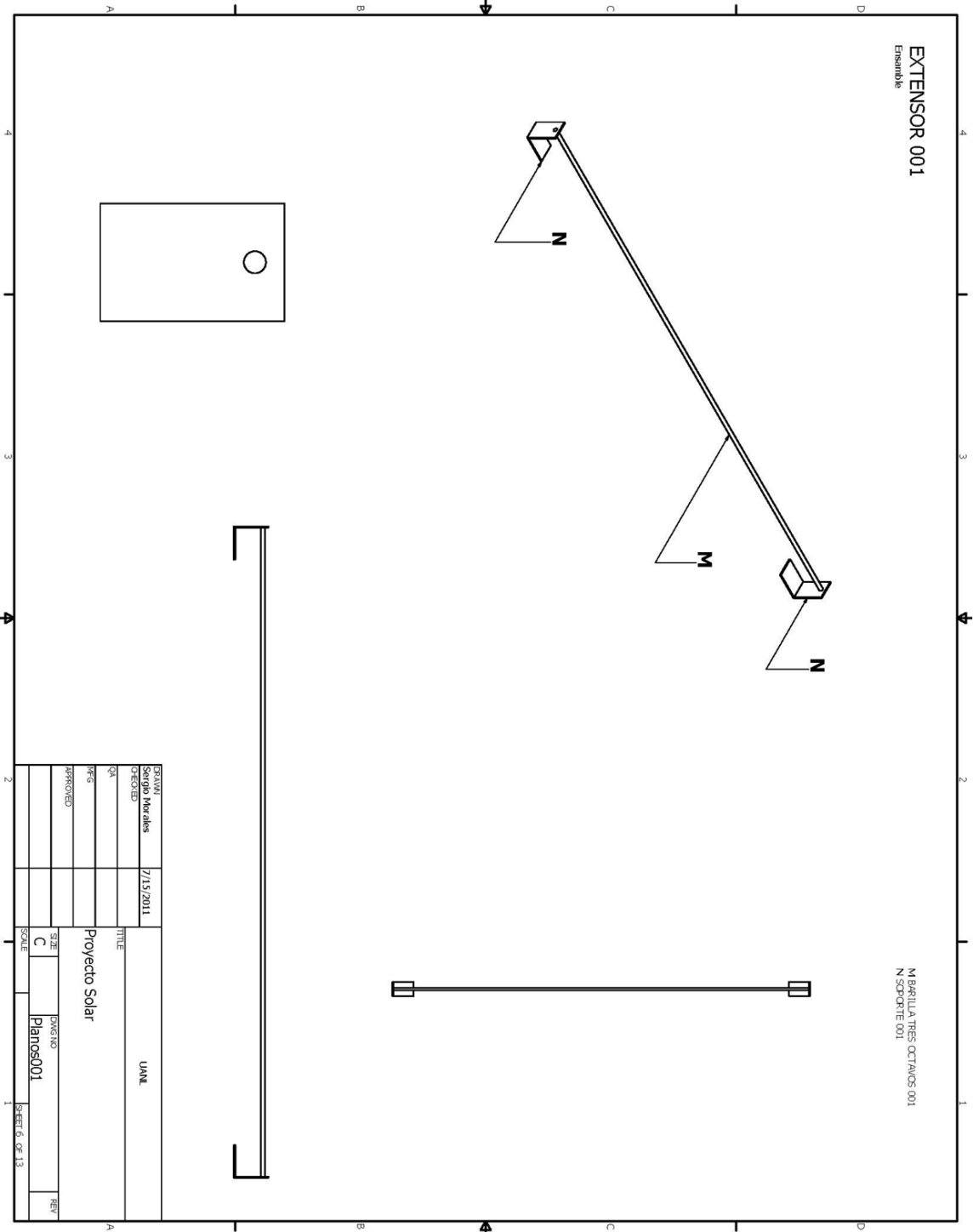


EXAMINADO	Sergio Morales	7/15/2011	TITULO	UMIL
CREADO			TITULO	UMIL
QA				
APROBADO				
SCALE	C	DIBUJADO	Planos001	REV
SCALE				HOJA 4 DE 13



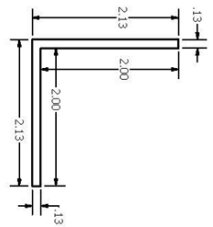
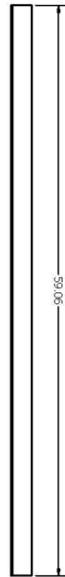
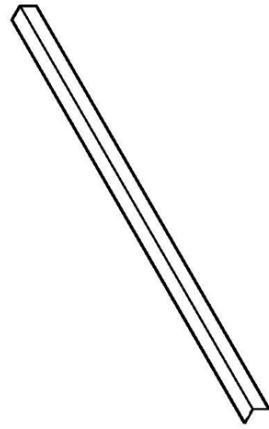
EXTENSOR 001
Ensemble

