



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE ZONA FOCAL DE
CONCENTRADOR SOLAR DE DISCO PARABÓLICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:

JOSÉ RAMÓN ESCOBAR LÓPEZ



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Armando Rojas Morín
2014**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE TEMÁTICO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1. Introducción	1
1.1 Objetivos y alcance del proyecto	1
2. Marco teórico	2
2.1 Energía Mundial	2
3. Intermitencia de la energía solar	6
4. Procesos termosolares	8
5. Concentradores solares en la actualidad	10
DISTAL I	10
DISTAL II	11
EURODISH	11
Planta solar PS10	12
Planta solar CESA-1	13
Planta solar de canal parabólico SEGS	15
CAPÍTULO 2. PUESTA A PUNTO DEL CONCENTRADOR DE DISCO PARABÓLICO	16
1. Transporte de las piezas del concentrador	16
2. Fijar de la base soporte del concentrador al concreto	18
3. Unir los segmentos del concentrador	20
4. Unir el concentrador al sistema de giro	21
5. Unir el concentrador y el sistema de giro a la base soporte	22
6. Unir el receptor al concentrador	23
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ÓPTICO Y PRUEBAS EXPERIMENTALES	25
1. Pruebas experimentales ópticas	26
2. Modelo Virtual	30
Forma solar	30
Propiedades ópticas	31
Etapas del Sistema	34

Opciones de trazado	35
Resultados	36
Mapas de flujo	37
CAPÍTULO 4 PROPUESTA DE RECEPTOR Y ANÁLISIS TÉRMICO	41
1. Definición del problema	41
2. Diseño del receptor	41
3. Planteamiento del modelo matemático	44
4. Solución numérica del receptor	45
4.1. Pérdidas de calor por desviación, reflectividad, absortancia y sombra	48
4.2 Parámetros de entrada para el análisis	50
4.3 Resultados de la simulación	51
6. Análisis de Resultados	56
7. Propuestas de Mejora	57
CONCLUSIONES	58
Limitantes del proyecto y recomendaciones posteriores	58
BIBLIOGRAFÍA	60
MESOGRAFÍA	60
ANEXOS	62
Anexo 1	62
Anexo 2	63
Anexo 3	65
Anexo 4	67

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Esta tesis presenta una aplicación para el aprovechamiento de la energía solar como fuente de energía térmica. Los estudios realizados consisten en un concentrador solar de disco parabólico con ángulo de apertura de 70°, cuya temperatura esperada de trabajo corresponde a una aplicación solar de alta temperatura.

1.1 OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO

El objetivo general de este proyecto es modelar el comportamiento de un sistema de concentrador solar de disco parabólico con un ángulo de apertura de 70°, que se encontraba desarmado y almacenado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El proyecto comienza con el transporte de las piezas del concentrador a su ubicación final, además del ensamblado e instalación de las mismas (documentado en el segundo capítulo de esta tesis).

Una vez instalado, el proyecto continúa en el tercer capítulo con una caracterización óptica experimental mediante diferentes pruebas físicas, apoyando a la par los resultados con una caracterización óptica teórica.

En el cuarto capítulo, ya contando con datos suficientes del comportamiento óptico del concentrador se hará una propuesta de aplicación para el sistema, y se propondrá un diseño de receptor para dicha aplicación. Una vez decidido el diseño del receptor se realizará un análisis térmico del mismo, con la finalidad de conocer las capacidades del sistema Concentrador-Receptor.

2. MARCO TEÓRICO

En el marco teórico de este capítulo analizaremos la perspectiva mundial de la energía solar como fuente energética, además de hacer una comparación de la energía solar con las principales fuentes de energía usadas en la actualidad, y analizar el impacto económico y ambiental que estas fuentes tienen. También se analizará la energía solar disponible, las principales aplicaciones existentes en energía solar, y los sistemas de concentradores solares de disco parabólico más importantes actualmente.

2.1 ENERGÍA MUNDIAL

Durante muchos años los requerimientos energéticos han sido cumplidos o saciados utilizando prácticamente solo combustibles fósiles, pero con el paso del tiempo se han necesitado cada vez más y más fuentes de energía para igualar la creciente demanda energética de cada país. Pero para explicar por qué la demanda crece, nos damos cuenta que el desarrollo económico de un país está ligado con el consumo energético de éste, esto puede ser debido, por ejemplo, a que si un país se desarrolla económicamente después de aumentar su producción de bienes, necesitará más energía para saciar esta producción mayor. Si bien la economía no está solamente relacionada con el consumo energético o la producción, sí podemos mencionar que hay una relación entre ellos.

El consumo energético mundial es debido a diferentes actividades, las principales son; Actividades manufactureras, transporte, servicios y uso doméstico. Como se muestra en la *Imagen 1.1* el sector manufacturero es la principal actividad de consumo energético, además de ser también la principal fuente de emisión de CO₂.

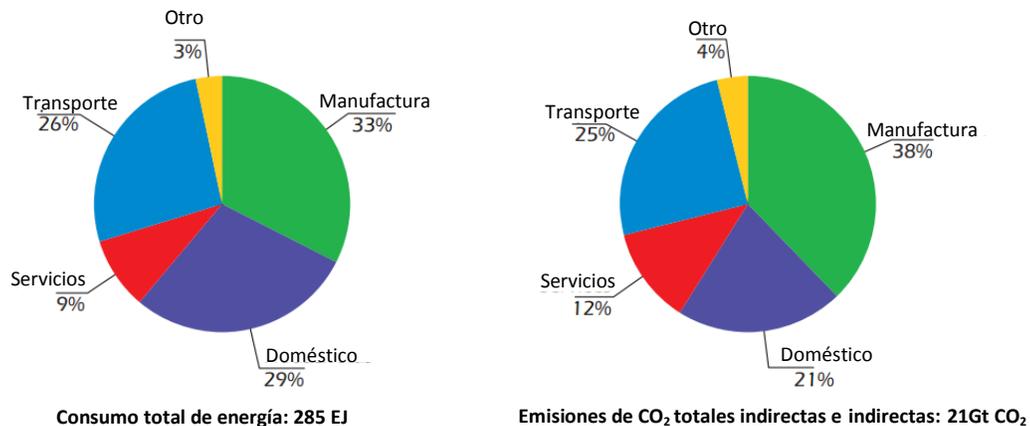


Imagen 1.1. Porcentajes de energía global consumida y emisiones globales de CO₂ por sector [International Energy Agency, 2007], traducción propia.

Con el paso del tiempo y el aumento en el consumo energético, nos damos cuenta que por varias razones es necesario cambiar las fuentes que utilizamos; una de estas razones es que tarde o temprano no se podrán cubrir las necesidades energéticas con métodos no renovables, lo cual implicaría una disminución o estancamiento de nuestro uso energético si no se recurre a otros métodos como base del consumo. Otra razón es la intensa contaminación ambiental causada por la quema de combustibles fósiles para la generación de la energía que usamos, emitiendo CO₂, que es el principal contaminante asociado al efecto invernadero y por lo tanto asociado al calentamiento global, además de otros contaminantes también emitidos como NO_x y SO₂,

causantes de la lluvia ácida. Es por esto que nos damos cuenta que, si disminuimos nuestro consumo de combustibles fósiles y por lo tanto nuestra emisión de gases contaminantes, el impacto ambiental se verá también disminuido.

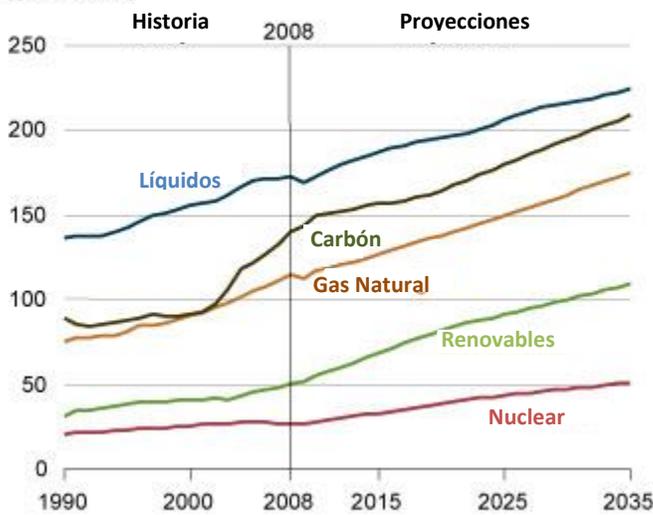
Aunada a las ventajas ambientales de un cambio de fuentes no renovables a fuentes energéticas renovables, también hay ventajas económicas al hacer este cambio, incluso la *International Energy Agency* menciona que cada dólar invertido en 2012 en fuentes energéticas limpias puede generar un ahorro de 3 dólares en compra de combustibles para el año 2050.

Entre las alternativas energéticas que tienen la característica de ser renovables están; la energía eólica, hidroeléctrica, maremotriz, solar, geotérmica, biomasa, entre otros.

En la *Imagen 1.2* se puede observar el consumo de energía por tipo de combustible o fuente de energía, durante el periodo del año 1990 hasta una proyección al 2035.

Consumo mundial de energía por combustible 1990- 2035

(Miles de billones de BTU)



Como podemos ver en el gráfico las energías renovables en conjunto ocupan el cuarto lugar de consumo energético mundial sobrepasados por los líquidos (generalmente basados en petróleo), carbón y gas natural. Y seguidos finalmente por la energía nuclear.

Imagen 1.2. Consumo energético mundial por fuente de energía. [U.S. Energy Information Administration, 2011], traducción propia.

Según la *U.S. Energy Information Administration* (EIA) el 10% de la energía total consumida mundialmente en 2008 proviene de fuentes renovables y se proyecta que para 2035 este porcentaje subirá al 14%, pero incluso con ese crecimiento resulta ser insuficiente el porcentaje de energía proveniente de fuentes renovables, ya que la situación actual y futura apunta a la inminente necesidad de tener a las fuentes renovables como la base del consumo, es decir, que las energías renovables sean nuestra principal fuente energética.

Habiendo analizado el consumo energético mundial y el porcentaje de éste con fuentes renovables, y teniendo en mente que la mayor parte del consumo energético mundial se da en la Red Eléctrica, ahora se analizaron las fuentes de generación de energía eléctrica para su distribución en la **Red Eléctrica en 2008** (*tabla 1.1.*).

Energía en Red eléctrica	
Billones de KWh	
Total	19.10427
No Renov	15.453292
Renovable	3.650974
Hidroeléctrica	3.113382
Geotérmica	0.060935
Eólica	0.211812
Solar	0.011315
Biomasa	0.25353

EIA 2008

Tabla 1.1. Generación de energía en Red Eléctrica. Datos obtenidos del EIA [U.S. Energy Information Administration, 2011]

Ahora visualicemos los datos en el gráfico mostrado en la *Imagen 1.3*, donde se separa la generación en renovables y no renovables:

Generación de energía mundial en Red Eléctrica (2008)

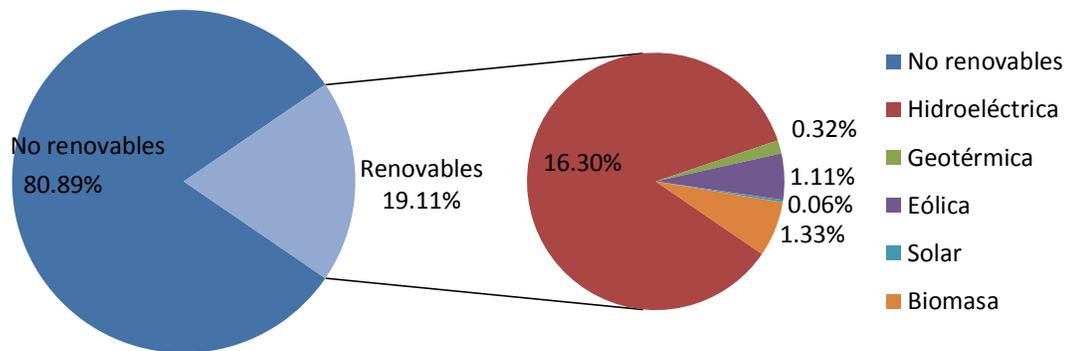


Imagen 1.3. Fuentes de generación de energía mundial en Red Eléctrica en 2008. [U.S. Energy Information Administration, mostrados en la Tabla 1.1].

En la *Imagen 1.3* se incluyen las fuentes de energía más importantes sólo para la generación en red eléctrica, es decir, se excluye la energía generada que no va a la red eléctrica (vehículos automotores, combustibles fósiles usados para calor de procesos en la industria, cocina y otros usos domésticos, etc.), entonces notamos que en el gráfico mencionado el porcentaje generado por fuentes renovables es 19.11%. De este 19.11% el 16.3% es proveniente de energía hidroeléctrica, lo cual demuestra que la generación por energías renovables está dominada por la hidroeléctrica.

Analizando el porcentaje de la energía solar en la *Imagen 1.3* es notable como esta fuente (en la cual se basa este trabajo de tesis) hasta ahora no es una de las principales fuentes de energía mundial para la red eléctrica, ocupando sólo el 0.06 % en generación, pero a pesar de esto, es un recurso que puede ser enormemente aprovechado en países con una buena radiación solar media como México. Este recurso puede apoyar la generación de energía para la red eléctrica con centrales termosolares (actualmente con sistemas de torre central, sistemas de canal parabólico o concentradores de disco parabólico con motor Stirling), pero además puede apoyar el uso de energía para calor de procesos en la industria o incluso en el uso doméstico, como concentradores de disco parabólico usados como cocinas solares, hornos solares, para destilación solar, etc.

Para mostrar el potencial de la energía solar notemos que la tierra recibe en promedio en el exterior de su atmósfera 1.73×10^{14} KW todo el tiempo [Pedro Fernández Diez, 1992], con una variación de $\pm 3\%$ debido al cambio de la distancia entre la tierra y el sol, de esta energía sólo el 47% llega a la superficie terrestre. En la *Imagen 1.4* se muestra en un esquema simple de un balance de radiación terrestre diaria, donde se ve como se va perdiendo la radiación al llegar a la superficie terrestre y a donde es que va cada porcentaje de energía perdida, teniendo las mayores pérdidas en reflexión por las nubes con un 23%.

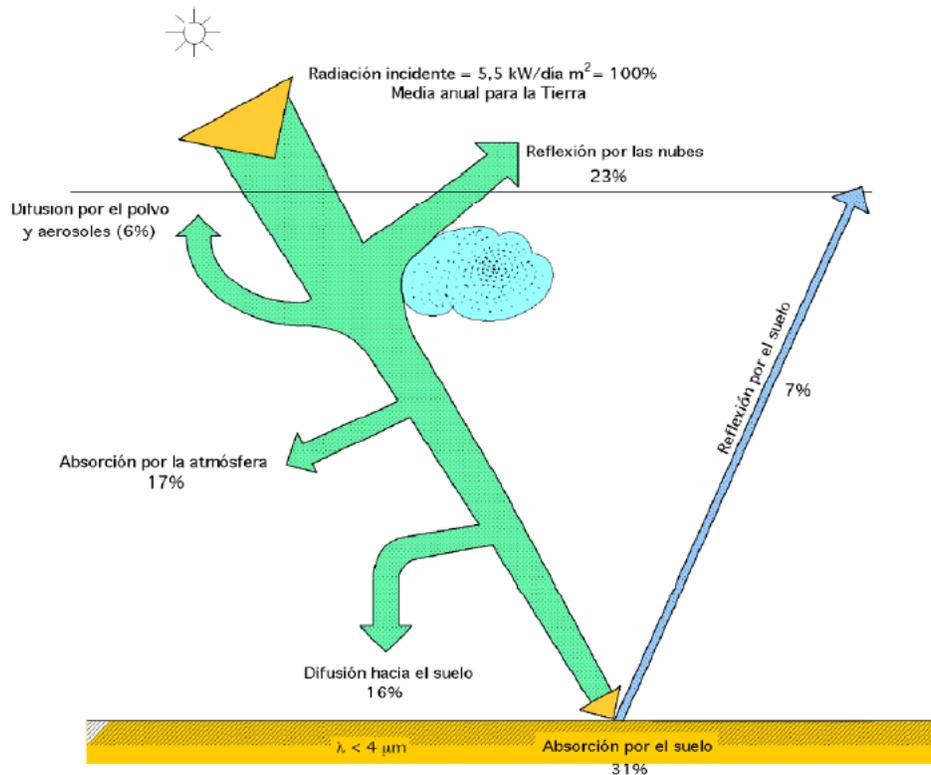


Imagen 1.4. Balance de radiación solar en la tierra [Pedro Fernández Diez, 1992]

A pesar de que la energía perdida representa un porcentaje considerable (como se muestra en la *Imagen 1.4*), se sigue recibiendo en la superficie una cantidad importante de energía.

Otra característica importante a mencionar respecto a la radiación solar es que no presenta una distribución uniforme sobre la superficie terrestre, es decir, la intensidad de la radiación recibida

en diferentes partes de la superficie terrestre no es la misma, esto debido a que condiciones tales como la altura sobre el nivel del mar o la posición geográfica analizada.

Para notar que la radiación solar no es uniforme recurramos a la *Imagen 1.5*, en la cual se observa un mapa de la radiación media mundial calculada con datos tomados de 1986 a 2005 por la empresa de software meteorológico *Meteonorm* [Meteonorm, 2011]. A la izquierda del mapa se muestra la escala utilizada, que si comparamos con el mapa es observable que México tiene una radiación solar media anual de aproximadamente 2000 KWh/m², lo que comparado con los demás países en el mapa nos da pie a afirmar que México es un país con altas posibilidades para el aprovechamiento de la energía solar, notando por ejemplo que la mayoría de los países europeos tienen una radiación solar aproximada de menos de 1500 KWh/m² según se ve en la escala.

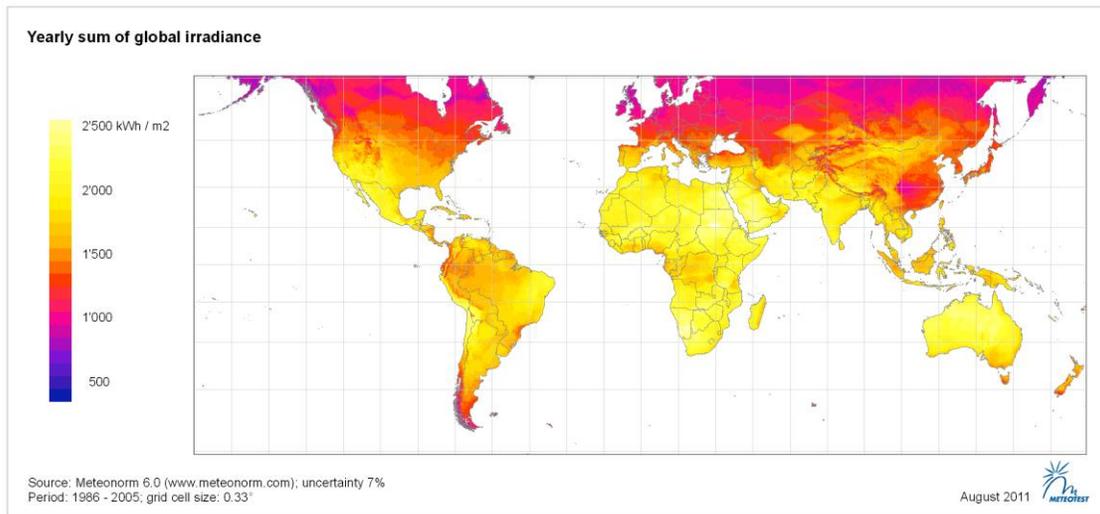


Imagen 1.5. Radiación solar media mundial anual, periodo: 1986 – 2005. [Meteonorm, 2011]

Además de la buena radiación solar media de México, también notamos en la *Imagen 1.5* que la radiación solar media se mantiene alta en todo el territorio mexicano, es decir, encontramos una radiación solar relativamente uniforme en México, por lo que esta energía puede ser aprovechada en prácticamente todo el territorio mexicano.

3. INTERMITENCIA DE LA ENERGÍA SOLAR

A pesar de la enorme cantidad de energía que recibimos del sol y lo beneficioso que es su aprovechamiento, no sólo debemos analizar las ventajas de esta fuente, también debemos reconocer las deficiencias que tiene este tipo de energía. El principal problema de esta fuente es la intermitencia de la recepción, ya que basta con tener nubosidades para disminuir enormemente la recepción energética, aunado a los periodos del día donde no recibimos energía directamente por parte del sol como la noche. Para explicar más concretamente como la recepción energética varía dependiendo de la hora del día, analicemos este fenómeno en Ciudad Universitaria con un gráfico de la *Imagen 1.6* del Observatorio de Radiación Solar del **Centro Regional de Medición de la Radiación AR-IV, OMM**, del instituto de Geofísica de la UNAM.

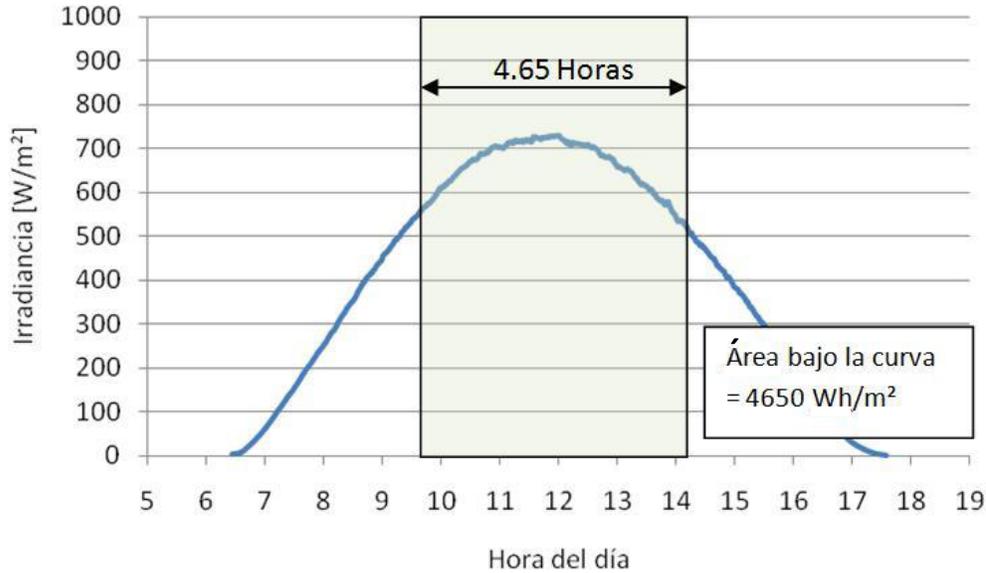
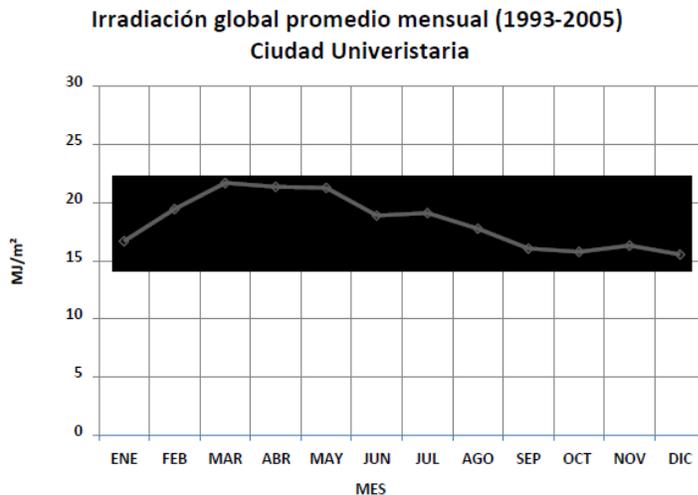


Imagen 1.6. Horas pico de radiación solar diaria (1993 – 2005) [Instituto de Geofísica UNAM, 2008].

Como vemos en el *Imagen 1.6* la radiación solar diaria en Ciudad Universitaria tiene 4.65 horas pico, de antes de las 10 hrs hasta poco después de las 14:00 hrs. Siendo estas horas las ideales para el aprovechamiento de la energía solar. Es notorio como la potencia recibida varía dependiendo de la hora con una forma senoidal, alcanzando su punto máximo aproximadamente a las 12:00.

En el caso de los cambios en la potencia recibida no solo influye la hora del día, también un punto importante es el mes del año, lo cual también resulta una desventaja para su aprovechamiento porque no se tienen niveles constantes de radiación. En la *Imagen 1.7* se puede observar los niveles de energía solar recibida dependiendo del mes en Ciudad Universitaria.



Es observable que el mes de mayor radiación solar recibida es marzo, seguido de abril y mayo, cuya radiación solar supera los 20 MJ/m^2 , siendo estos meses los ideales para el máximo aprovechamiento del sol.

También podemos ver que Diciembre es el mes con menor radiación solar, apenas por encima de los 15 MJ/m^2 .

Imagen 1.7. Radiación mensual (1993-2005) [Instituto de Geofísica UNAM, 2008]

Esta variación de la radiación solar con respecto del mes es dependiente de varios factores, pero principalmente es debido a la posición relativa entre el sol y la tierra debido al movimiento de rotación y traslación de la tierra. Este fenómeno es representado por un parámetro conocido como declinación (δ), la declinación es la posición angular del Sol al mediodía con respecto del plano del ecuador, y este ángulo presenta variaciones a lo largo del año debido a que el ángulo de rotación terrestre está inclinado $23^{\circ}45'$ del eje perpendicular al plano que representa el movimiento de traslación terrestre, dando como consecuencia un ángulo de declinación máximo de $23^{\circ}45'$ [Pedro Fernández Díez, 1992]. En la *Imagen 1.8* se puede observar de manera más clara la variación del ángulo de declinación respecto del mes.

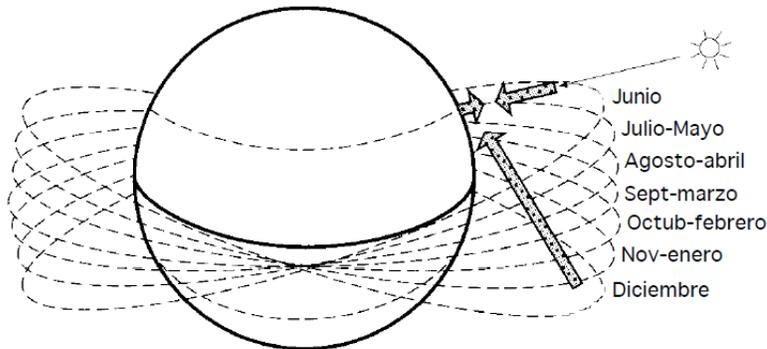


Imagen 1.8. Posición relativa del sol durante el año. [Pedro Fernández Díez, 1992]

4. PROCESOS TERMOSOLARES

Existen diferentes tipos de sistemas termosolares utilizados actualmente, la forma en que éstos se clasifican es por la temperatura máxima alcanzada, clasificándose en tres grupos principales:

- **Sistemas de baja temperatura:** Son aquellos que se encuentran en un rango aproximado de entre 35°C a 100°C , generalmente consisten en colectores de placa plana o tubos de vacío donde se calienta un fluido de trabajo por la acción directa del sol.
- **Sistemas de media temperatura:** Estos van de los 100°C hasta los 300°C aproximadamente. Los sistemas de media temperatura más usados actualmente son los concentradores de canal parabólico, donde se calienta un fluido de trabajo con la radiación del sol concentrada por espejos en forma de canal parabólico.
- **Sistemas de alta temperatura:** Son aquellos donde las temperaturas son superiores a los 300°C , principalmente consisten en sistemas de torre central, horno solar y en concentradores de disco parabólico, entre los más importantes.

Hay diferentes tipos de concentradores solares, los cuales tienen características diferentes, en la *Imagen 1.9* se ven diferentes tipos de concentradores comúnmente usados.

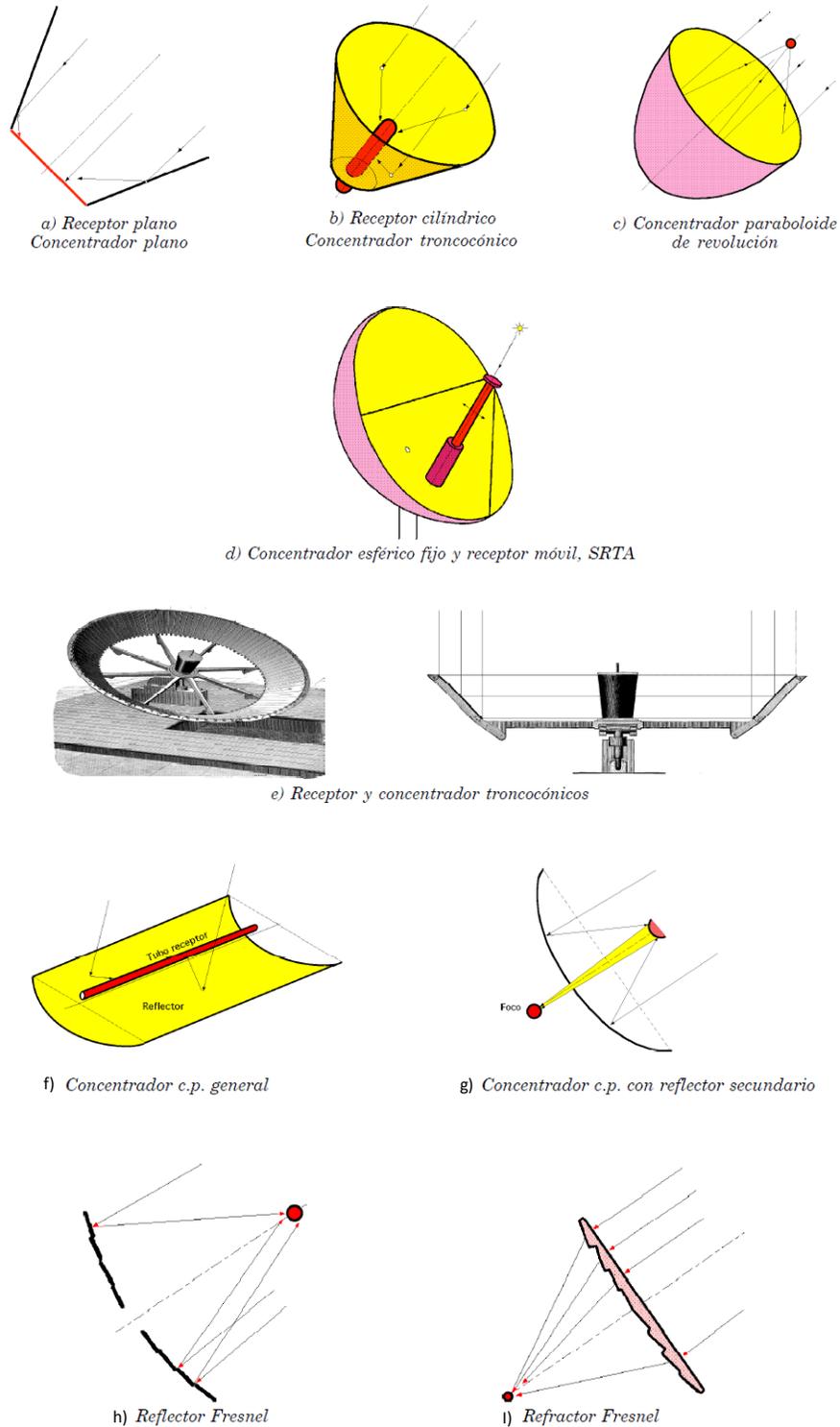


Imagen 1.9. Tipos de concentradores solares [Pedro Fernández Díez, 1992]

Esta tesis está enfocada a la caracterización de un paraboloide de revolución (mostrado en el inciso c) de la *Imagen 1.9* con temperaturas esperadas superiores a los 300°C, por lo que se considera que es una aplicación solar de **alta temperatura**.

Los procesos termosolares de alta temperatura tienen un mayor aprovechamiento en el sector de generación de energía en plantas solares, y como calor de proceso en el sector industrial o manufacturero, ya que son muy pocos los procesos ajenos a estos sectores que requieren el nivel de concentración de este tipo de sistemas, aunque hay que mencionar que algunos sistemas de alta temperatura son también usados como hornos solares o estufas solares de uso doméstico.

5. CONCENTRADORES SOLARES EN LA ACTUALIDAD

Actualmente hay diversas instalaciones con concentradores solares, a continuación se describirán brevemente algunos de los sistemas de concentración con disco parabólico más importantes a nivel mundial.

DISTAL I

Este proyecto está en operación desde 1992, e inicialmente consistía en 3 unidades de disco parabólico.

- Cada concentrador tiene un diámetro de 7.5 (m).
- Además es capaz de concentrar hasta 40 (kWt) en su zona focal.
- Con ayuda de un motor Stirling SOLO V160 ubicado en su zona focal, el concentrador puede generar 9 (kWe).
- La reflectividad de su superficie es de 94%
- Es capaz de concentrar 12,000 veces la luz solar
- El sistema de concentración tiene una mancha focal de 12 (cm) de diámetro.
- Su distancia focal es de 4(m).

Dos de las 3 unidades con las que contaba el proyecto fueron desmanteladas en el año 2000. En la *Imagen 1.10* se muestra el concentrador Distal 1 en operación en la planta solar de Almería España.



Imagen 1.10. Concentrador Distal I en operación planta de Almería, España [Plataforma Solar de Almería PSA online, www.psa.es]

DISTAL II

Este proyecto entró en operación después del Distal I, en los años 1996 y 1997, y fueron instalados también 3 unidades de disco parabólico.

El concentrador tiene las siguientes características generales:

- Cada concentrador tiene un diámetro de 8.5 (m).
- Es capaz de concentrar hasta 50 (kWt) en su zona focal.
- Con ayuda de un motor Stirling SOLO V161 ubicado en su zona focal, el concentrador puede generar 10 (kWe).
- La reflectividad de su superficie es de 94%
- Es capaz de concentrar 16,000 veces la luz solar
- Su distancia focal es de 4.1(m)

En la *Imagen 1.11* se muestra el concentrador Distal II en operación en la planta solar de Almería España.

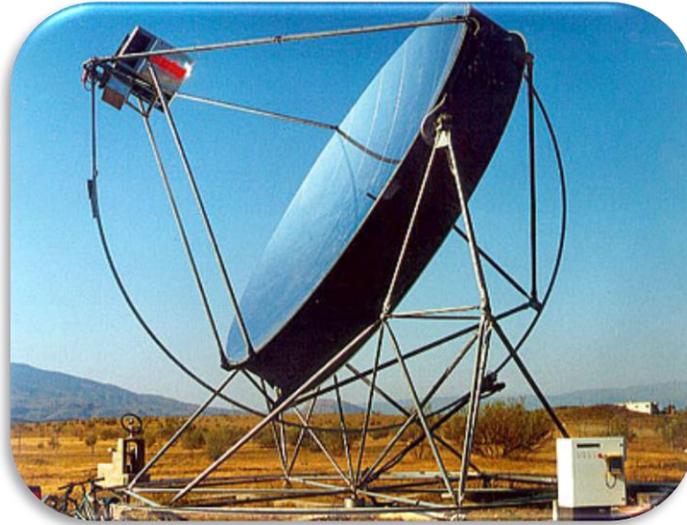


Imagen 1.11. Concentrador Distal II en operación planta de Almería, España [Plataforma Solar de Almería PSA online, www.psa.es]

EURODISH

Este proyecto fue realizado en colaboración entre España y Alemania, consiste en dos concentradores, en los cuales se trató de mejorar el diseño del concentrador Distal II (reduciendo costos de los componentes, con nuevos sistemas de fabricación, mejorando además el motor Stirling SOLO V161, entre otras mejoras).

Los concentradores EuroDISH tienen las siguientes características:

- Cada concentrador tiene un diámetro de 8.5 (m).
- Con ayuda de un motor Stirling SOLO V161 ubicado en su zona focal, el concentrador puede generar 10 (kWe).
- La reflectividad de la superficie es de 94%.

- Su distancia focal es de 4.5 (m)



Imagen 1.12 Concentrador solar EuroDISH en operación en planta Almería, España [Plataforma Solar de Almería PSA online, www.psa.es]

Ahora se describirán algunos de los sistemas de concentración solar de torre central más importantes en la actualidad:

PLANTA SOLAR PS10

Esta planta solar de torre central fue puesta en funcionamiento en marzo de 2007 (Almería España), aunque se inició en el año 1999. Para la PSA (Planta solar Almería) ha sido un punto de partida para poder generar investigaciones y el progreso de los concentradores solares, teniendo en este caso múltiples reflectores solares apuntando a un solo receptor.

La planta solar PS10 tiene las siguientes características:

- Tiene una Potencia nominal bruta de 11MW
- Concentradores de torre central
- Cuenta con 624 helióstatos de 120 m² cada uno y una torre solar de 114metros de altura
- Posee un campo solar de 60 hectáreas
- Puede lograr 30 minutos de operación bajo condiciones de baja radiación y periodos de nula insolación gracias a su poder de almacenamiento
- Tiene una producción que equivale a 5,500 hogares
- Evita la emisión de 6,000 toneladas de CO₂ anuales

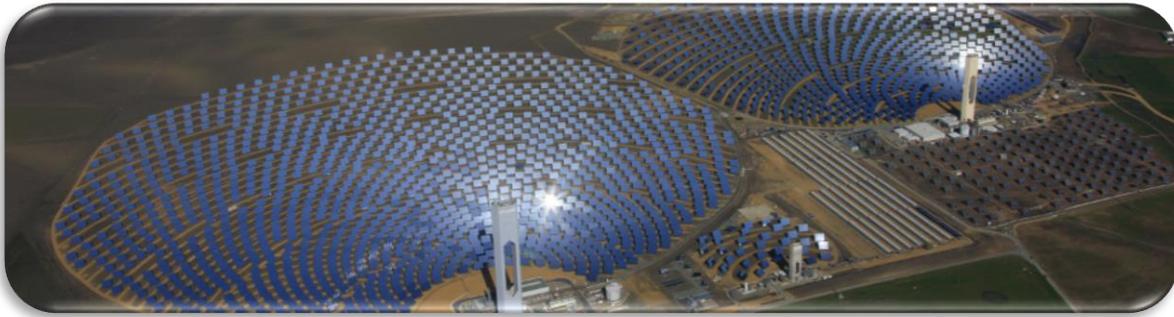


Imagen 1.13 Planta solar PS10 en operación en Solúcar, Sevilla [Abengoa Solar, 2011 ,www.abengoasolar.com]



Imagen 1.14 Planta solar PS10 en operación en Solúcar, Sevilla [Abengoa Solar, 2011 ,www.abengoasolar.com]

PLANTA SOLAR CESA-1

Este proyecto fue inaugurado en mayo de 1983 en Almería España, y aunque actualmente su función no es generar electricidad, se considera uno de los sistemas de torre central más importantes debido a que realiza ensayos de piezas y subsistemas (heliostatos, receptores solares, sistemas de almacenamiento térmico, turbinas de gas solarizadas, sistemas de control e instrumentación).

Las capacidades de la planta solar CESA-1 son las siguientes:

- Cuenta con 16 filas y una extensión de 330 x 250 m
- Posee 300 heliostatos de 39.6m² de superficie cada uno
- Tiene una reflectividad promedio del 90%
- Potencia máxima térmica de 7 MW en el receptor
- Irradiancia típica 950 W/ m²
- Flujo térmico pico en el receptor de 3.3 MW/m²



Imagen 1.15 Concentrador de torre central CESA-1 en Almería, España [Plataforma Solar de Almería PSA online, www.psa.es]



Imagen 1.16 Torre central del CESA-1 [Plataforma Solar de Almería PSA online, www.psa.es]

Además de sistemas de concentradores solares de disco parabólico y de torre central también se utilizan los sistemas de concentradores de canal parabólico de manera importante para el aprovechamiento de la energía solar térmica, a continuación se describen algunas de las plantas más importantes.