M BARILLA TRES OCTAVOS 001
N SOPORTE 001

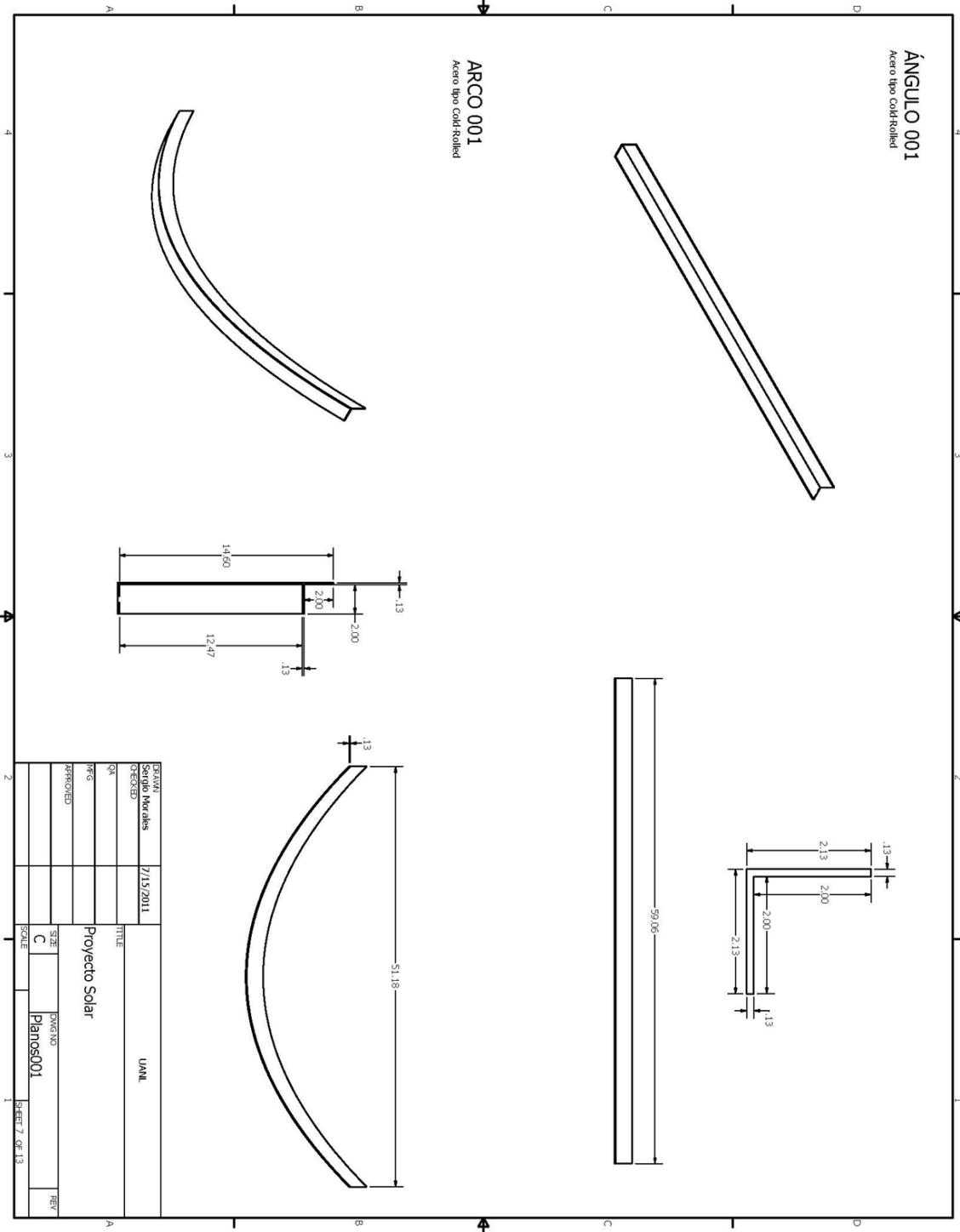
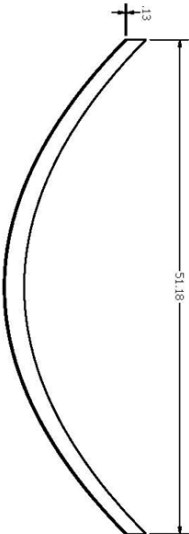
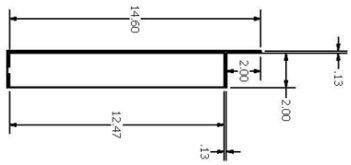
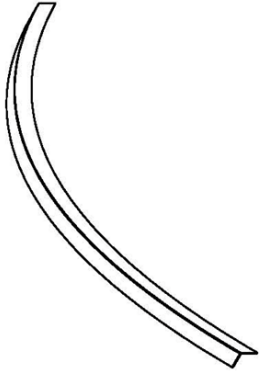


DATE	7/15/2011	TITLE	UNML
DESIGNED BY			
QA			
PROJ		Proyecto Solar	
APPROVED			
SCALE		SIZE	
		C	
		DRAWING	
		Planos001	
			SHEET 6 OF 13

ÁNGULO 001
Acero tipo Cold-rolled

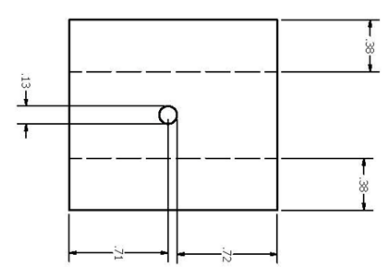
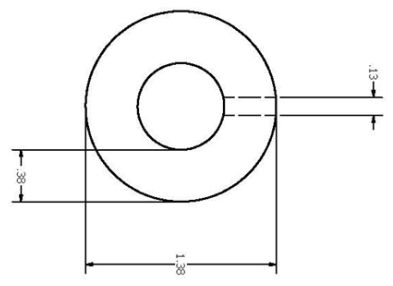
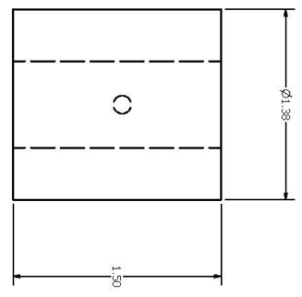
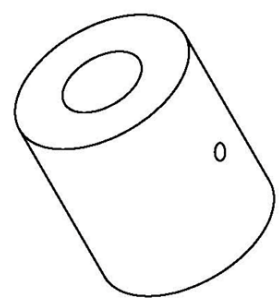