PLANTA SOLAR DE CANAL PARABÓLICO SEGS

Una de las plantas solares más grandes del mundo situada en el Desierto de Monjave en California, Estados Unidos, capaz de abastecer a más de 230,000 casas durante su producción pico en el día. Está dividida en tres secciones: SEGS I-II (de 44 MW), SEGS III-VI (de 150 MW) y SEGS VIII-IX (de 160 MW)

Las capacidades de la planta solar de canal parabólico SEGS son las siguientes:

- Cuenta con una capacidad instalada de 354 MW
- Genera 662 GWh de energía al año
- Posee más de 600 hectáreas
- Cuenta con más de 900,000 espejos



Imagen 1.17 Planta solar de canal parabólico SEGS, Desierto de Monjave en California, Estados Unidos [Nextera energy resources, www.nexteraenergyresources.com]

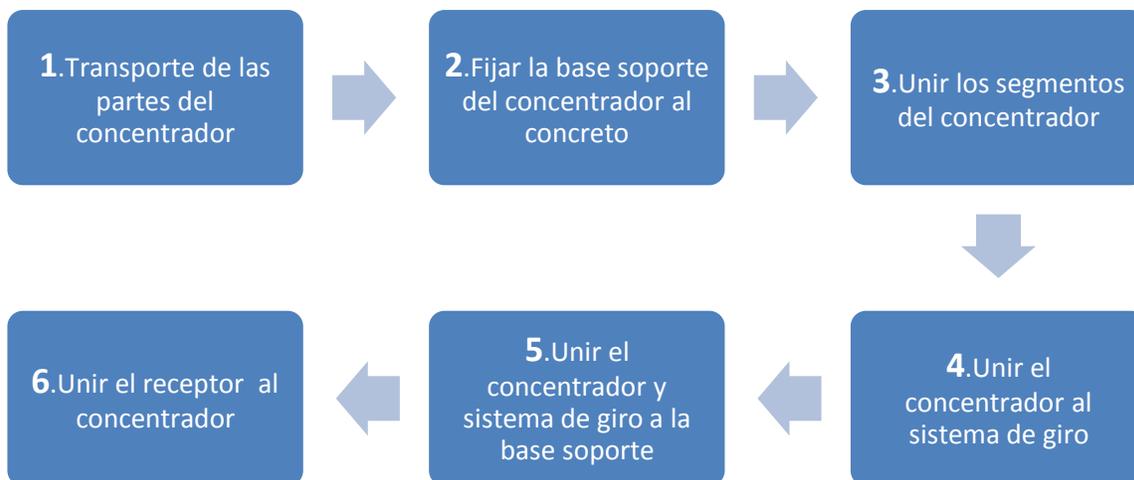


Imagen 1.18 Canales parabólicos de la planta SEGS, Desierto de Monjave en California, Estados Unidos [Nextera energy resources, www.nexteraenergyresources.com]

CAPÍTULO 2. PUESTA A PUNTO DEL CONCENTRADOR DE DISCO PARABÓLICO

En este capítulo se revisará la puesta en funcionamiento de nuestro sistema, ya que el concentrador de disco parabólico en el cual se basa esta tesis se encontraba desarmado y almacenado al comenzar el proyecto, por lo que se debieron tomar varias medidas para llevarlo hasta su instalación y finalmente a utilizarlo satisfactoriamente como concentrador solar.

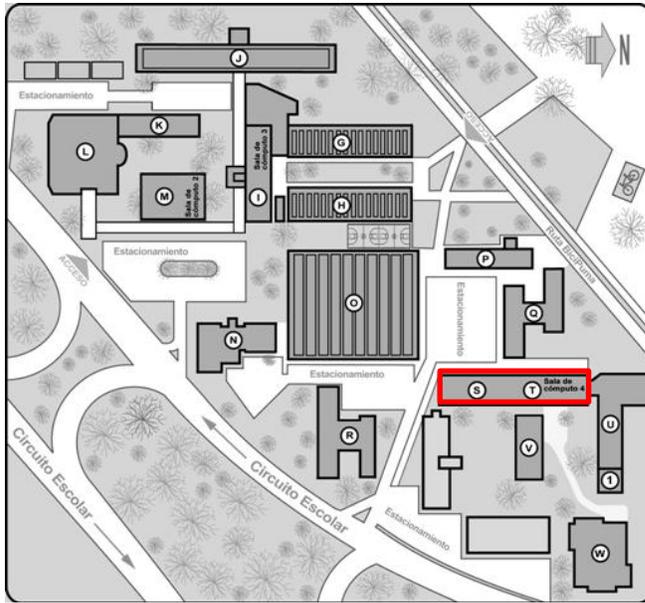
A continuación se presenta un diagrama simplificado en orden cronológico de los pasos que se realizaron para poner en funcionamiento el Concentrador de Disco Parabólico (CDP):



Ahora que conocemos la línea de trabajo seguida, se describirán uno a uno los puntos mencionados para la puesta en funcionamiento del concentrador.

1. TRANSPORTE DE LAS PIEZAS DEL CONCENTRADOR

Las partes del concentrador inicialmente se encontraban en el Posgrado de la Facultad de Ingeniería (ubicado en el conjunto Sur). Y después de gestionar la mejor ubicación para el concentrador, y con el apoyo del departamento de Máquinas Térmicas, se trasladó a pie el concentrador y todas sus partes a la azotea del Laboratorio de Máquinas Térmicas. Para una descripción más clara de las ubicaciones, se muestran mapas de la ubicación de origen y destino en las *Imágenes 2.1 y 2.2*.

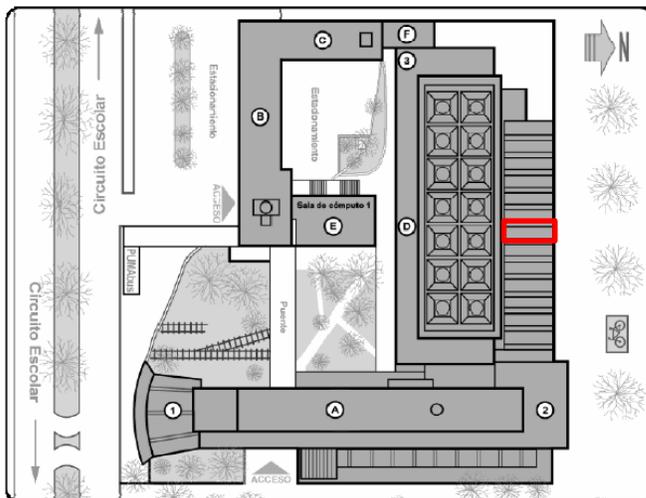


En la *Imagen 2.1* se muestra un mapa del conjunto sur de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, ubicada en Ciudad Universitaria.

La ubicación inicial del concentrador desarmado fue el segundo piso del Edificio de Posgrado que en este mapa está marcado con la letra “S” y encerrado en un cuadro rojo.

Conjunto Sur (División de Ciencias Básicas y Posgrado)	
G Laboratorios de Ciencias Básicas	P Divisiones de Ingeniería Mecánica e Industrial y de Ingeniería Eléctrica
H Laboratorios de Ciencias Básicas	Q Edificio Luis G. Valdés Vallejo
I Torre de Ciencias Básicas	R División de Ingenierías Civil y Geomática
J Ala poniente de Ciencias Básicas	S Edificio de Posgrado
K Centro de Docencia Gilberto Boja Navarrete	T Edificio Bernardo Quintana Arriaga
L Biblioteca Enrique Rivero Borrell	U Salones del Posgrado
M Auditorio Sotero Prieto	V Laboratorios del Posgradom
N Laboratorio de Termofluidos	W Biblioteca Enzo Levi
O Laboratorios y talleres de Ingeniería Mecánica Alberto Camacho Sánchez	1 Auditorio Raúl J. Marsal

Imagen 2.1 Mapa de Conjunto Sur de la Facultad de Ingeniería



La ubicación final de concentrador es la Zona de Laboratorios del conjunto norte de la Facultad de Ingeniería, en el Laboratorio de Máquinas Térmicas, en las azoteas colindantes con “Las Islas”. La ubicación exacta está enmarcada en color rojo.

Conjunto Norte (Edificio de la Dirección de la Facultad)	
A Edificio de la Dirección	F Edificio de Ingeniería de Minas y Laboratorio de Metalurgia
B Edificio del Circuito Principal	1 Auditorio Javier Barros Sierra
C Edificio colindante con Arquitectura	2 Biblioteca Antonio Dovalí Jaime
D Zona de Laboratorios	3 Aula Magna
E Edificio de USECAD	

Imagen 2.2. Mapa del Conjunto Norte de la Facultad de Ingeniería

2. FIJAR DE LA BASE SOPORTE DEL CONCENTRADOR AL CONCRETO

El sistema cuenta con una base metálica que fue fijada al concreto para soportar todo el sistema de concentración.

La base utilizada es prefabricada, y su función comercial es sostener antenas parabólicas, cuenta con 10 perforaciones para ser fijado con tornillos a una superficie sólida, que en este caso es concreto.

En la *Imagen 2.3*. Se muestra la base del concentrador antes de ser fijada al suelo.



Imagen 2.3. Base del concentrador antes de ser fijada

El procedimiento usado para fijar la base consiste en; inicialmente hacer las perforaciones para los taquetes, introducir los taquetes, ubicar la base haciendo coincidir las perforaciones donde están los taquetes con las perforaciones de la base y fijarla con tornillos.

Para la unión se utilizaron taquetes expansivos de acero de $\frac{1}{4}$ " (medida de diámetro interno del taquete), los cuales presentan mejor agarre que los taquetes normales. Considerando que los tornillos son de $\frac{1}{4}$ " de cabeza hexagonal, se necesitaron 6 perforaciones de $\frac{1}{2}$ " para que los taquetes expansivos pudieran entrar, ya que estos tienen un diámetro externo de $\frac{1}{2}$ ".

En la *Imagen 2.4* se muestran las 6 perforaciones, justo después de ser realizadas en el concreto en la localización final del concentrador.



Imagen 2.4 Perforaciones recién hechas en el concreto

Una vez hechas las perforaciones de $\frac{1}{2}$ " se introdujeron los 6 taquetes expansivos, en la *Imagen 2.5* se muestran los taquetes ya introducidos.

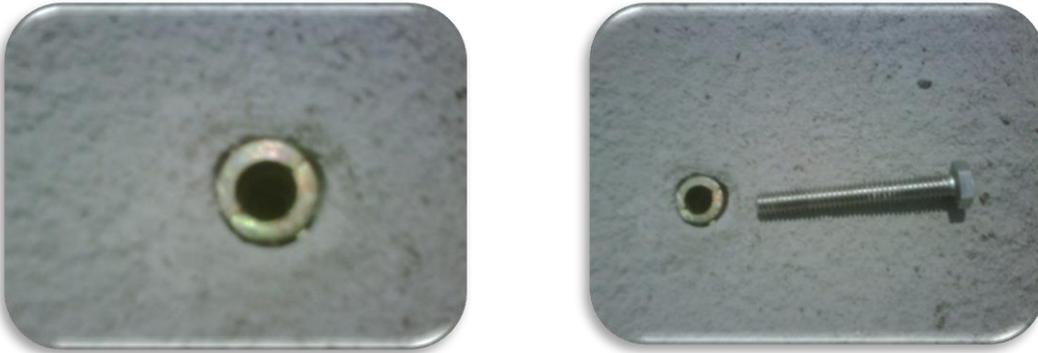


Imagen 2.5 Taquetes introducidos

Posteriormente se fijó la base al concreto con 6 tornillos de $\frac{1}{4}$ " inoxidables introducidos en los taquetes expansivos.



Imagen 2.6 Base fija

3. UNIR LOS SEGMENTOS DEL CONCENTRADOR

Una vez que los segmentos del concentrador ya se encontraban en su ubicación final en el laboratorio de máquinas térmicas, se procedió a unirlos, inicialmente el concentrador se encontraba separado en 3 segmentos como se muestra en la Imagen 2.7.



Imagen 2.7. Concentrador separado en 3 segmentos

En la Imagen 2.7 se muestran los tres segmentos del concentrador antes de ser unidos. Además antes de trasladar los segmentos, estos fueron envueltos en plástico para proteger su superficie de ralladuras.



Imagen 2.8. Unión de los segmentos del concentrador

Los tres segmentos fueron unidos entre sus marcos con tornillos y tuercas de $\frac{1}{4}$ ". En la imagen 2.8 se muestra una de las uniones entre dos marcos de los segmentos.

Como se observa en la imagen 2.9 cada unión entre segmentos está fijada en 2 partes (marcadas con círculos de color rojo), por lo tanto, se usaron 6 tornillos y 6 tuercas para fijar los 3 segmentos y dejar el disco armado.



Imagen 2.9. Partes donde se fijan los segmentos

4. UNIR EL CONCENTRADOR AL SISTEMA DE GIRO

Antes de definir como se une el concentrador con el sistema de giro, observemos cómo es este sistema y los grados de libertad que tiene (en la *Imagen 2.10*).

Además, notemos que en la parte izquierda de la *Imagen 2.10* está ubicado un rodamiento que será introducido junto con su eje en una cavidad, la cual está mostrada en la *Imagen 2.14*, permitiendo así el giro mostrado en color verde de lado izquierdo. Para permitir el otro giro mostrado del lado derecho se tienen las chumaceras que se pueden observar al centro de la *Imagen 2.10*.

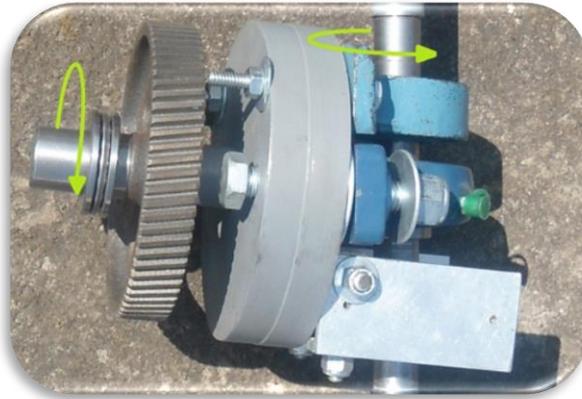
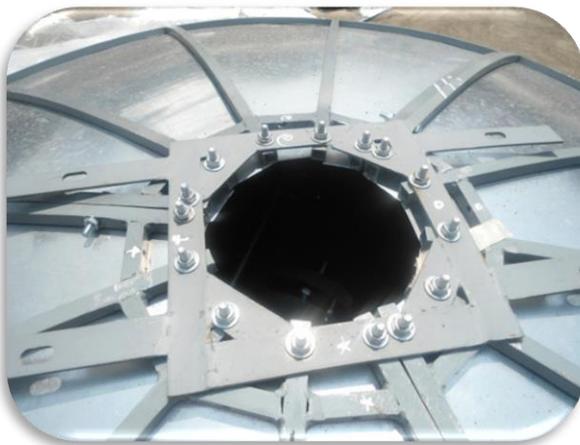


Imagen 2.10. Sistema de giro y sus grados de libertad

El primer paso para unir el concentrador con el sistema de giro, fue el siguiente:
Atornillar el concentrador a una placa metálica como se muestra en la *Imagen 2.11*.



Con 15 tornillos y 15 tuercas se unió una placa de acero al concentrador, esta placa será la unión entre el concentrador y las barras del sistema de giro. La unión con las barras se dará con los hoyos mostrados en los extremos de la placa.

Imagen 2.11. Unión de placa al concentrador



Imagen 2.12. Unión de barras con el sistema de giro

Posteriormente se unieron las barras al sistema de giro empleado, para esto se usaron 2 tornillos y 2 tuercas (como se muestra en la *Imagen 2.12* en círculos de color rojo).

Finalmente se atornillaron las barras mostradas en la *Imagen 2.12* a la placa metálica mostrada en la *Imagen 2.11*.

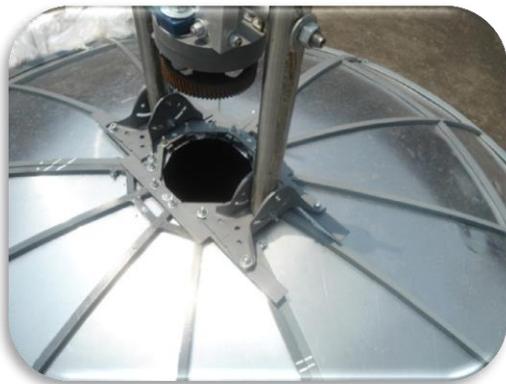


Imagen 2.13. Barras del sistema de giro unidas a la placa del concentrador.

En la *Imagen 2.13* se muestran unidas las barras del sistema de giro con la placa del concentrador, utilizando 4 tornillos y 4 tuercas.

5. UNIR EL CONCENTRADOR Y EL SISTEMA DE GIRO A LA BASE SOPORTE

Este paso se lleva a cabo de manera muy sencilla, pues simplemente se introduce el eje con rodamiento (mostrado en la *Imagen 2.10*) en la cavidad que se muestra en la *Imagen 2.14*.



Imagen 2.14. Hueco de la base soporte

El eje del sistema de giro mostrado en la *Imagen 2.10* será insertado en la parte del hueco con el menor diámetro, a su vez que el rodamiento del eje mencionado será también insertado en la parte del hueco con mayor diámetro.

Una vez insertado el sistema en la base, como se muestra en la *Imagen 2.15*, se hizo la instalación de los contrapesos para mayor estabilidad del sistema y mayor facilidad de manipulación al enfocar el concentrador, como se muestra en la *Imagen 2.16*.



Imagen 2.15. Sistema completo insertado a la base soporte



Imagen 2.16. Sistema de contrapesos

6. UNIR EL RECEPTOR AL CONCENTRADOR

Finalmente se unió el receptor al concentrador, en la *Imagen 2.17* se muestra la unión a uno de los brazos que sostienen al concentrador.



Imagen 2.17. Brazo para fijar el receptor al concentrador

El receptor fue fijado con 3 brazos de aluminio (uno en cada segmento del concentrador), cada uno se atornilló como se ve en la *Imagen 2.17*.

Posteriormente los 3 brazos unidos al concentrador se ensamblaron al receptor como se muestra en la *Imagen 2.18*.



Imagen 2.18. Unión entre el receptor y las barras.

En la *Imagen 2.18* se muestra la unión entre el brazo y el soporte del receptor. Para esta unión se usó un tornillo largo.

En la *Imagen 2.19* se muestra el receptor completamente instalado con las barras mencionadas en los pasos anteriores.

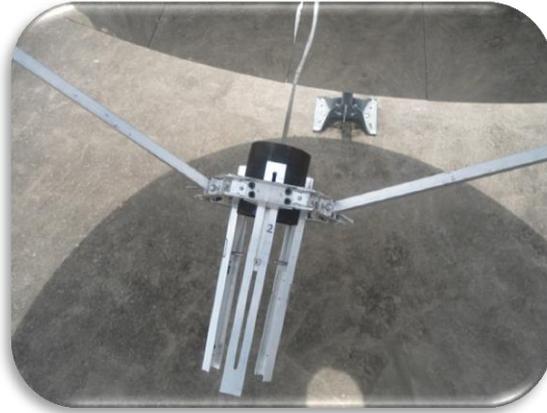


Imagen 2.19. Receptor completamente fijado

Después de realizar todos los pasos mencionados en este Capítulo se tiene un concentrador completamente instalado y listo para comenzar con las pruebas. En la *Imagen 2.20* se muestra el concentrador totalmente instalado.



Imagen 2.20. Concentrador Solar totalmente instalado.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ÓPTICO Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

En este capítulo, mediante un análisis óptico, se hará la caracterización del Concentrador de Disco Parabólico (CDP), además se caracterizará la mancha focal de manera teórica y experimental.