ARCO 001
Acero tipo Cold-rolled

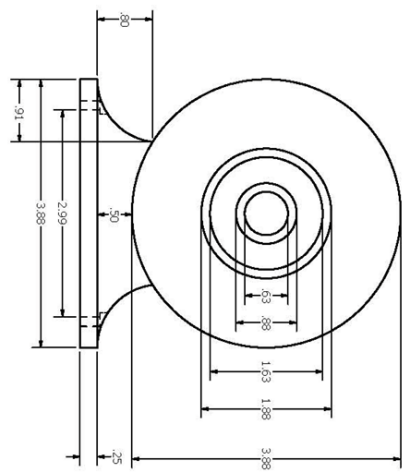
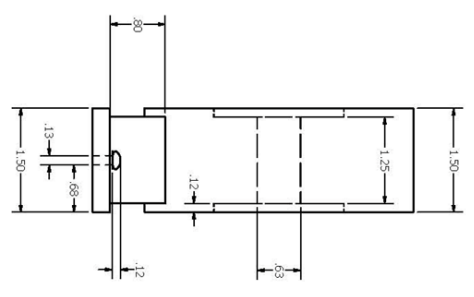
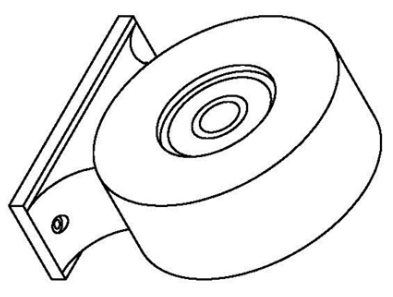


DESIGN	7/15/2011	UNIL
DRAWN		
CHECKED		
DATE		
TITLE	Proyecto Solar	
REV	SIZE	DWG NO
	C	Planos001
	SCALE	

BUJE DE CINCO OCTAVOS 001
Aluminio

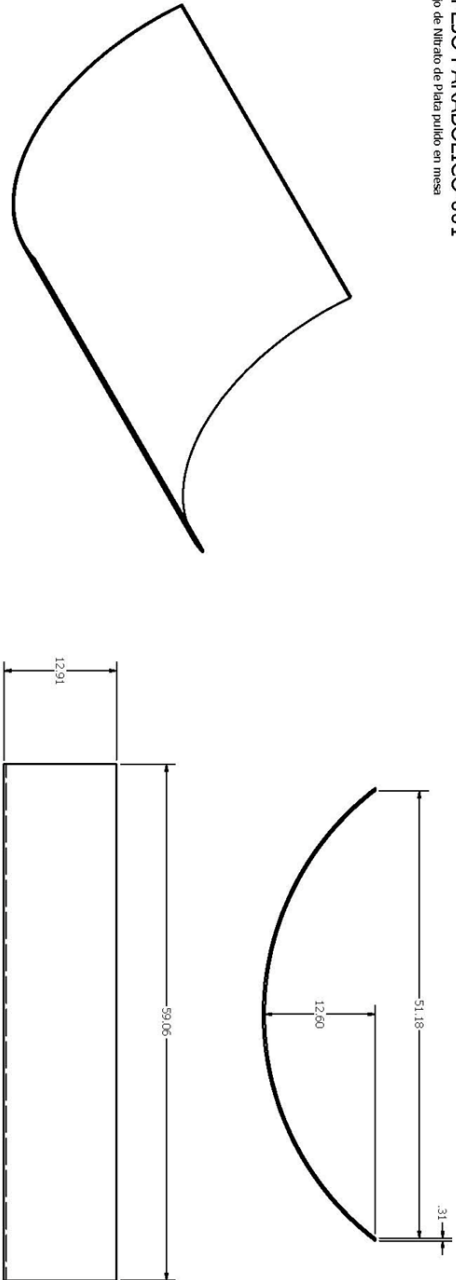


CHUMACERA 001
Caraca de Acero Templado
Bujes de Acero Templado

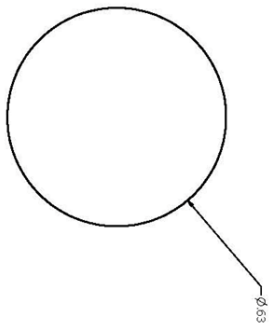
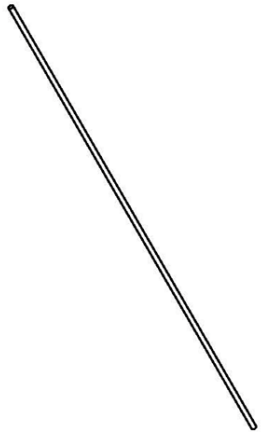


DATE	7/15/2011	UNL
DESIGNED	Urbano Morales	
QA		
PROJECT	Proyecto Solar	
APPROVED		
SCALE	C	DRAWING NO. Planos001
		SHEET 8 OF 13