Dado que el análisis óptico tiene como finalidad caracterizar de forma teórica un concentrador existente, se consideraron las dimensiones reales del concentrador suficientes para hacer el análisis, siendo de inicio sólo 2 las dimensiones necesarias de la parábola para comenzar a calcular los parámetros característicos del paraboloide de revolución, estas dos dimensiones se muestran en la *Imagen 3.1* :

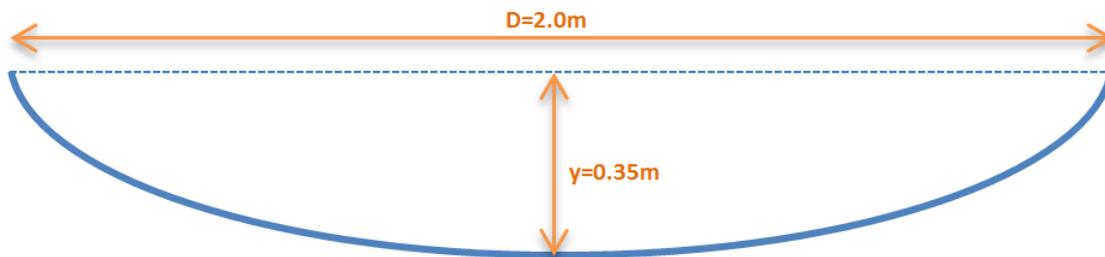


Imagen 3.1. Dimensiones medidas del concentrador.

Utilizando la *ecuación [3.1]* se obtendrá la distancia focal.

$$y = \frac{x^2}{4*f} \quad \dots [3.1]$$

Donde:

x: la coordenada en x del sistema de referencia 2D mostrado en la *Imagen 3.2*.

y: la coordenada en y del sistema de referencia.

f: distancia focal

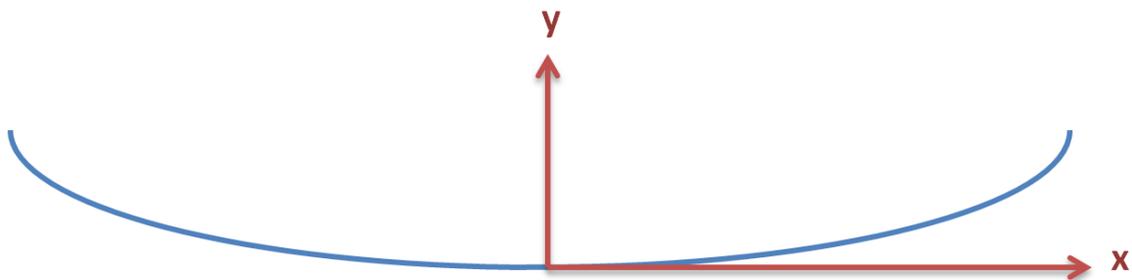


Imagen 3.2. Sistema de referencia 2D del concentrador.

De la *ecuación [3.1]* se despeja la distancia focal (f), tomando "x" como el radio del concentrador y "y" como se muestra en la *Imagen 3.1*.

$$f = \frac{x^2}{4 * y}$$

Sustituimos con los valores de "x" y "y":

$$f = \frac{(1(m))^2}{4 * (0.35(m))} = \mathbf{0.714285(m)}$$

También, con fines de caracterización, se calcula el ángulo de apertura (φ) con la ecuación [3.2]:

$$\varphi = 2 * \arctan\left(\frac{D}{4f}\right) \quad \dots \quad [3.2]$$

Donde:

D: Diámetro

f: Distancia Focal

Obteniendo

$$\varphi = 2 * \arctan\left(\frac{2.0(m)}{4 * (0.714285(m))}\right) = 69.984^\circ \approx \mathbf{70^\circ}$$

Ahora se calcula con el área de apertura (Aa) con la ecuación [3.3]:

$$Aa = \frac{\pi * D^2}{4} \quad \dots \quad [3.3]$$

Obteniendo

$$Aa = \frac{\pi * (2.0(m))^2}{4} = \mathbf{3.1416(m^2)}$$

1. PRUEBAS EXPERIMENTALES ÓPTICAS

Una vez teniendo los parámetros básicos del concentrador previamente calculados, se pueden realizar pruebas experimentales, ya que se cuenta con la distancia focal para ubicar el receptor (0.714285 (m)), se hicieron pruebas para visualizar la mancha focal a dicha distancia, además de hacer pruebas a otras distancias para dar certeza que el valor de distancia focal calculado modela el comportamiento real del concentrador solar analizado.

Para las pruebas se definieron 3 distancias de análisis, una distancia menor a la focal, la distancia focal, y una distancia mayor a la focal, esto con la finalidad de corroborar que tenemos una mejor concentración a la distancia focal. Los valores escogidos fueron 68 (cm), 71 (cm) y 74 (cm).

El procedimiento seguido para realizar las pruebas ópticas fue el siguiente:

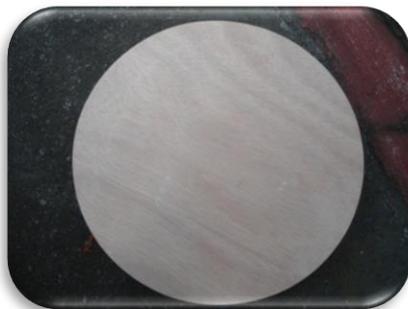
- Inicialmente se hizo una breve prueba de observación enfocando el concentrador, con el receptor a la distancia focal calculada, el receptor cilíndrico de acero instalado tiene 10 (cm) de diámetro. En la *Imagen 3.3* se muestra la prueba realizada, esta prueba se hizo con la finalidad de encontrar una dimensión aproximada de la mancha focal y así escoger una geometría y dimensiones para la madera que se usará como superficie de visualización de mancha focal.



Imagen 3.3. Prueba inicial con receptor cilíndrico.

Con la prueba inicial se observó que probablemente la mancha focal tiene un diámetro no mayor a 20 o 25 (cm), pero de igual manera se escogieron dimensiones superiores para la madera, para así asegurar que se visualice la mancha focal completa.

Las 3 maderas consisten en un perfil circular con 28 (cm) de diámetro y 2 (cm) de grosor, éstas fueron fabricadas por un proveedor. En la *Imagen 3.4* se muestra una de una de las maderas adquiridas.



Las 3 maderas fueron acopladas al receptor a las distancias previamente establecidas (68 (cm), 71 (cm) y 74 (cm)), y expuestas durante 5 minutos a la radiación concentrada del dispositivo solar analizado.

Imagen 3.4. Receptor de madera para las pruebas de visualización de mancha focal

En la *Imagen 3.5* se muestra el receptor de madera ya instalado para comenzar las pruebas solares.

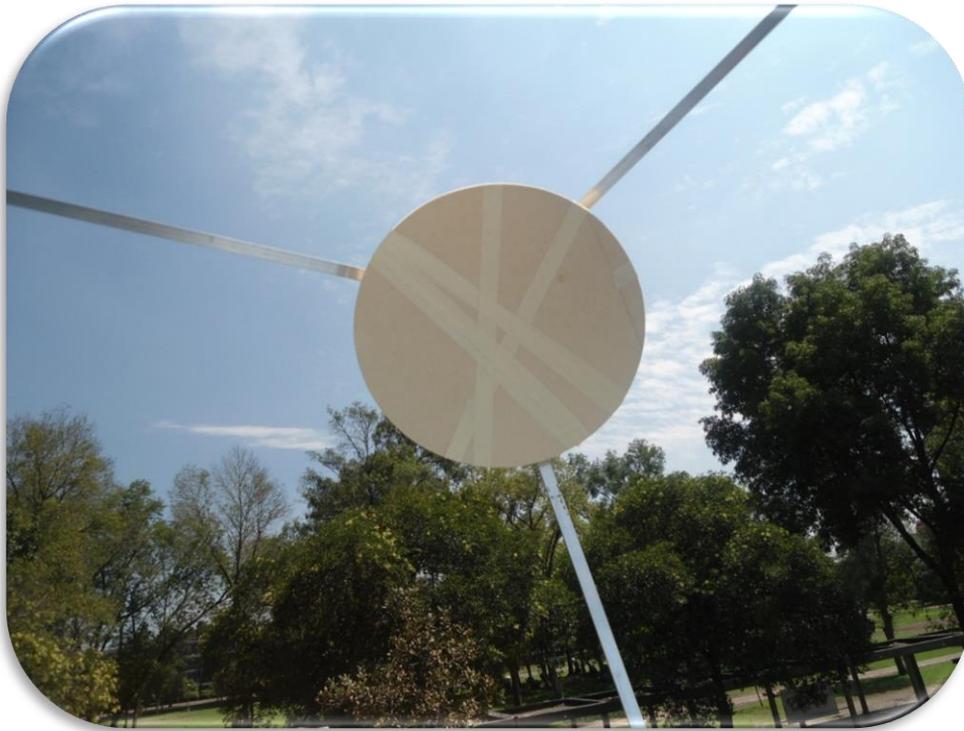


Imagen 3.5. Receptor de madera instalado en el concentrador para las pruebas de visualización

La primera prueba realizada fue a una distancia de la base de la parábola al receptor de 71 (cm) a las 11:31 am del 26 de Junio del 2012. En las *Imágenes 3.6* y *3.7* se muestran las capturas de la primera prueba y las manchas obtenidas con y sin filtro solar.



Imagen 3.6. Mancha solar de la prueba 1 con filtro solar



Imagen 3.7. Mancha solar sin filtro solar

La segunda prueba fue realizada a las 12:05 pm el día 26 de Junio de 2012, esta prueba fue realizada con el receptor de madera ubicado a 74 (cm) de la base del disco parabólico. En las *Imágenes 3.8* y *3.9* se muestran las capturas de la segunda prueba con y sin filtro solar respectivamente.

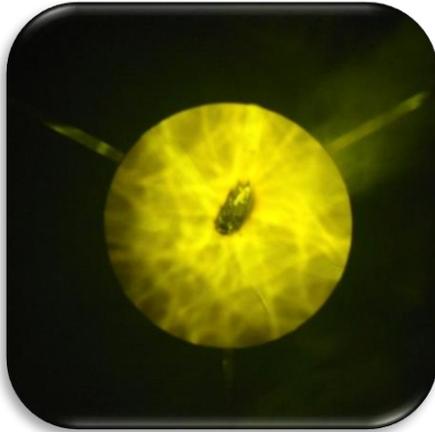


Imagen 3.8. Mancha de segunda prueba con filtro solar *Imagen 3.9. Mancha solar sin filtro*

La tercer prueba se realizó el 27 de Junio de 2012, un día después que las dos pruebas anteriores, a las 12:42pm, con una distancia entre la base de la parábola y el receptor de 74 (cm). Siendo ésta la última de las pruebas de visualización de la mancha focal.



De la tercera prueba no se tienen fotografías de la mancha solar durante la prueba, por lo que sólo se cuenta con la imagen de la madera después de ser expuesta a la radiación concentrada del dispositivo.

Imagen 3.10 Mancha focal de tercera prueba (74 cm)

En la *Imagen 3.11* se muestra un comparativo de las manchas finales obtenidas en las 3 pruebas



Imagen 3.11. Comparativo de las 3 pruebas solares

Nota: La mancha solar 2 no se encuentra centrada debido a la dificultad de enfocar el concentrador por la gran intensidad luminosa proveniente de la madera durante la prueba (a pesar de que se usó un filtro solar como protector)

2. MODELO VIRTUAL

Una vez realizadas las pruebas experimentales, se usó un software dedicado específicamente a trazado de rayos en sistemas ópticos (principalmente sistemas ópticos solares) llamado *SolTrace 2011.7.5*, esto con la finalidad de obtener los parámetros faltantes del concentrador y comparar resultados del modelo virtual con el experimental. Este software requiere de varios parámetros de entrada para hacer el trazado, estos parámetros están divididos en 4 módulos:

- 1) *Forma Solar*
- 2) *Propiedades ópticas*
- 3) *Etapas*
- 4) *Opciones de trazado*
- 5) *Resultados*

Para definir los parámetros ópticos y proceder con la caracterización se revisó cada uno de los módulos mencionados y se propusieron condiciones que simulan el fenómeno real.

1) FORMA SOLAR

En este módulo se definen varios parámetros, el primero en definirse es la dirección del sol. La dirección puede ser definida de dos maneras: dando la latitud, día y hora en que se encuentra el concentrador, o la otra opción es definiendo la posición del sol respecto del concentrador, utilizando para esto un sistema coordenado.

Debido a la facilidad de hacerlo de esta manera, se definió la dirección del sol con un sistema coordenado, dándole los siguientes valores:

X	Y	Z
0.0000	0.0000	100.0000

Estos valores definen la posición del sol en un sistema de coordenadas cuyo centro es la base del concentrador, como se muestra en la *Imagen 3.12*, por lo que la dirección de los rayos solares será del punto de coordenadas mencionadas hacia el concentrador solar.

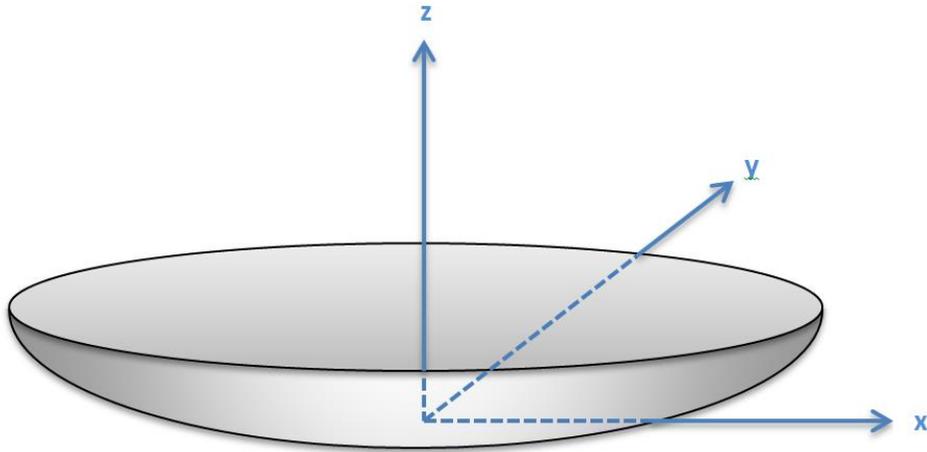


Imagen 3.12. Sistema de referencia para la dirección del sol

Además, en este módulo se define el perfil del sol, y dada la recomendación del programa para cubrir una mayor variedad de casos, se seleccionó una distribución plana como perfil (*Imagen 3.13*), definiendo así la misma intensidad en toda la cara del sol. La intensidad del sol emitida simplemente está representada con valor unitario constante en toda la superficie solar. En la *Imagen 3.13* se muestra la función de forma solar usada.

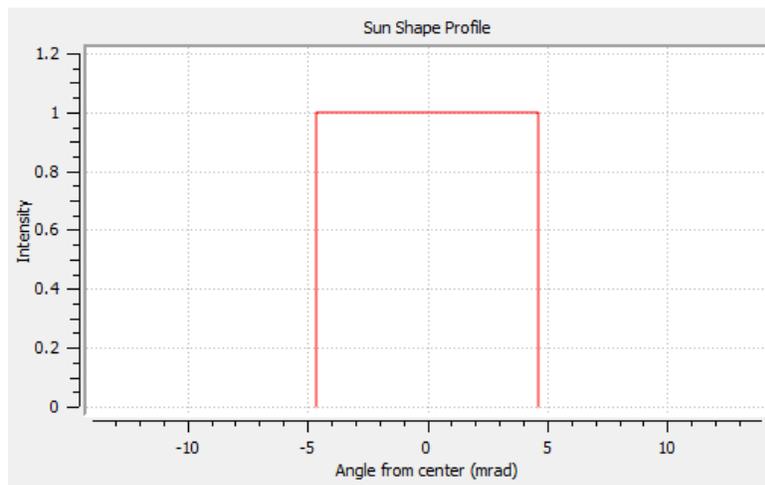


Imagen 3.13. Gráfico de la forma del Sol, tomado del programa SolTrace 2011.7.5.

2) PROPIEDADES ÓPTICAS

En este módulo se definen las propiedades ópticas de cada etapa o parte del sistema de concentración solar, cabe mencionar que cada etapa puede tener propiedades ópticas distintas. Son 4 las propiedades requeridas por el software para definir cada etapa solar, a continuación se revisa cada propiedad requerida:

- *Reflectividad*

Un parámetro de vital importancia en el análisis óptico de un concentrador solar es la reflectividad, ya que sin reflectividad no hay concentración, en este caso la reflectividad del material usado en la cara interna del disco. El material usado para el concentrador analizado en esta tesis lleva el nombre de *Reflectech* (ver *Anexo 1*), y su valor de reflectividad fue dado por el fabricante:

$$R = 93\%$$

- *Trasmitancia*

Otra propiedad óptica requerida es la transmitancia del disco parabólico, la cual es calculada con la ecuación [3.4]. En la *Imagen 3.14* se muestra un esquema sencillo de lo que es la transmitancia.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad \dots [3.4]$$

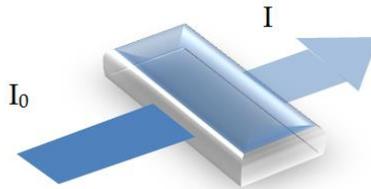


Imagen 3.14. Esquema de transmitancia

Donde:

T: *Trasmitancia*

I₀: *Intensidad de los rayos entrantes a la etapa*

I: *Intensidad de rayos que atraviesan la etapa, como se muestra en la imagen 3.5*

Pero en este caso se considerará cero la intensidad de salida “I” (valor ideal). Quedando:

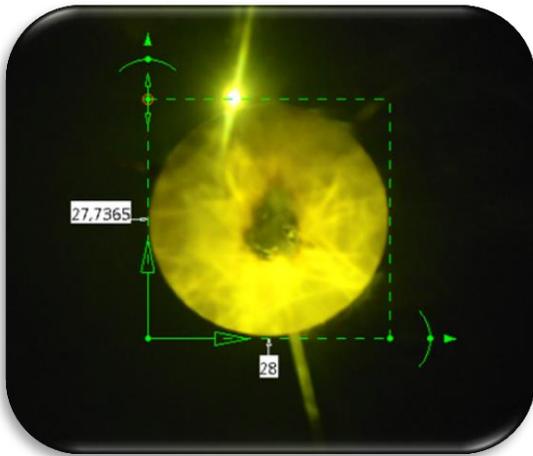
$$T = \frac{0}{I_0} = 0$$

Despreciando así las pérdidas por transmitancia en el sistema de concentración.

- *Error de superficie y error especular*

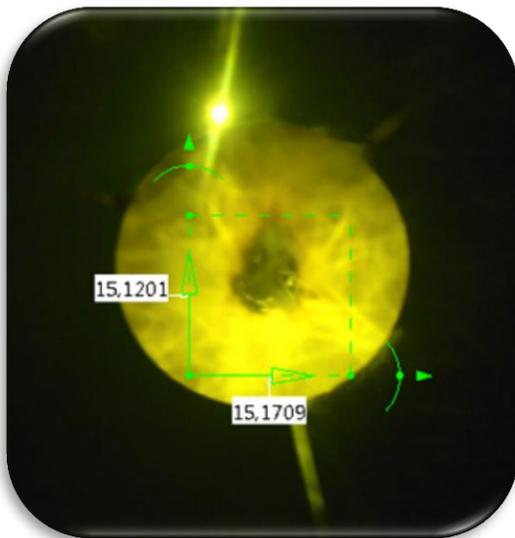
Otros parámetros ópticos requeridos por el software de trazado son los errores denominados error de superficie y error especular, los cuales pueden definirse como errores por desvío indeseado de los rayos solares por superficies macroscópicas en el caso del error de superficie y superficies microscópicas en el caso del error especular. Dado que el error especular es característico del material reflejante usado, se recurrió a la ficha técnica del Reflectech Mirror Film (*Anexo 1*), encontrando que el material tiene un error especular de 25 mrad.

Para evaluar el error de superficie se hicieron corridas del programa a las distancias de las pruebas experimentales, se variaron los valores de esta propiedad en SolTrace hasta encontrar coincidencia en el tamaño de la mancha focal de SolTrace y la mancha focal real, obteniendo así el valor numérico de esta propiedad. Primero se necesita saber el tamaño de la mancha focal real, para lo cual se recurrió a la *imagen 3.6* (Prueba solar con el receptor a 71 (cm) de la base del disco parabólico), y a una aplicación del programa CATIA V5 llamada Sketch Tracer. Dado que conocemos el diámetro de la madera usada en la prueba solar (28 (cm)), este parámetro se usó para escalar la imagen de la prueba solar en CATIA V5 y así obtener las dimensiones de la mancha focal real.



Primero se ajustó el recuadro con el sistema de referencia al tamaño del receptor, posteriormente se fijó el valor numérico de la dimensión horizontal del recuadro a 28 (cm), una vez realizado este paso, la pieza está correctamente escalada.

Imagen 3.15. Ajuste de dimensiones en CATIA V5 del receptor de pruebas



Dado que el receptor ya está correctamente escalado, se tomó la medida aproximada de la mancha focal ajustando el recuadro al tamaño de la parte más concentrada de la mancha focal como se muestra en la *Imagen 3.16*. Obteniendo un tamaño aproximado de mancha de 15 (cm) de diámetro.

Imagen 3.16. Medidas de la mancha focal de la Prueba 1 a 71 [cm]

Finalmente se hicieron las iteraciones del valor de error de superficie en el programa SolTrace para lograr un tamaño de mancha focal aproximado al de las pruebas experimentales (15 (cm) de diámetro).

La mejor aproximación fue con un error de 25 (mrad), en la *Imagen 3.6* se muestra el comparativo entre la mancha del software de trazado de rayos y la prueba experimental.

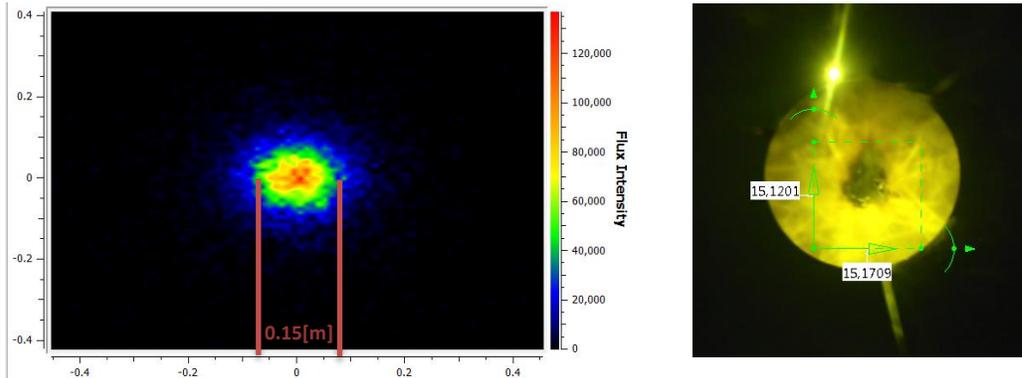


Imagen 3.17. Comparativo del tamaño de mancha focal teórica y experimental a 71 (cm)

Quedando entonces:

$$\text{Error de superficie} = 25 \text{ (mrad)}$$

$$\text{Error especular} = 25 \text{ (mrad)}$$

Ahora revisemos las propiedades necesarias en el módulo de Propiedades ópticas:

Reflectividad	0.93
Transmitancia	0
Error de superficie	25 (mrad)
Error Especular	25 (mrad)

Tabla 3.1. Valores de las propiedades ópticas requeridas para el disco parabólico en SolTrace.

Nota: Para las etapas del receptor no se escogieron propiedades ópticas debido a que éstas son de un plano virtual o inexistente para el sistema, ya que estas etapas sólo sirven para visualizar la zona focal.

3) ETAPAS DEL SISTEMA

En este módulo se definen las etapas que conforman el sistema de concentración, en este caso una de las etapas es el paraboloide de revolución (disco parabólico), y otra etapa es el receptor.

Para la definición de la etapa del disco parabólico se requiere de dos parámetros:

- Diámetro de apertura del concentrador (2(m))
- Cx y Cy

Dado que ya se conoce el diámetro de apertura, sólo queda calcular C_x y C_y , los cuales están definidos como lo muestra la *ecuación [3.5]* que define la función de una parábola, con el sistema de referencia mostrado en la *Imagen 3.18*.

$$Z(x, y) = \frac{1}{2}(C_x x^2 + C_y y^2) \quad \dots \quad [3.5]$$

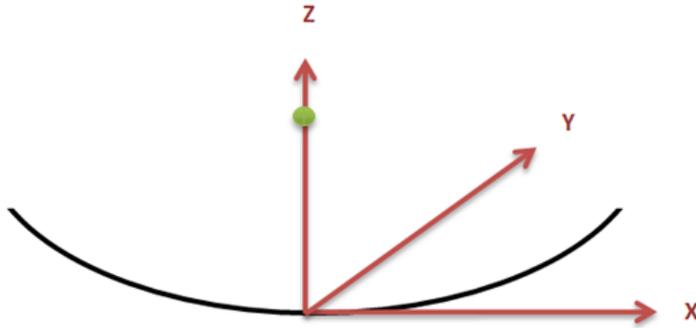


Imagen 3.18. Sistema de referencia del concentrador solar. Foco representado en color verde

Entonces, en este caso por ser un paraboloide de revolución el valor de C_x y C_y es el mismo y puede ser calculado con la *ecuación [3.5]*

$$C_x = C_y = \frac{1}{2 * f} \quad \dots \quad [3.5]$$

Sustituyendo la distancia focal en la *ecuación 3.5* se obtiene:

$$C_x = C_y = \frac{1}{2 * (0.714285(m))} = 0.7$$

Una vez encontrados estos parámetros queda definida la etapa del concentrador.

Posteriormente se definieron las 3 etapas de recepción (una para cada distancia, 68 (cm), 71 (cm) y 74 (cm)), estas fueron definidas como planos de 100 x 100 (m) para asegurarse de visualizar todos los rayos reflejados por el concentrador, virtuales, es decir, no interfieren con la trayectoria de los rayos.

4) OPCIONES DE TRAZADO

Estas opciones definen el número de rayos analizados, el número de CPUs a usar en el análisis, el máximo número de rayos generados entre otros parámetros, todos estos parámetros fueron dejados con sus valores predeterminados, ya que el tiempo de análisis fue corto y el número de rayos mostrados en el análisis es suficiente.

Antes de comenzar con los resultados obtenidos del programa SolTrace, observemos en un esquema simple como es que se da la concentración de los rayos (*Imagen 3.19*), notando que los rayos del sol están representados en color naranja y éstos son concentrados a un punto (representado en color verde).

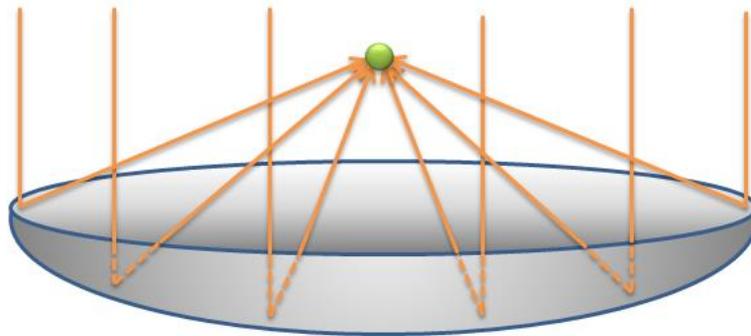


Imagen 3.19. Esquema básico del funcionamiento del concentrador solar.

5) RESULTADOS

Los primeros resultados mostrados por el software son las intersecciones de los rayos solares con las etapas definidas en el módulo 3 de SolTrace. Se activaron todos los planos virtuales y el disco parabólico, para así mostrar las intersecciones de los 3 planos en la misma visualización.

Para este módulo se requiere definir el parámetro DNI (Irradiación Normal Directa), el cual, por la hora en que fueron realizadas las pruebas experimentales (entre 11:30 y 12:30) se definió como $700 \text{ (W/m}^2\text{)}$, que es el valor de radiación promedio recibido en ese horario en Ciudad Universitaria, UNAM, D.F. de acuerdo con el *gráfico 1.4* del capítulo 1.

En la *Imagen 3.20* se muestran las intersecciones de los rayos solares con el disco parabólico y con los 3 planos receptores virtuales definidos anteriormente y que buscan modelar las 3 pruebas experimentales.

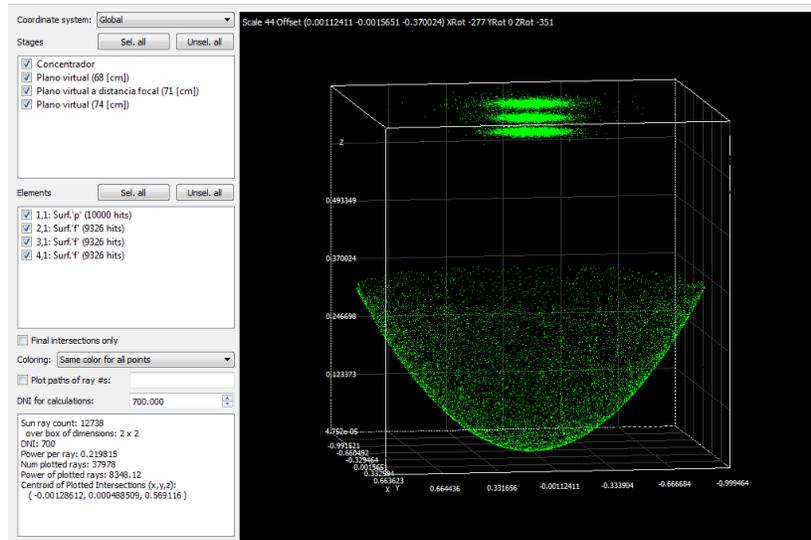


Imagen 3.20. Esquema del concentrador con 3 planos receptores

Nota: En la Imagen 3.20 la escala en el eje X y Y no es la misma que en el eje Z, por lo que la forma en la que se visualiza el concentrador difiere de la realidad.

Los tres planos visualizados por encima del concentrador representan el receptor a 3 distancias diferentes, la característica principal de éstos es ser virtuales, es decir, que cada uno entrega los resultados obtenidos para el receptor a esa distancia sin verse afectados por la presencia de los demás planos, dado que son virtuales (inexistentes) con respecto al sistema, por ejemplo éstos no muestran los rayos solares que inciden directamente en el plano, en cambio sólo muestran los rayos que después de ser reflejados por la parábola inciden en cada plano.

Las distancias a las que se escogieron los planos son las mismas de las pruebas experimentales y previamente mencionadas.

MAPAS DE FLUJO

Para ubicar con mayor facilidad cada uno de los tres planos de recepción, en adelante se utilizarán los siguientes nombres para hacer referencia a éstos.

- Plano Virtual 1: Plano más cercano a la parábola, a 0.68 (m) de la base.
- Plano Virtual 2: Plano a la distancia focal calculada (0.71 (m))
- Plano Virtual 3: Plano a 0.74 (m) de distancia de la base de la parábola.

Plano Virtual 1

En la Imagen 3.21 se muestra un mapa de flujo del Plano Virtual 1, donde se puede ver en color rojo las partes más concentradas y en azul y negro las partes menos concentradas según la escala mostrada en el lado derecho del recuadro de visualización. Además el cuadro de visualización tiene una escala definida por el usuario, que en este caso fue definida en metros (m).

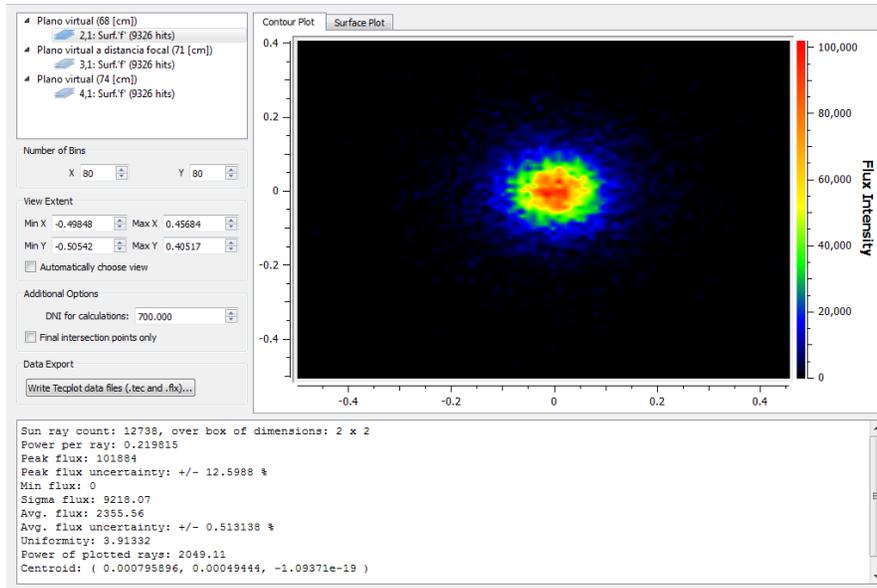


Imagen 3.21. Mapa de flujo en el plano virtual 1 a 68 (cm) de la base de la parábola

En la Imagen 3.22 se muestra una visualización en superficie 3D del comportamiento del mismo plano analizado en la Imagen 3.21 (Plano Virtual 1). Con un flujo máximo de 104,319 (W/m²)

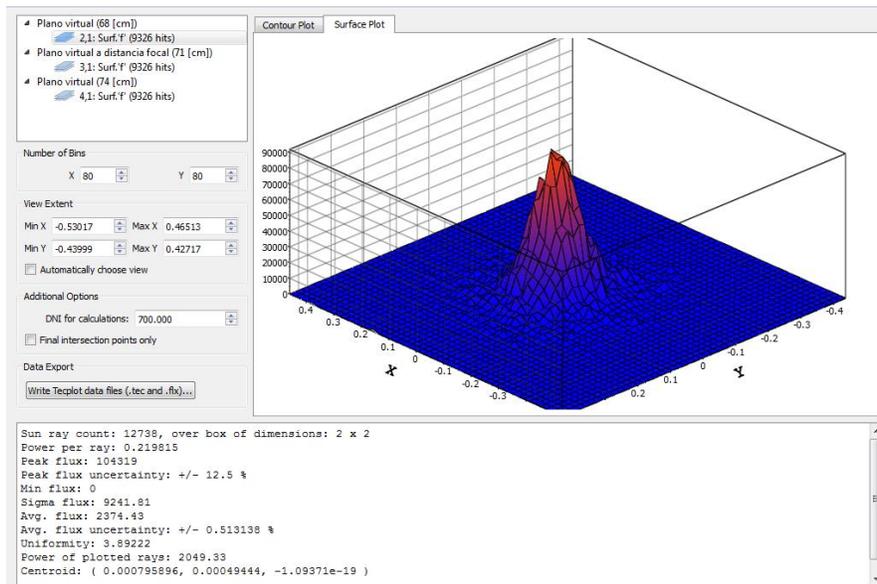


Imagen 3.22. Visualización en superficie 3D de concentración de rayos solares en el Plano Virtual 1.

Plano Virtual 2

En la Imagen 3.23 se muestra un mapa de flujo del Plano Virtual 2 (71 (cm)), donde se puede notar una mejor concentración que en el plano virtual 1, con un incremento en la intensidad de flujo llegando a un flujo máximo de 117,359 (W/m²)

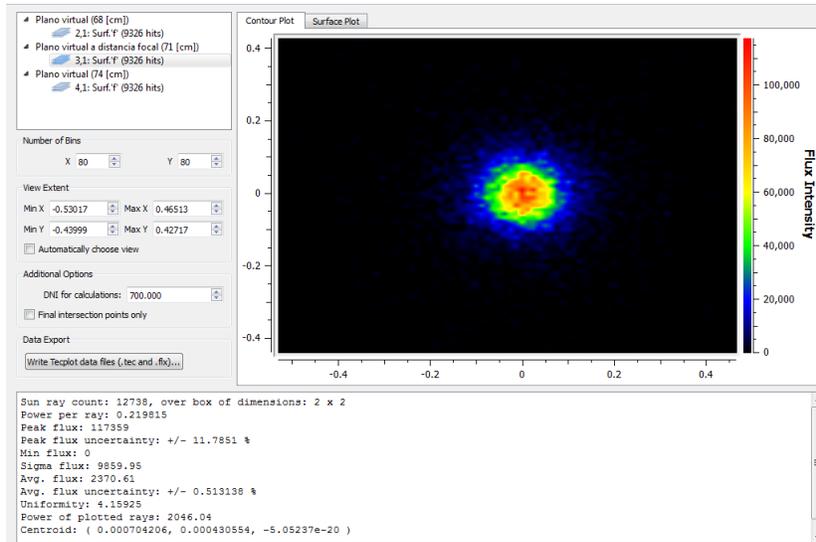


Imagen 3.23. Mapa de flujo del Plano Virtual 2 a 71(cm) de la base de la parábola

En la Imagen 3.24 se muestra el mapa de flujo del Plano Virtual 2 en un modelo de superficie 3D con la máxima concentración obtenida en el análisis óptico de los 3 planos virtuales.

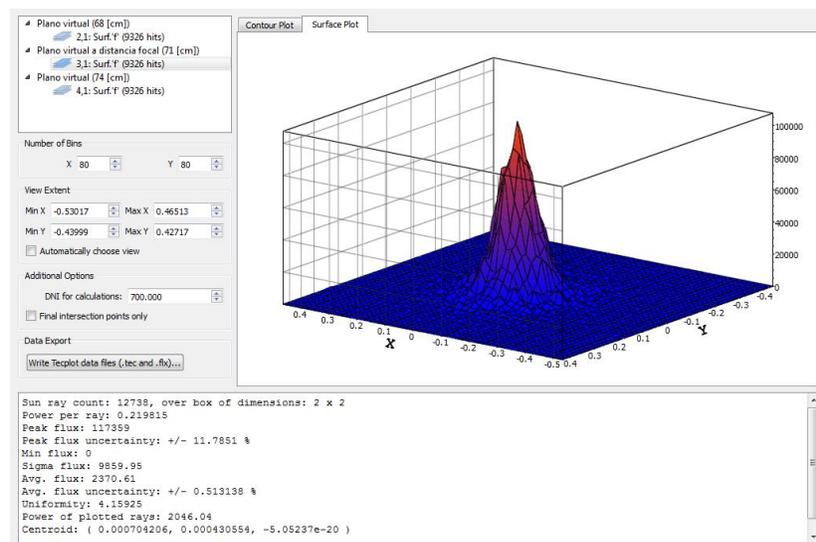


Imagen 3.24. Mapa de flujo en superficie 3D del Plano Virtual 2.

Plano Virtual 3

En la Imagen 3.25 se muestra por último la mancha focal del plano virtual 3 a 74 (cm) de la base del disco, donde se encontró una intensidad de flujo máxima de 104,319 (W/m^2), siendo un valor inferior a la intensidad obtenida a la distancia focal calculada (plano virtual 2) como es de esperarse.

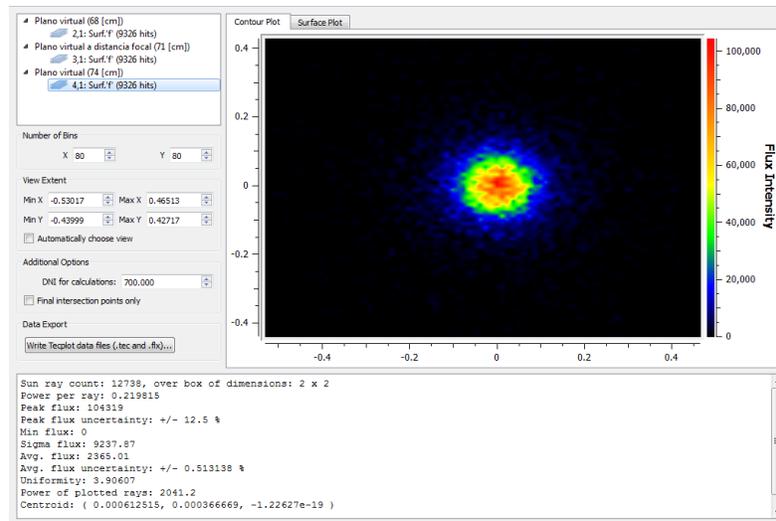


Imagen 3.25. Mapa de flujo en el Plano Virtual 3 a 74(cm) de la base de la parábola.