ESPEJO PARABÓLICO 001
Espejo de Nitrato de Plata pulido en mesa



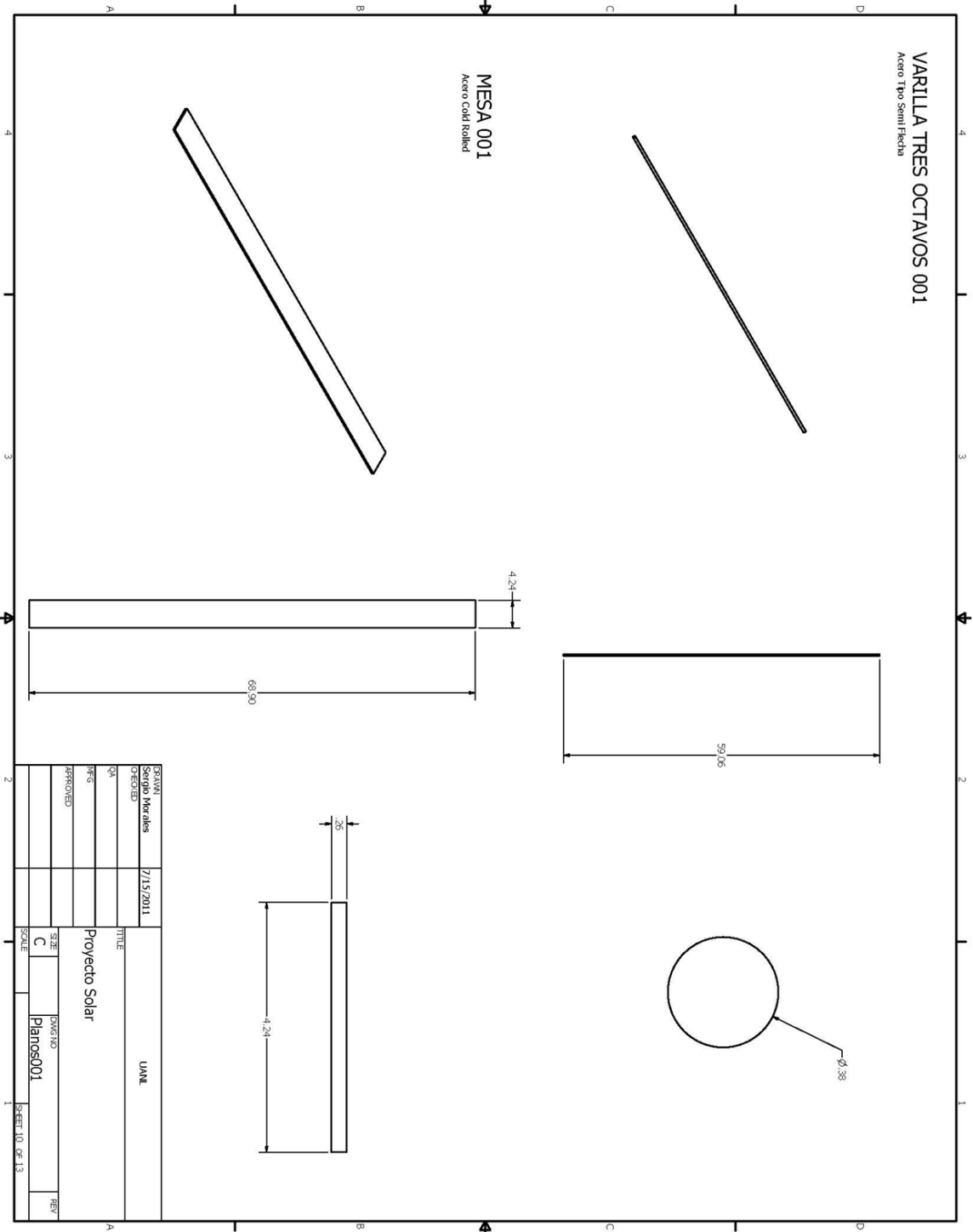
FLECHA CINCO OCTAVOS 001
Acero cold rolled



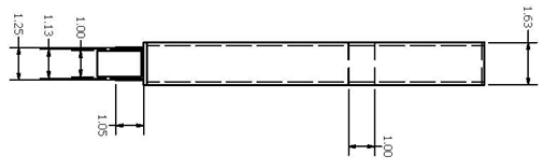
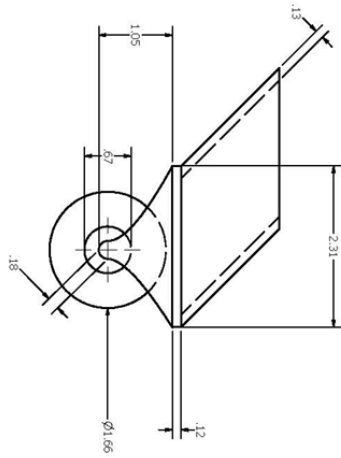
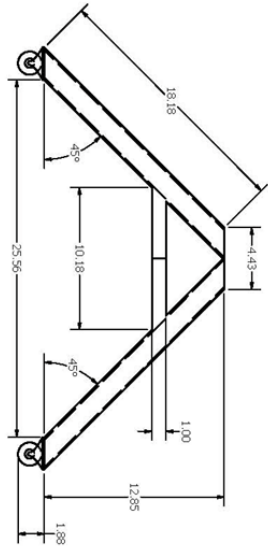
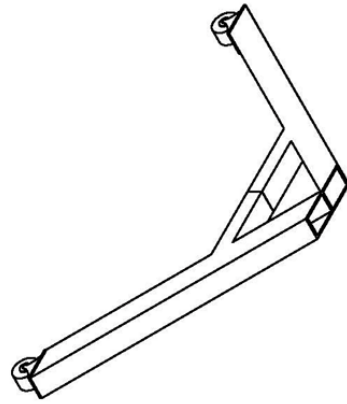
DESIGN	Scipio Morales	DATE	7/15/2011
CREATED		TITLE	UJNL
QA		Proyecto Solar	
PKS		SIZE	DWG NO
APPROVED		C	Plans001
		SCALE	SHEET 9 OF 13
			REV

VARILLA TRES OCTAVOS 001
 Acero Tipo Semi Fiecha

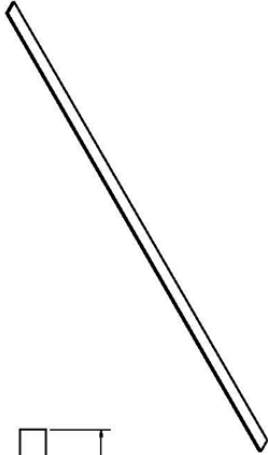
MESA 001
 Acero Cold Rolled



PATAS CON LLANTAS 001
 Acero Cold Rolled
 Laminas de Acero
 Baleros de Acero Templado

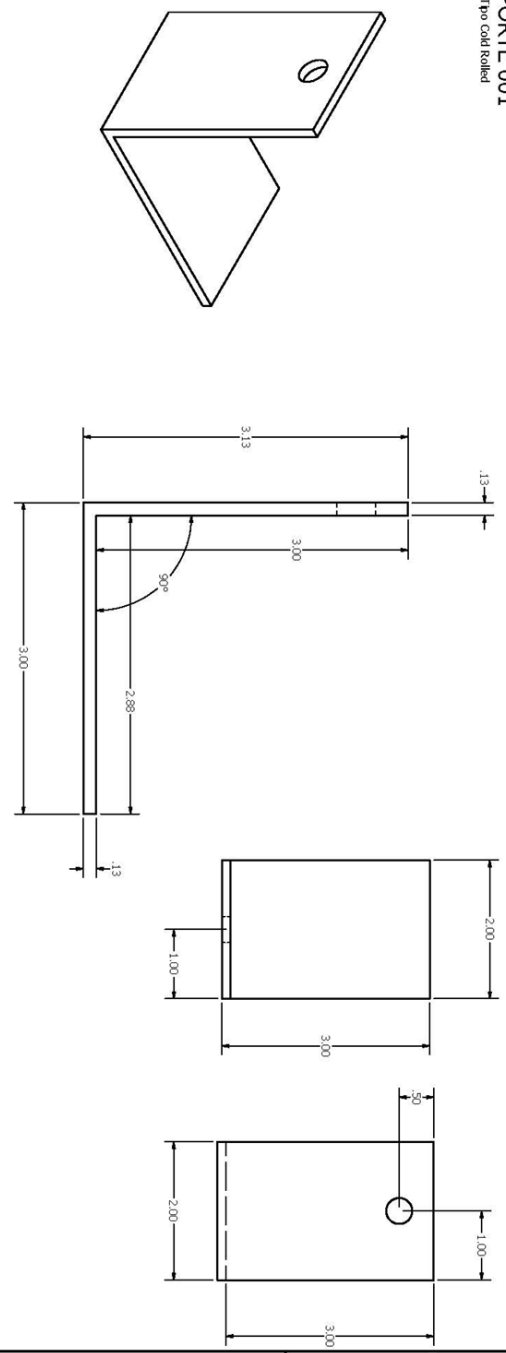


SOLERA 001
 Acero Tipo Cold Rolled

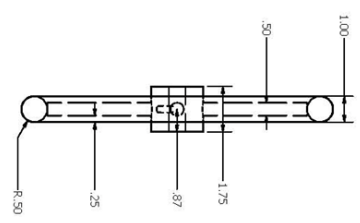
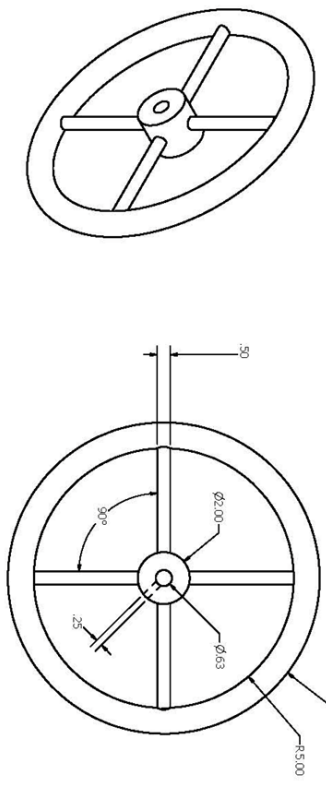


REGION	Sergio Morales	7/13/2011	UAML
CREATED			
QA			
TITLE	Proyecto Solar		
DATE			
APPROVED			
SIZE	C	DWGNO	Planos001
SCALE			
			SHEET 11 OF 13
			REV

SOPORTE 001
Acero Tipo Cold Rolled

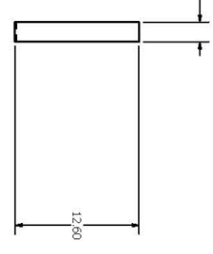
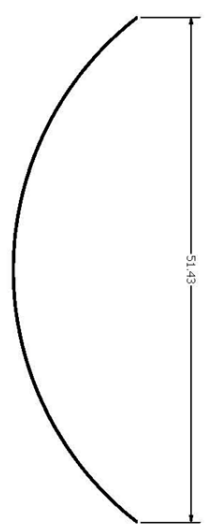
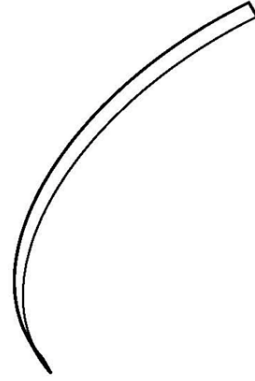