En el modelo tridimensional mostrado en la Imagen 3.26 se muestra el desempeño del receptor a la distancia del Plano Virtual 3.

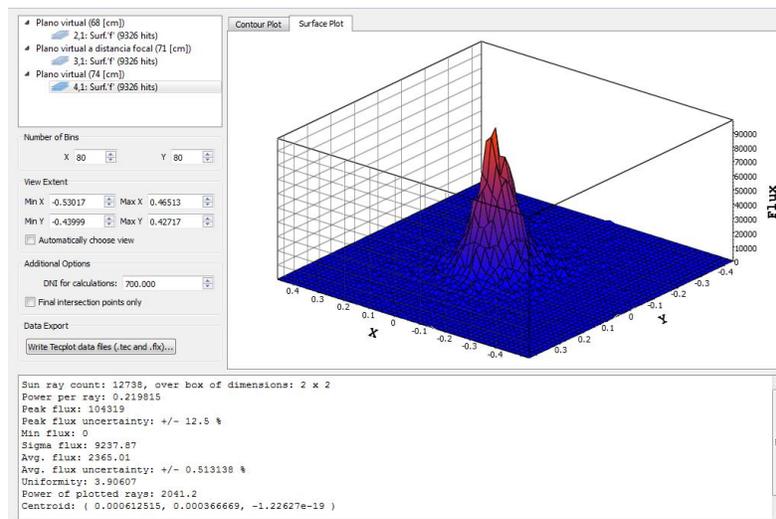


Imagen 3.26. Mapa de flujo en superficie 3D el Plano Virtual 3

Analizando los resultados y las imágenes de las pruebas experimentales y teóricas de este capítulo, se notó que si bien sí hay una mayor concentración a la distancia focal calculada (71.4(cm)), las manchas focales a las 3 diferentes distancias analizada (68(cm) Imagen 3.21, 71(cm) Imagen 3.23 y 74(cm) Imagen 3.25) no cambian tanto en sus dimensiones, esto debido a la desviación de los rayos solares por error especular del material reflejante y al error de superficie del concentrador, por lo que el disco parabólico analizado provoca una mancha focal que quedaría mejor definida en un sólido. Sin embargo con la información que se tiene, se conocen las dimensiones aproximadas y la geometría de la mancha focal en plano, que resulta más fácil de analizar y más fácil de correlacionar con resultados virtuales.

CAPÍTULO 4 PROPUESTA DE RECEPTOR Y ANÁLISIS TÉRMICO

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Si tomamos en cuenta que el concentrador estudiado es un sistema de alta temperatura, para su mayor aprovechamiento debemos usarlo para una aplicación que requiera estos niveles de temperatura. En este caso la propuesta consiste en un horno solar. Un horno solar consiste en el uso de energía solar para llevar un material u objeto a altas temperaturas, generalmente por medio de un sistema de concentración de rayos solares, generando un punto focal con temperaturas muy superiores a las posibles alcanzadas sin concentración.

En este caso se propone un horno tratamientos térmicos de piezas pequeñas, cabe mencionar que para saber el tipo de tratamientos y los metales a los que se puede realizar, debemos ver primero la capacidad de nuestro concentrador-receptor.

La finalidad de este capítulo es hacer el diseño del receptor para la aplicación propuesta. Una vez con el diseño del receptor se hará un análisis térmico del mismo para obtener la temperatura máxima de trabajo, además se podrá analizar dónde se dan las máximas pérdidas en el sistema, y se darán propuestas de mejora para disminuirlas.

2. DISEÑO DEL RECEPTOR

Con la información obtenida en el capítulo 3 en los resultados teóricos y experimentales, notamos que la mancha focal puede ser definida de manera más adecuada como un sólido con un diámetro de 15 cm de diámetro como se muestra en la *Imagen 4.1*. En donde la esfera color rojo representa la mancha focal, aunque cabe mencionar que la mancha focal real no es una esfera, es una figura irregular.

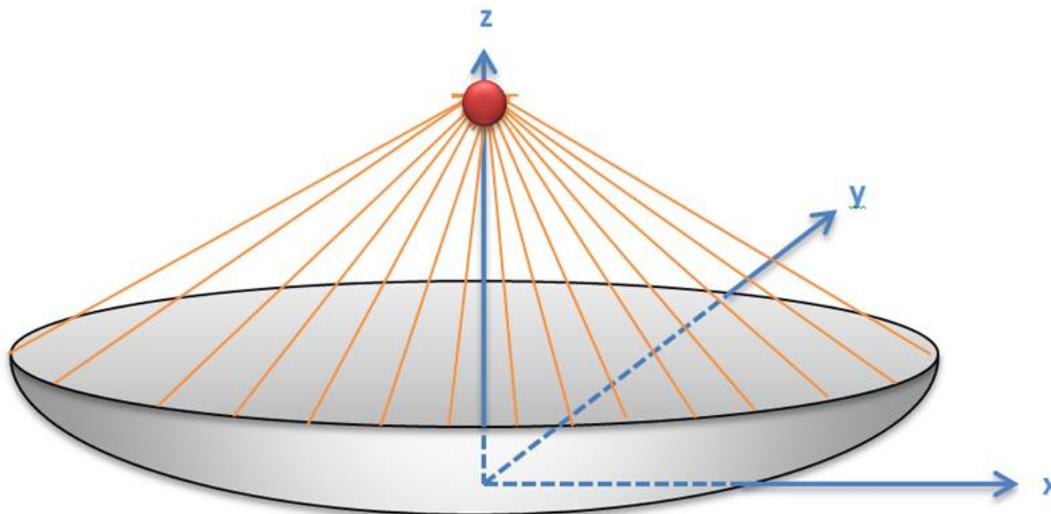


Imagen 4.1. Esquema de concentración

Dado el tipo de mancha focal observado en el capítulo anterior, se propone un receptor que busque el mayor aprovechamiento de la radiación, en este caso se proponen 3 diseños distintos con dimensiones que deben ser acordes a las manchas focales obtenidas en el análisis óptico del capítulo 3.

Para darnos una idea de cómo se ve la mancha focal en la realidad, recurramos a la *Imagen 3.3* del capítulo anterior.



Imagen 3.3 Prueba inicial con receptor cilíndrico

Si bien no conocemos la geometría tridimensional de la mancha focal, se cuenta con suficiente información para plantear un diseño de receptor, en la *Imagen 4.2* se encuentran esquemas de las propuestas de receptor en secciones 2D de una pieza de revolución.

Para escoger la geometría del receptor notamos que el ángulo de apertura del concentrador es de 70° , con base en eso se presentan 3 propuestas de receptor mostradas en la *Imagen 4.2*. Estas propuestas de receptor son similares a las comúnmente encontradas en este tipo de concentradores solares.



Imagen 4.2. Propuestas de receptor para el sistema de concentración en vistas seccionadas 2D (Propuesta 1 en la izquierda y propuesta 2 en medio y Propuesta 3 a la derecha)

En esta imagen el color azul representa el aislante térmico, el color blanco es simplemente aire, el color negro es una placa de acero, que será la que reciba la máxima concentración y el color amarillo es la radiación solar que es concentrada.

La propuesta 1 consiste en un receptor que sigue el ángulo de la radiación concentrada, pero dado que la superficie receptora está expuesta al ambiente, esta propuesta representaría pérdidas térmicas importantes por convección y radiación. En las propuestas 2 y 3 se buscó disminuir las pérdidas por radiación y convección, notando que la propuesta 3 resulta mejor para esta finalidad, ya que el coeficiente de convección en una cavidad semi-cerrada como la mostrada en la propuesta 3 es menor que el coeficiente de una cavidad abierta como en la propuesta 2. Por lo tanto el diseño de receptor seleccionado es el de la Propuesta 3.

Dado que la entrada de la radiación solar al receptor se da con un ángulo de 70° de la vertical, se propone un corte con ese ángulo en la entrada del receptor, quedando de la manera mostrada en la *Imagen 4.3*. Teniendo así una mayor entrada de la radiación solar, y por lo tanto un mayor aprovechamiento de la energía.

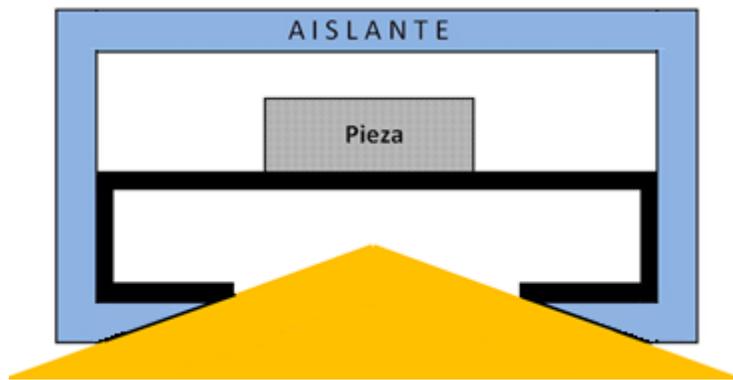


Imagen 4.3. Propuesta 3 del receptor solar (perfil 2D del receptor)

Además del corte angular también se incluirá una placa metálica en las paredes internas del horno para hacer más uniforme la temperatura en el interior del horno, quedando de la manera mostrada en la *Imagen 4.4*, notando que también se recortaron las placas metálicas inferiores mostradas en la *Imagen 4.3* para disminuir el área de pérdidas por convección en la cavidad.

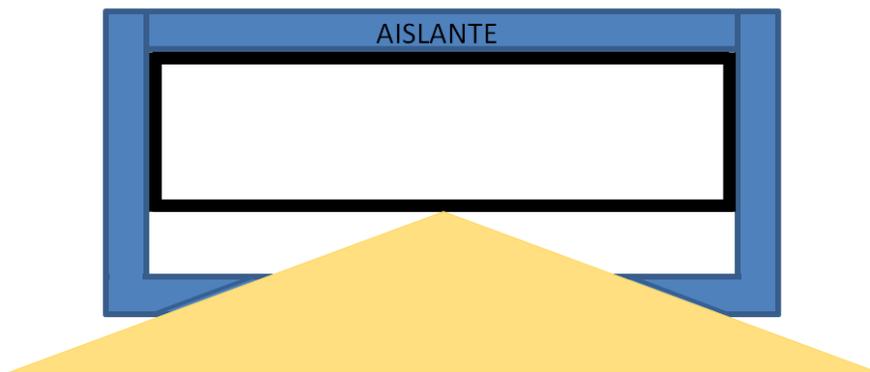


Imagen 4.4. Propuesta Final del Receptor

3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO

Una vez teniendo el diseño del receptor propuesto, se definirán las condiciones de trabajo del concentrador, para con esta información plantear un modelo matemático que describa el fenómeno estudiado.

Primero notemos que se busca obtener la mayor temperatura posible en la placa receptora, lo cual llevaría a una temperatura más alta en el interior del horno, y para minimizar las pérdidas se busca tener en la parte exterior del aislante una temperatura baja (cercana a la temperatura ambiente).

En la *Imagen 4.5* se muestra un esquema del fenómeno físico analizado.

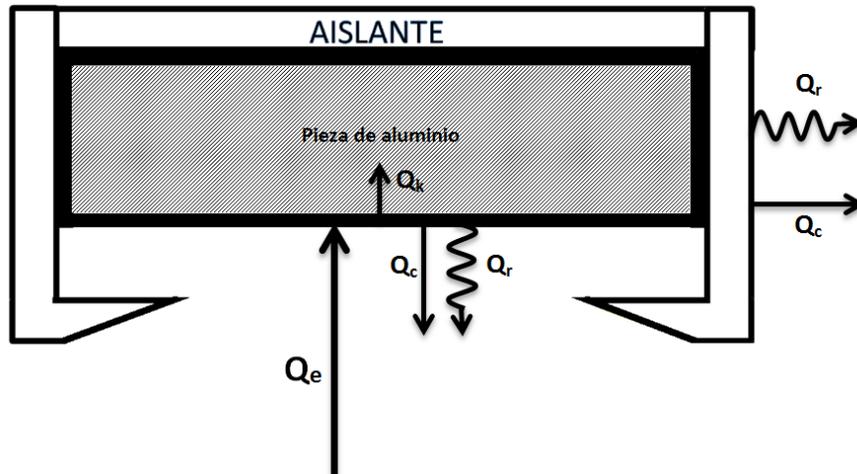


Imagen 4.5. Esquema de flujos de calor en el sistema del receptor

Ahora se recurre a la primera ley de la termodinámica para el sistema cerrado estudiado en estado estacionario.

$$\Delta U = Q + W \quad \dots \quad (4.1)$$

Dónde:

ΔU : Variación de la energía interna

Q : Calor transferido entre el sistema y los alrededores

W : Trabajo realizado por el sistema

Considerando que no hay trabajo realizado por el sistema este término se considera cero ($W=0$). Además, como se puede ver en la *Imagen 4.5* en este caso estamos analizando la entrada de calor (Q_e) y las salidas de calor en la placa metálica y en el aislante, términos que se englobarán como calor perdido (Q_p). Quedando la ecuación:

$$\Delta U = Q_e - Q_p \quad \dots \quad (4.2)$$

En donde:

$$Q_e = (\alpha * \rho * A_c * G * P_d) - P_{sr} \quad \dots \quad (4.3)$$

α : Absortancia de la pintura o recubrimiento del receptor.

ρ : Reflectancia o reflectividad del concentrador.

A_c : Área del concentrador.

G : Irradiación solar directa.

P_d : Factor de pérdidas por desviación en los rayos concentrados, es decir, son aquellos rayos que se desvían al ser concentrados y terminan no incidiendo en la placa receptora, perdiéndose en el ambiente o incidiendo en el aislante.

P_{sr} : Pérdidas por la sombra que el receptor hace sobre el concentrador.

Además definimos el término Q_p de la ecuación (4.2):

$$Q_p = Q_{ra} + Q_{ca} + Q_{rm} + Q_{cm} \quad \dots \quad (4.4)$$

Dónde:

Q_{ra} : Calor perdido por radiación en el aislante.

Q_{ca} : Calor perdido por convección en el aislante.

Q_{rm} : Calor perdido por radiación en el metal.

Q_{cm} : Calor perdido por convección en el metal.

4. SOLUCIÓN NUMÉRICA DEL RECEPTOR

Dado que la finalidad de este capítulo es analizar las capacidades del sistema concentrador-receptor como horno solar, y para esto se necesita la distribución de temperaturas del receptor. S

Por dicha situación, se planteó la ecuación de conducción de calor en dos dimensiones, coordenadas cartesianas, propiedades constantes y estado estacionario. Con las suposiciones anteriores, la ecuación de calor queda de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad \dots \quad (4.5)$$

La ecuación (4.8), está sujeta a las siguientes condiciones de frontera:

En la superficie de la placa de calentamiento:

$$\text{En } y = 0 \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} = q''_0 \quad \dots \quad (4.6)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon \sigma [T_0^4 - T_\infty^4] \quad \dots \quad (4.7)$$

En la superficie del aislante:

$$\text{En } x = \frac{D}{2} \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = h \left(T_{\infty} - T_{\left(\frac{D}{2}\right)} \right) \quad \dots \quad (4.8)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \varepsilon \sigma \left[T_{\left(\frac{D}{2}\right)}^4 - T_{\infty}^4 \right] \quad \dots \quad (4.9)$$

Para la solución de la ecuación de conducción se utilizó el software NX 7.5® (ver anexo 3), obteniendo así la distribución de temperaturas en la placa metálica de calentamiento, en el aislante, además de la distribución en la pieza dentro del horno.

En la *Imagen 4.6* se muestra la pieza metálica del receptor modelada en el software CATIA V5, que posteriormente será la pieza que reciba la radiación directamente. Del lado derecho en la imagen 4.7 se muestra el plano en sección de dicha placa en milímetros (mm).

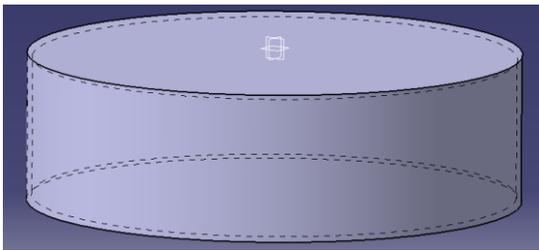


Imagen 4.6. Placa metálica receptora de acero inoxidable

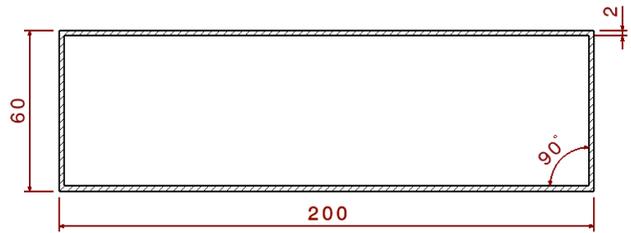


Imagen 4.7. Plano de la placa metálica receptora

En la *Imagen 4.8* se muestra el aislante térmico que cubre la placa metálica mostrada en la *Imagen 4.6*. En la *Imagen 4.9* se muestra un plano en sección con las dimensiones en milímetros del aislante.

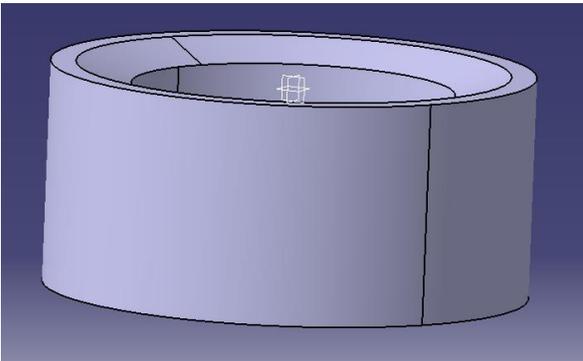


Imagen 4.8 Pieza aislante del receptor

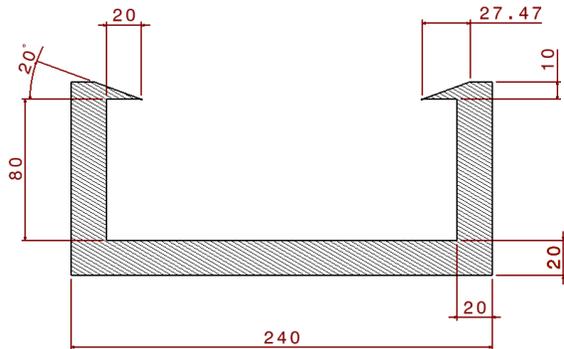
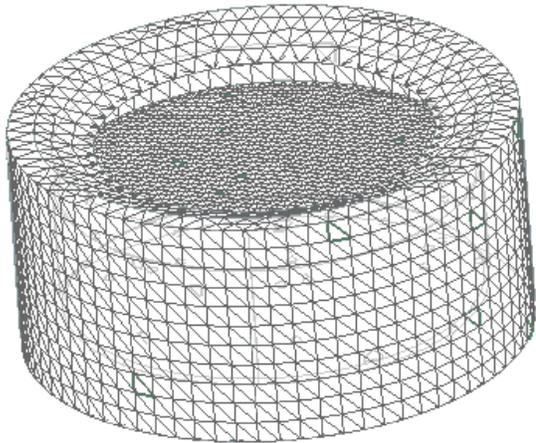


Imagen 4.9 Plano del aislante térmico del receptor

Posteriormente se realizó el ensamble de la placa receptora y el aislante térmico, para después hacer la discretización de las piezas, con elementos 3D con tamaño de 10(mm) de tipo TRIA en el caso del aislante y elementos 3D con tamaño de 4(mm) de tipo TRIA en el caso de la placa receptora. Quedando el ensamble con las piezas discretizadas como se muestra en la *Imagen 4.10*.



Nota: En NX 7.5 se pueden definir contactos térmicos entre mallas de diferente tamaño, por lo que se definió un tamaño de malla más fino para la placa metálica, que es la pieza que recibe directamente el calor.