VOLANTE 001
Acero Vainado

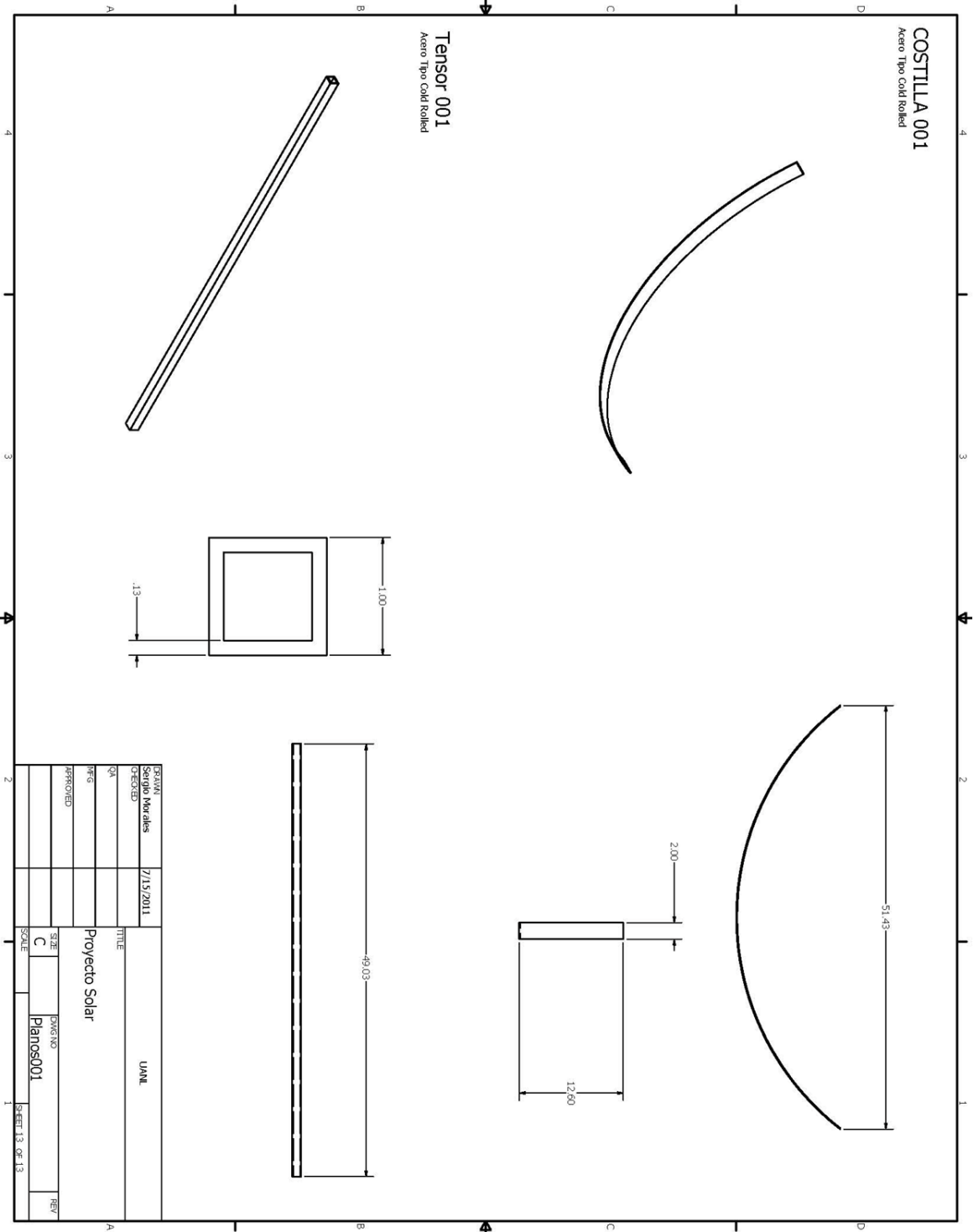
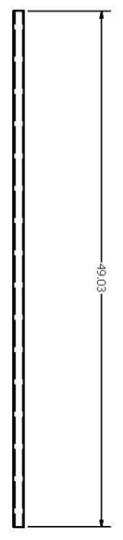
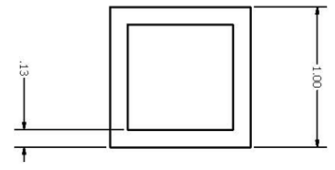
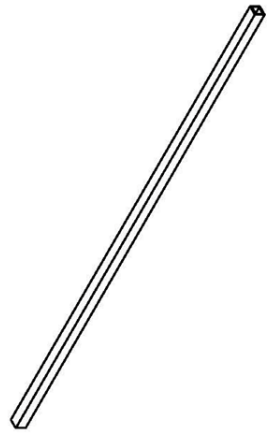


DATE	7/15/2011	TITLE	UMNL
DESIGNED		PROJECT	Proyecto Solar
DRAWN		SCALE	C
CHECKED		DWG NO	Planos001
APPROVED		SHEET	12 OF 13