Imagen 4.10. Mallado del ensamblaje del receptor

Para conocer la entrada de calor “ Q_e ” que tendrá el receptor (como se muestra en la Imagen 4.5) tenemos que considerar todas las pérdidas pertinentes (planteadas en la ecuación 4.4); las pérdidas por reflexión del concentrador ya están consideradas en el análisis de trazado de rayos del capítulo 3, pero también hay que considerar las pérdidas por los rayos que no están entrando en la cavidad del receptor definidas con el factor de pérdidas por desviación (P_d) en la ecuación 4.3, además de las pérdidas por la sombra que el receptor hace sobre el concentrador y las pérdidas por absorción de la placa receptora .

Para calcular las pérdidas mencionadas recordemos el gráfico de la Imagen 3.23 del tercer capítulo donde la potencia total de los rayos en el plano a 71 (cm) de la base fue 2046 (W).

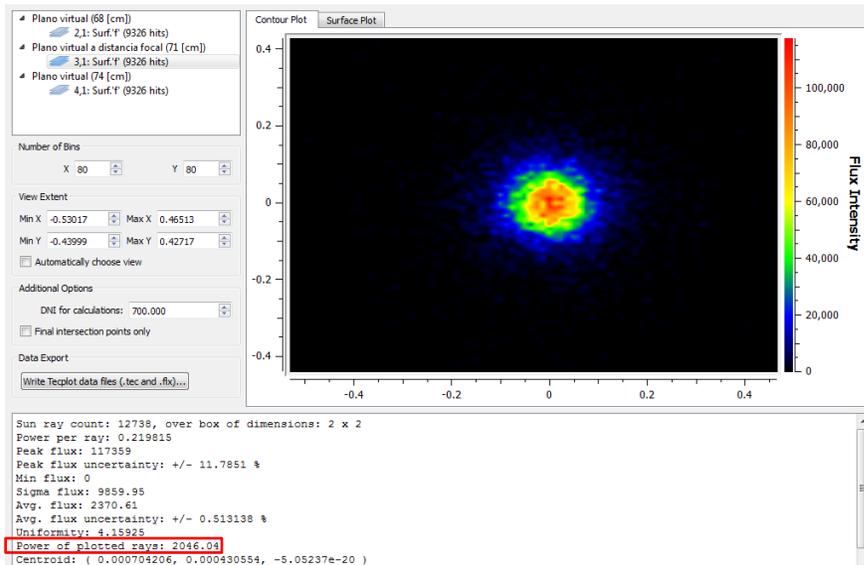


Imagen 3.23. Mapa de flujo del Plano Virtual 2 a 71(cm) de la base de la parábola

Ahora corremos un análisis más de trazado de rayos a 71 (cm) de la base de la parábola, pero esta vez con un plano receptor que cumple con las dimensiones de la entrada del receptor propuesto (círculo de 16 (cm) de diámetro) para obtener así un mapa de flujo con sólo la radiación que entra

al receptor, es decir, es un análisis que considera las pérdidas por desviación de los rayos fuera de la cavidad de entrada del receptor. Los resultados se muestran en la *Imagen 4.11*

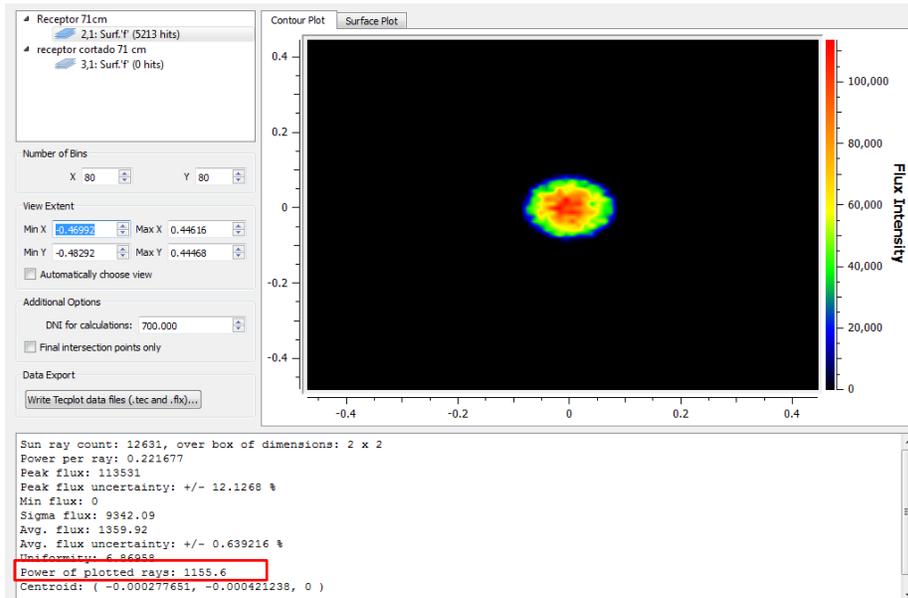


Imagen 4.11 mapa de flujo, plano virtual de 16cm de diámetro a 71cm de la base de la parábola

Como se observa en la *Imagen 4.11* la potencia de los rayos entrantes en el plano virtual mencionado es de 1155.6 (W). Este valor ya considera pérdidas por reflectividad y por desviación, faltando aún por considerar pérdidas por la sombra del receptor y absorptancia.

4.1. PÉRDIDAS DE CALOR POR DESVIACIÓN, REFLECTIVIDAD, ABSORTANCIA Y SOMBRA DEL RECEPTOR

Ahora con base en los resultados obtenidos del análisis óptico, se calcularon las pérdidas por desviación de los rayos y por reflectividad del disco parabólico, para esto primero se define como energía total de entrada (Q_{Te}), a la energía que incide en la cara reflejante del concentrador, calculándola como se muestra en la *ecuación (4.10)*:

$$Q_{Te} = G * A_c \quad \dots (4.10)$$

Quedando:

$$Q_{Te} = 700 \left(\frac{W}{m^2} \right) * \pi * (1(m))^2 = 2199.115(W)$$

Una vez con el valor de Q_{Te} recordemos la simulación en el Programa SolTrace cuyos resultados se pueden ver en la *Imagen 4.11*, donde se obtuvo el calor dirigido al receptor, considerando pérdidas por reflectividad y pérdidas por desviación de rayos, obteniendo un valor de 1155.6 [W], por lo cual podemos afirmar la *ecuación (4.11)*:

$$Q_{Te} * \rho * P_d = 1155.6 (W) \quad \dots (4.11)$$

Dónde:

ρ : Reflectividad del concentrador solar

P_d : Factor de pérdidas por desviación

Y sabemos que:

$$Q_{Te} = 2199.115(W) \text{ y que } \rho = 0.93$$

$$\text{Por lo tanto } P_d = 0.565$$

Una vez teniendo los valores de P_d y de ρ , se pueden obtener los valores de pérdidas en unidades de potencia (W). Definiendo las pérdidas térmicas por reflectividad como PT_ρ , y las pérdidas térmicas por desviación de rayos como PT_d . A continuación se presentan los resultados:

$$PT_\rho = 153.938 (W)$$

$$PT_d = 889.577 (W)$$

Si ahora sustituimos en la ecuación 4.6 los 1155.6 (W) obtenidos del análisis, nos queda:

$$Q_e = (1155.6(W) * \alpha) - P_{sr} \quad \dots (4.12)$$

Dado que queremos tener el mínimo de pérdidas por absorción buscamos un valor alto de dicha propiedad, considerando entonces la absorción de un cuerpo negro mate ($\alpha = 0.96$). Sustituyendo el valor de α y desarrollando el término de pérdidas por la sombra del receptor, nos queda:

$$Q_e = (1155.6(W) * 0.96) - G * A_r \quad \dots (4.13)$$

Dónde:

A_r : Área del receptor que provoca sombra en el concentrador

Si ahora sustituimos los valores de irradiación solar directa (G) y el área del receptor, nos queda:

$$Q_e = (1155.6(W) * 0.96) - 700 \left(\frac{W}{m^2} \right) * \pi * (0.12(m))^2 \quad \dots (4.14)$$

Finalmente obtenemos que el Calor de entrada (Q_e) tiene el siguiente valor:

$$Q_e = 1077.7086 (W)$$

4.2. PARÁMETROS DE ENTRADA PARA EL ANÁLISIS

Una vez teniendo el calor de entrada, podemos definir todos los parámetros de entrada usados para el análisis térmico en el software NX 7.5®, tomando en cuenta las consideraciones mostradas en la *Imagen 4.5*.

Parámetros Térmicos			
Condiciones ambientales			
Temperatura ambiente		20	°C
Coeficiente de conveccion			
Dentro de la cavidad		10	W/m*K
Fuera de la cavidad		25	W/m*K
Calor de Entrada			
Qe		1077.7	W
Condiciones de contacto			
Aislante - Placa		Contacto perfecto	
Propiedades de Materiales			
	Placa	Aislante	Pieza Al
Densidad	7733 Kg/m ³	48 Kg/m ³	2794 Kg/m ³
Calor específico	460 J/Kg*K	960 J/Kg*K	880 J/Kg*K
Conductividad térmica	variable*	variable*	variable*
Emisividad	1	0.05	
Detalles de Simulación			
Solver	NX Thermal /Flow		
Estado de Simulación	Estado estacionario		

Tabla 4.1. Parámetros de entrada para simulación térmica.

Notas: Las propiedades del aislante mencionadas en la Tabla 4.1 fueron sacadas del libro “Fundamentos de Transferencia de Calor” [Frank P. Incropera, David P. De Witt, 1999].

Los gráficos de conductividad térmica se encuentran en el anexo 4.

Las propiedades de la placa metálica corresponden a acero inoxidable AISI 410 (ya incluidas en la biblioteca de materiales del software NX 7.5). El material aislante mencionado en la *tabla 4.1* corresponde a un aislante industrial de Fibra de óxido de silicio-alumina.

La información de la obtención de los coeficientes de convección utilizados para la simulación se puede encontrar en el anexo 2.

Una vez con los valores de entrada definidos se procede a correr la simulación térmica del receptor solar para obtener un perfil de temperaturas de éste.

4.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una vez terminada la simulación en estado estacionario se visualizaron los resultados obtenidos de la distribución de temperaturas en las piezas que conforman el sistema de recepción (placa metálica receptora, aislante térmico y pieza de aluminio)

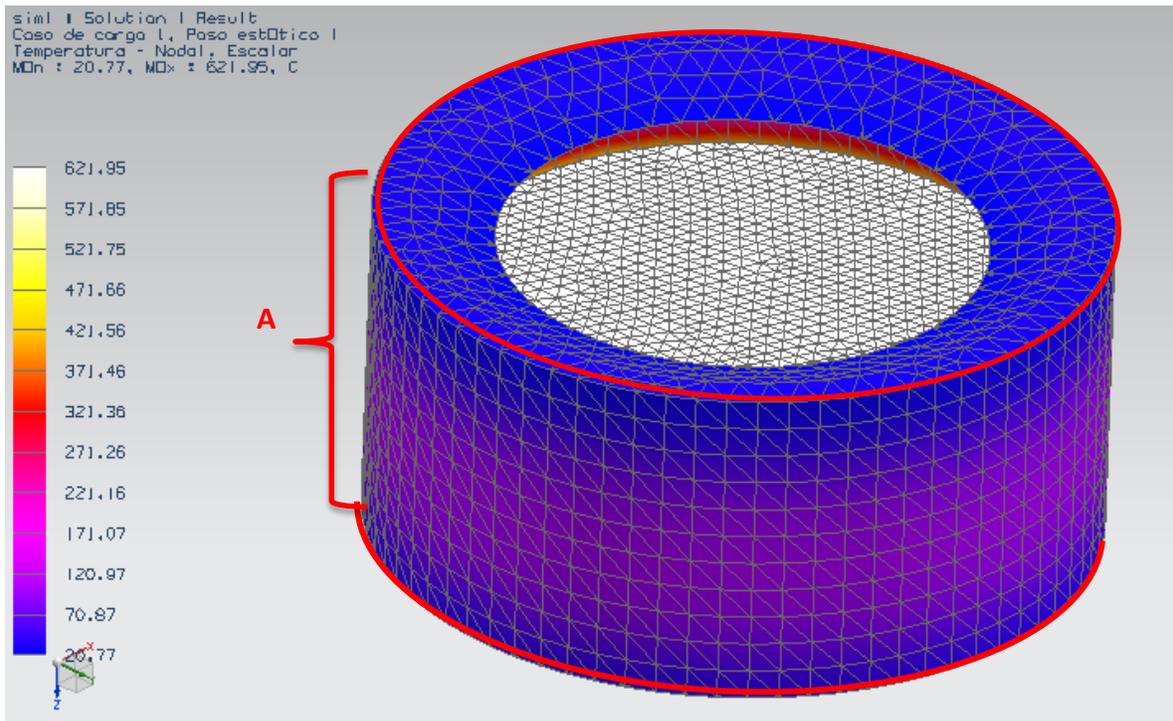


Imagen 4.12. Perfil de temperaturas lateral del receptor

En la *Imagen 4.12* se muestra la distribución de temperaturas en la cara curva lateral del aislante (marcada un una letra “A”). Además se obtuvo del software una temperatura promedio de la cara “A” del aislante de **83.97 °C**, con una temperatura máxima de 128.4 °C y una mínima de 27.73 °C.

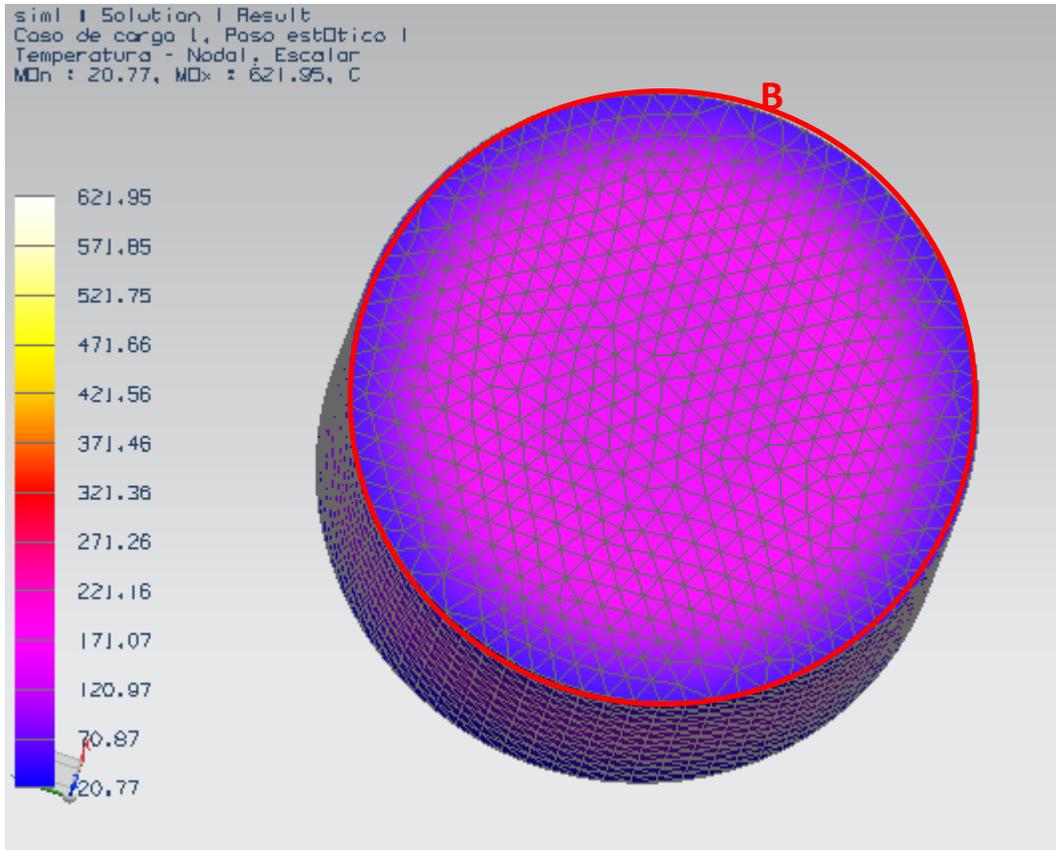


Imagen 4.13. Perfil de temperaturas en la parte posterior del aislante

En la *Imagen 4.13* se muestra el perfil de temperaturas encontrado en la parte posterior del aislante térmico (marcado con una letra “B”), encontrando una temperatura promedio de esta cara de **102.1 °C**, con una máxima de 128.4 °C y una mínima de 43.36 °C.

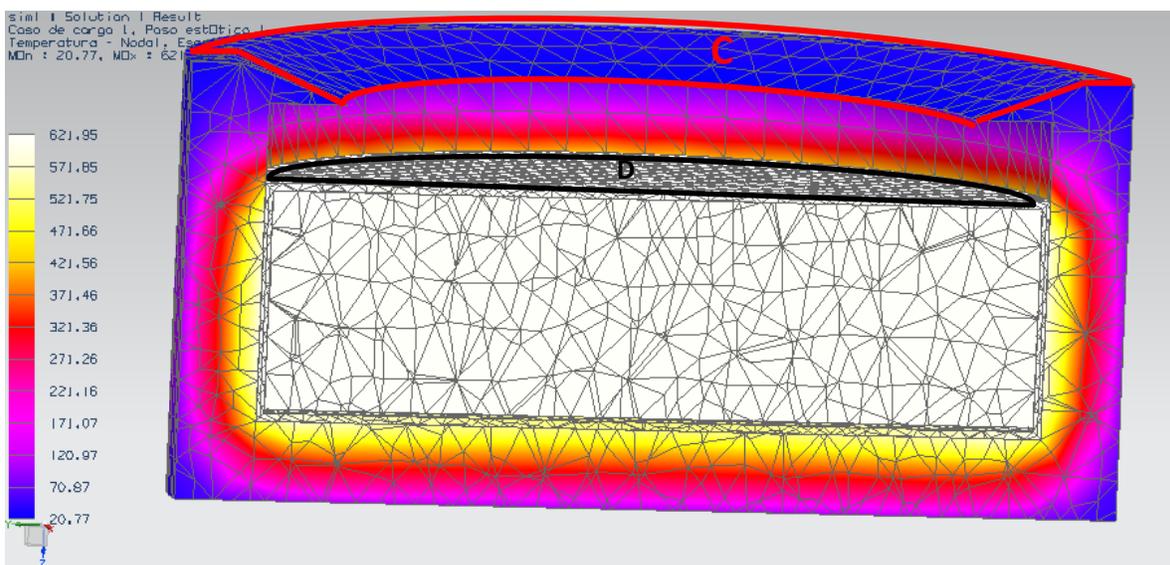


Imagen 4.14. Perfil de temperaturas del corte en sección del receptor

En la *Imagen 4.14* se muestran los resultados del perfil de temperaturas en un corte en sección a la mitad del receptor, notando que la parte superior del aislante está definida como superficie "C", y cara superior de la placa receptora (que está en contacto con el ambiente) es definida como superficie "D", notando que dicha superficie es donde se recibe directamente la radiación solar.

En la cara "C" del **aislante** se obtuvo una temperatura promedio de **33.46 °C**, con una máxima de 67.45 °C y una mínima de 25.07 °C.

Mientras que en la cara "D" de la **placa metálica** se obtuvo una temperatura promedio de **619.6 °C**, con una máxima de 621.9 °C y una mínima de 617.1 °C.

A continuación en la *Imagen 4.15* se muestra la distribución de temperaturas de la placa receptora en una vista seccionada.