COSTILLA 001
Acero Tipo Cold Rolled

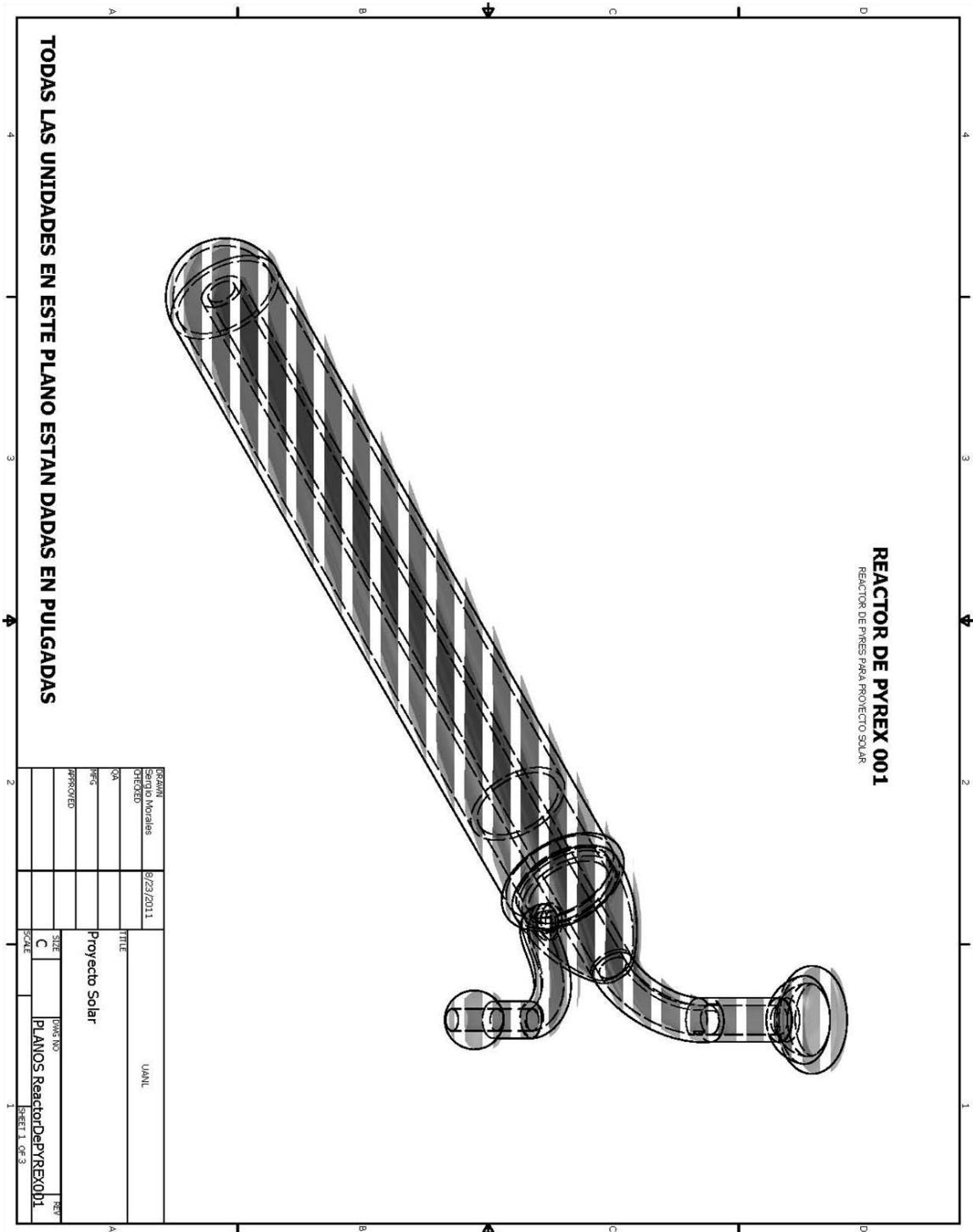


Tensor 001
Acero Tipo Cold Rolled

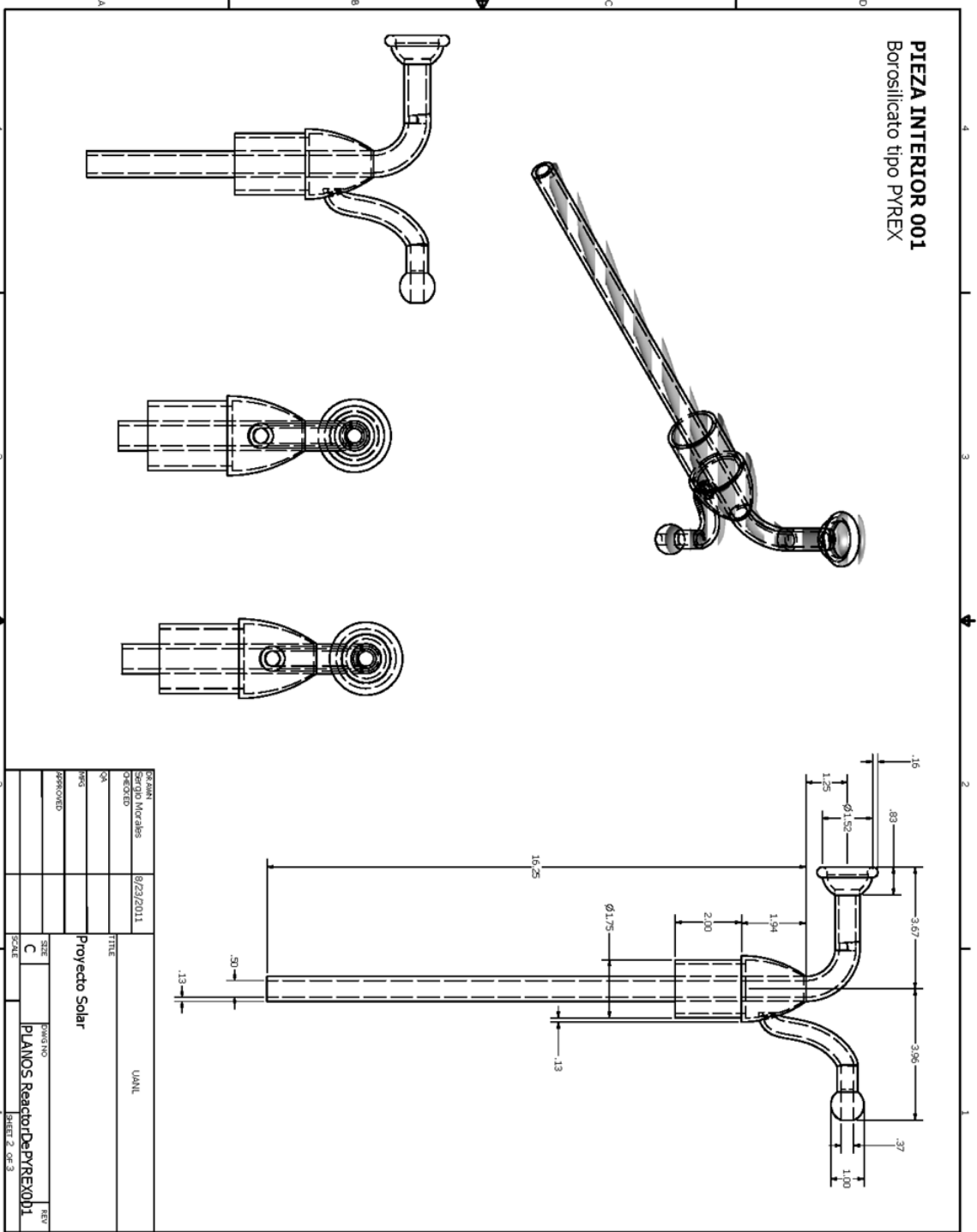


DESIGN	Sergio Morales	DATE	7/15/2011	TITLE	UMNL
CHECKED					
QA					
APP				Projecto Solar	
APPROVED					
SIZE	C	DRAWING	Planos001		REV
SCALE					SHEET 13 OF 13

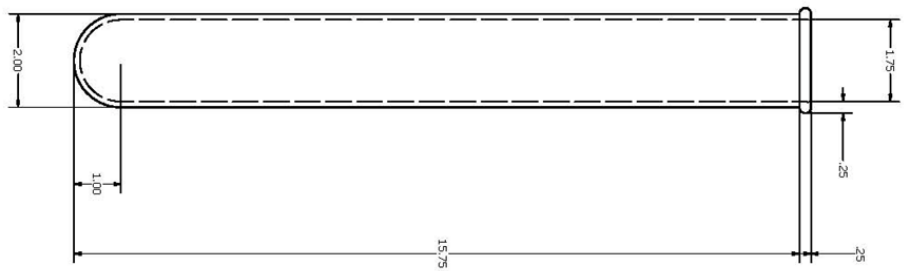
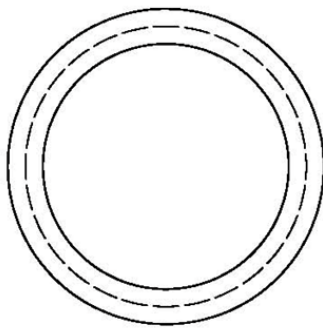
APÉNDICE II- Planos del reactor solar de borosilicato desarrollado y construido como parte de los objetivos del presente trabajo.



PIEZA INTERIOR 001
Borosilicato tipo PYREX



PIEZA EXTERIOR 001
Borosilicato tipo PYREX



PROYECTADO	SERGIO MORALES	8/23/2011	TÍTULO	UNAN
VERIFICADO				
APROBADO			Proyecto Solar	
ESCALA			SIZE	
			C	
			PLANOS Reactor De PYREX 01	
			REV	
			1	
			1	

APÉNDICE III- Valores utilizados durante el balance de materia y energía.

Parámetro	Variable	Valor	Unidad	Referencia
Eficiencia del concentrador por materiales	η	95.9	%	Presente trabajo
Área de apertura del concentrador	A	0.5785	m ²	Presente trabajo
Diámetro exterior del reactor	D	0.0508	m	Presente trabajo
Longitud del reactor	L	0.78	m	Presente trabajo
Absorbancia del PYREX	A_{PYREX}	8	%	Präzisions glas & optik. Thermal Glass, (2011)
Transmitancia del PYREX	T_{PYREX}	92	%	Präzisions glas & optik. Thermal Glass, (2011)
Absorbancia de la biomasa	A_{biomasa}	44	%	Lédé <i>et al.</i> , (1999)
Entalpía de reacción	H_{rxn}	24480	J/kg	Miranda <i>et al.</i> , (2009)
Capacidad calorífica del PYREX	$C_{p\text{PYREX}}$	753	Jkg/°C	Präzisions glas & optik. Thermal Glass, (2011)
Capacidad calorífica de la cáscara de naranja seca	$C_{p\text{naranja}}$	1244	Jkg/°C	Miranda <i>et al.</i> , (2009)
Capacidad calorífica del Helio	$C_{p\text{He}}$	5193	Jkg/°C	Himmelblau, (1997)

Referencias

Himmelblau D.M. Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química. Prentice Hall. Ed. 6, México, p. 662 (1997). ISBN 0-13-305798-4

Lédé J., Boutin O., Olalde G., Ferriere A. Solar flash pyrolysis of biomass direct measurement of the optical properties of biomass components. *Journal of Physics IV France*. 9: 369-372 (1999).

Miranda R., Bustos-Martinez D., Sosa Blanco C., Gutiérrez Villareal M.H., Rodríguez Cantú M.E. Pyrolysis of sweet orange (*Citrus sinensis*) dry peel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 86: 245-251 (2009).

Präzisions glas & optik. Thermal Glass. Block- Rolled Glass (2011) <<http://www.pgo-online.com/intl/katalog/pyrex.html>> Fecha de consulta: 21 de Noviembre de 2011.