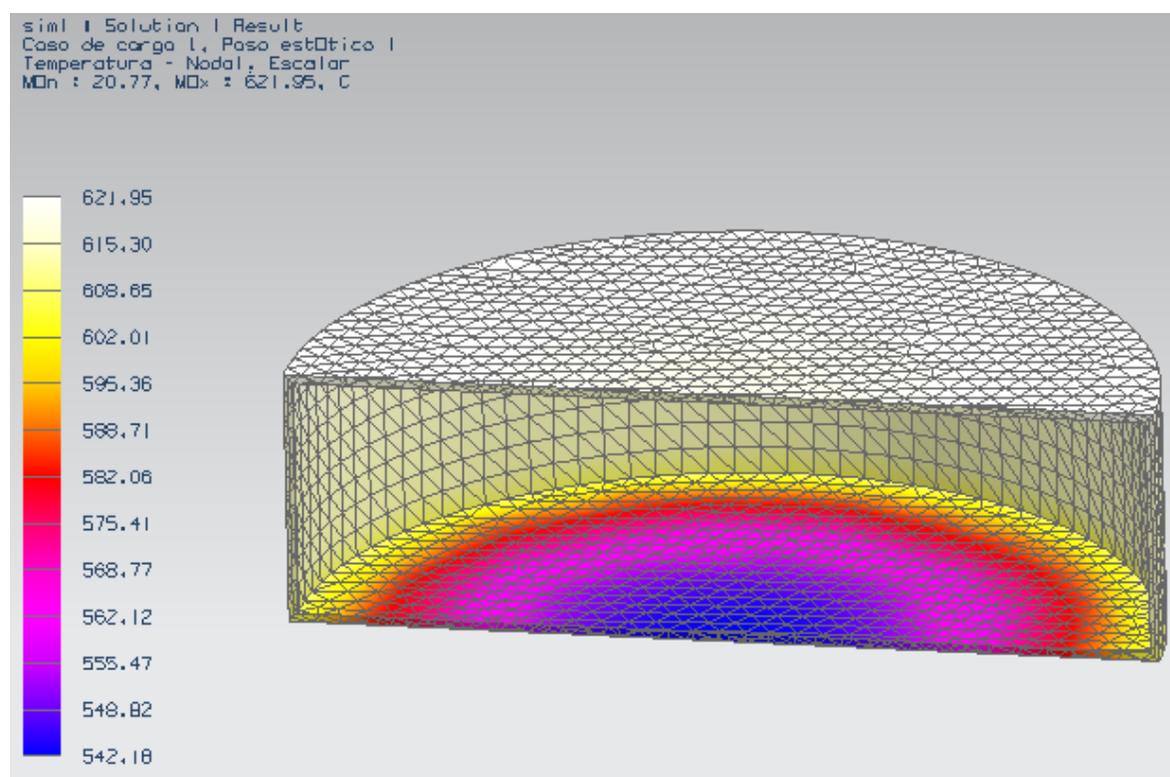


Imagen 4.15. Perfil de temperaturas en sección de la placa metálica receptora

Uno de los resultados más relevantes de este capítulo es la temperatura alcanzada por la pieza de aluminio dentro del horno solar, ya que esto nos dirá las capacidades de nuestro sistema como horno solar. En la *Imagen 4.16* se puede observar la distribución de temperaturas de dicha pieza una vez que ha llegado a su temperatura máxima (estado estacionario).

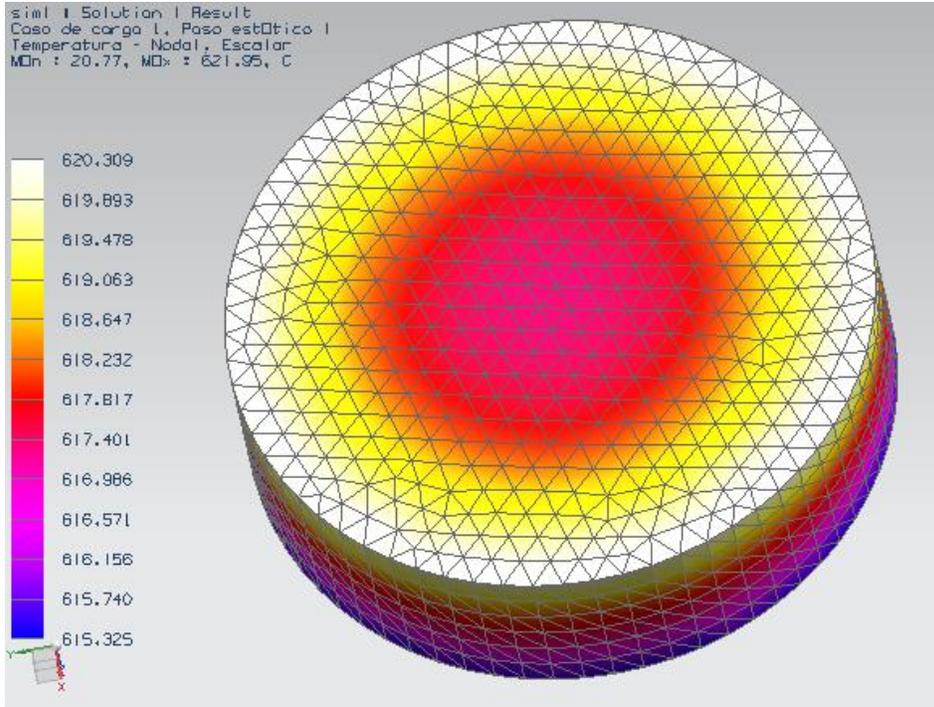


Imagen 4.16. Perfil de temperaturas en la pieza de aluminio. Vista superior

Los resultados obtenidos del software muestran una temperatura promedio de 617.9 °C en todo el volumen de la pieza. Encontrando una temperatura máxima de 620.3 °C y una mínima de 615.3 °C

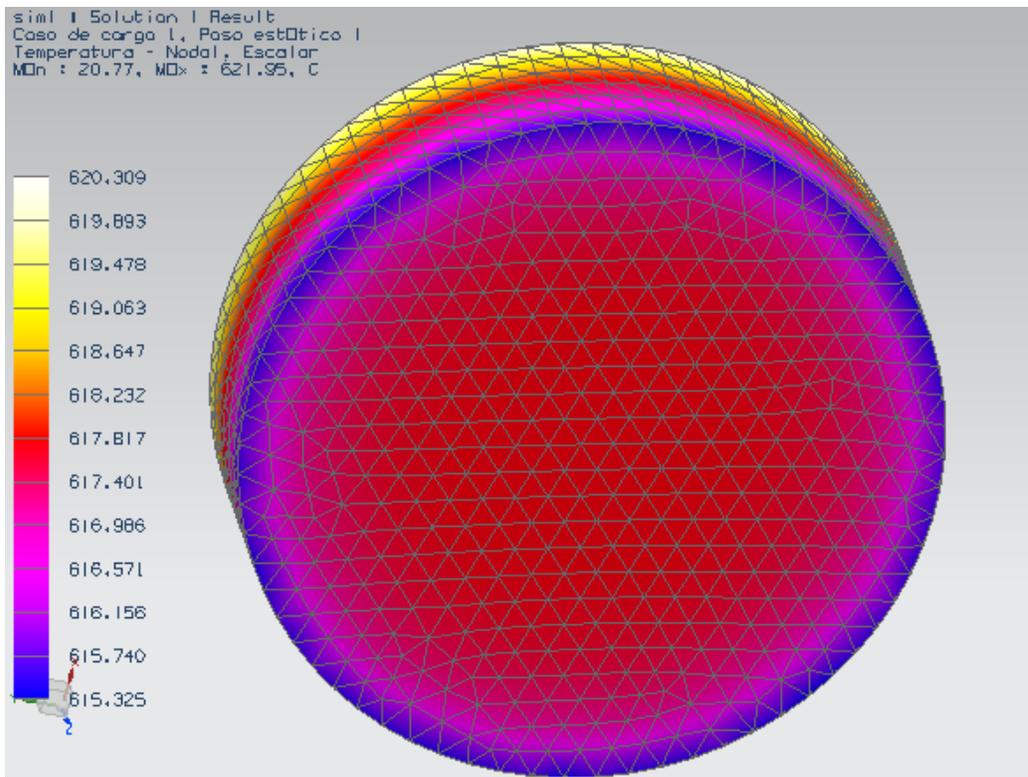


Imagen 4.17. Perfil de temperaturas en la pieza de aluminio. Vista inferior

Como se puede ver en la *Imagen 4.16* y en la *Imagen 4.17* (vista superior e inferior respectivamente), la temperatura alcanzada en la pieza es relativamente uniforme, lo cual es ideal para su función de horno.

Para saber cuánta energía fue absorbida por la pieza una vez que llegó a estado estacionario, recurramos a la ecuación, que es válida bajo la consideración de que el proceso ocurre a presión constante:

$$\Delta U = mC_p\Delta T \quad \dots \quad (4.15)$$

Donde:

m : Masa de la pieza

C_p : Calor específico

ΔT : Diferencia de temperaturas entre el estado inicial y el estado final

ΔU : Cambio de energía interna en la pieza del estado inicial al final

Del software obtenemos el dato de masa de la pieza, resultando ser 4.6327 Kg. Además consideramos que la pieza inicialmente se encontraba a una temperatura promedio de 20 °C, que es la temperatura que anteriormente se definió como temperatura ambiente.

Una vez con estos datos queda la solución:

$$\Delta U = (4.6327 \text{ (Kg)}) \left(880 \left(\frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right) \right) (617.9(^{\circ}\text{C}) - 20(^{\circ}\text{C}))$$

Por lo tanto:

$$\Delta U = 2.437 \text{ (MJ)}$$

Por lo cuál podemos decir que una vez que el sistema llegó a estado estacionario, la pieza habrá absorbido un total de 2.437 (MJ), cuya única fuente de energía es el sol.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez con los resultados obtenidos podemos mencionar que dadas las temperaturas alcanzadas en la pieza dentro del horno (máxima de 620.3 °C), si bien sería suficiente para realizar tratamientos térmicos de una pieza en su interior, aún no sería suficiente para considerarlo horno de fundición de aluminio.

Una vez con los valores obtenidos de pérdidas de energía en el sistema de concentración solar, integrado por el disco parabólico y el receptor propuesto, podemos hacer un análisis de los principales contribuidores en pérdidas energéticas.

En la *tabla 4.2* se muestran los valores de potencia perdida por los diferentes mecanismos de analizados. En la *Imagen 4.18* se muestra un gráfico con los datos de pérdidas energéticas entre la energía total que incide en el concentrador hasta la energía que incide en el receptor propuesto, graficados de menor a mayor.

Tabla de Pérdidas	
En la placa receptora	
Absortancia	46.2240 [W]
Del disco parabólico	
Reflectividad	153.9380 [W]
Desviación de rayos	889.5768 [W]
Sombra del receptor	31.6673 [W]

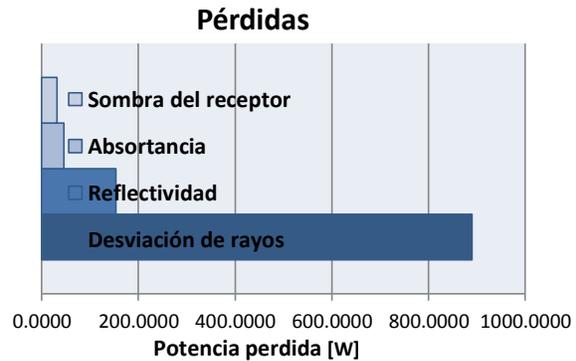


Tabla 4.2. Pérdidas energéticas Totales (Valores)

Imagen 4.18. Gráfico de pérdidas por mecanismo

Como se observa en la *Imagen 4.16*, el mayor contribuidor a las pérdidas energéticas en el sistema de concentración es la desviación de los rayos, que son todos aquellos rayos que inciden en el disco concentrador y en su trayectoria al receptor se desvían y terminan por no incidir en la placa metálica del receptor, estas pérdidas son causadas por deformaciones en el paraboloide de revolución (disco concentrador).

Al analizar las demás pérdidas (absortancia, reflectividad y sombra del receptor) nos damos cuenta que no resultan ser un factor tan importante como la desviación de los rayos, notando incluso que estas pérdidas implican el 72.2 % de las pérdidas desde que la energía incide en el disco concentrador hasta que la energía que entra al receptor.

A pesar de las pérdidas energéticas nos damos cuenta que el sistema concentrador-receptor resulta tener un importante aprovechamiento de la energía solar

7. PROPUESTAS DE MEJORA

Dados los resultados obtenidos en el análisis de pérdidas, las propuestas de mejora estarán enfocadas a disminuir 2 factores que contribuyen de manera importante a las pérdidas; la desviación de rayos y la radiación en la placa metálica (la radiación en la placa se vuelve un factor importante cuando la temperatura es alta).

Para evitar la desviación de los rayos se propone reforzar la estructura de soporte de disco parabólico con una malla metálica, de manera que el disco esté adherido en más locaciones de su superficie a la estructura, logrando así evitar deformaciones y mejorando la superficie en una más uniforme. En cuanto a la forma de acoplar el disco parabólico a la estructura de soporte, se propone un adhesivo industrial, del tipo usado en la industria automotriz, que no modifican la curvatura de la superficie en contacto y no requieren perforaciones para su uso.

Además, para evitar las pérdidas por radiación en la superficie de placa metálica que forma parte del receptor y está en contacto con el ambiente (marcada como superficie "D" en la *Imagen 4.14*), se propone añadir un recubrimiento selectivo, un material que permita a la placa tener una alta absorción, pero una emisividad baja, ya que el diseño actual contempla alta absorción pero también alta emisividad, los inconvenientes con este tipo de materiales de recubrimiento es su alto costo y la dificultad para aplicarlos.

CONCLUSIONES

A pesar de las limitantes de esta tesis, se puede concluir que la información y los resultados obtenidos en los capítulos presentados nos ayuda a conocer las características ópticas y térmicas de trabajo del sistema concentrador – receptor, cumpliendo entonces el principal objetivo de este proyecto.

De los resultados obtenidos en perfil de temperaturas del receptor propuesto en el cuarto capítulo de este documento, podemos mencionar que las placas metálicas propuestas como paredes del horno solar, presentan una temperatura relativamente uniforme, que nos indica condiciones óptimas esperadas para un horno, además podemos mencionar que la temperatura promedio alcanzada en la pieza al interior del horno también muestra una temperatura suficientemente alta para la aplicación propuesta. Por lo que podemos concluir que, con base en los resultados obtenidos, las características del concentrador analizado y el receptor propuesto resultan satisfactorias para la aplicación solar de alta temperatura que se propuso.

Además podemos concluir que los análisis realizados, cuyos resultados generales están reportados en el análisis de resultados del capítulo 4, nos sirve para ser tomado como base en trabajos posteriores, y da pie a una propuesta más robusta, con una visión más amplia de las áreas de oportunidad y características positivas del sistema.

Al término de este proyecto podemos afirmar que a pesar de las deficiencias de la energía solar, tales como la intermitencia diaria de la radiación o los niveles no constantes de radiación respecto del periodo del año, la energía solar tiene el potencial para convertirse en una importante fuente de energía como calor de procesos o calor con finalidades de uso doméstico, lo cual traería consigo una innumerable cantidad de beneficios ambientales, económicos y culturales. Si pensamos por ejemplo que la energía absorbida por la pieza resultó ser de 2.437 KJ, que equivale a la energía consumida por un foco de 60W encendido durante 11.3 hrs.

LIMITANTES DEL PROYECTO Y RECOMENDACIONES POSTERIORES

Las limitantes de este proyecto se presentan en la correlación entre las pruebas físicas y la caracterización óptica teórica, ya que simplemente se analizó el tamaño de la mancha focal real y se iteraron los valores de error de desviación de rayos buscando un tamaño similar de mancha entre las pruebas físicas y las pruebas virtuales, pero dada la dificultad no se tomaron mediciones de flujo térmico que apoyarán el análisis.

En caso de retomar el diseño de receptor propuesto o sus propuestas de mejora, se sugiere realizar pruebas físicas donde se tomen mediciones de temperatura en la placa receptora. Además se propone corroborar con mediciones experimentales que el flujo térmico en la zona de la mancha focal sea acorde a los cálculos realizados, con la finalidad de robustecer y mejorar la correlación entre los análisis teóricos y experimentales planteados en este documento. Además se propone también tomar mediciones de velocidad del viento promedio, con la finalidad de caracterizar de manera más exacta los coeficientes de convección.

Para trabajos posteriores se propone realizar el análisis en estado transitorio y tomando en cuenta la curva de variación de radiación solar media durante el día, para conocer la temperatura de trabajo en diferentes momentos del día y por lo tanto con diferentes ángulos de trabajo del concentrador-receptor.

También finalmente se propone fabricar un prototipo de receptor para realizar pruebas físicas en él, y poder hacer así un análisis de correlación teórica y experimental con los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

Pedro Fernández Díez (1992). *Procesos Termosolares en baja, media y alta temperatura*. Universidad de Cantabria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Eds.). Cantabria, España.

Yunus A. Cengel (2004). *Transferencia de Calor (2da Edición)*. Mc. Graw Hill Interamericana (Eds.). D.F.México

Frank P. Incropera, David DeWitt (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor (Cuarta Edición)*. Prentice Hall (Eds.). Edo. de México, México.

Lluís Jutglar (2004). *Energía solar, energías alternativas y medio ambiente*. Ediciones Ceac (Eds.). Barcelona, España

Ma Robert Y., *Wind Effects on Convective Heat Loss From a Cavity Receiver for a Parabolic Concentrating Solar Collector*, Sandia report contract SAND92-7293, 1993.

Ruelas Ruiz José, Velázquez Limón Nicolás, Beltrán Chacón Ricardo, 2011. *Diseño de un concentrador solar acoplado a un motor Stirling Fijo*, Baja California, México 2011.

MESOGRAFÍA

<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=alltypes&aid=12&cid=ww.&syid=2006&eyid=2008&unit=BKWH>

[U.S. Energy Information Administration, "Electricity Net Generation by type", 2008]

http://www.eia.gov/forecasts/ieo/more_highlights.cfm

[U.S. Energy Information Administration, "World Energy Markets by Fuel Type", 2011]

http://meteonorm.com/fileadmin/user_upload/maps/gh_map_world_v7.png

[Meteonorm, "Radiación solar media mundial anual", 2011]

http://www.geofisica.unam.mx/ors/energia_solar1.pdf

[Instituto de Geofísica de la UNAM, Centro Regional de Medición de la Radiación AR-IV, OMM, "Energía Solar Disponible en Ciudad Universitaria D.F."]

http://www.energia.gob.mx/webSener/res/168/A6_Solar2.pdf

[SENER, "Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de las Energías Renovables en México", 2005]

http://www.iea.org/Papers/2008/Indicators_2008.pdf

[International Energy Agency, "Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency" 2008]

<http://www.iea.org/Textbase/npsum/ETP2012SUM.pdf> [International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives 2012, Pathways to a Clean Energy System", Junio 2011]

<http://www.psa.es/webesp/instalaciones/discos.php>

[Plataforma Solar de Almería PSA online, "Instalaciones con discos parabólicos"]

<http://pointfocus.com/images/pdfs/eurodish.pdf>

[Schalaich Bergermann, "EuroDish-Stirling, System Description, a new decentralised solar power technology", 2001]

<http://www.reflectechsolar.com/>

[Reflec Tech mirror film , 2012]

<http://www.nexteraenergyresources.com/home/index.shtml>

[Next Era Energy resources, 2011]

ANEXOS

ANEXO 1

Ficha técnica del material reflejante usado en el concentrador solar, [www.reflectechsolar.com, 2012]:



Simply Brilliant

Technical Data

ReflecTech® Mirror Film

Performance Characteristics

Specular Reflectance ⁽¹⁾	94 %	At 25 mrad, 650 nm
Solar-Weighted Hemispherical Reflectance ⁽²⁾	93 %	DIN 5036-1, 3 ASTM E8 91

(1) At 1.4° acceptance angle measured on Devices & Services 15R Specular Reflectometer

(2) Integrated over direct normal air mass 1.5 solar spectrum.

Product/Physical Characteristics

	Machine Direction	Transverse Direction	
Tensile Strength (MPa)	61	64	ASTM D882
Elongation at Break (%)	68	72	ASTM D882
Yield Strength at 2 % Offset (MPa)	40	36	ASTM D882
Yield Elongation at 2 % Offset (%)	4.7	4.6	ASTM D882
Modulus (MPa)	1430	1566	ASTM D882
Nominal Thickness	0.004 in	(4 mils, 0.1 mm)	
Coefficient of Thermal Expansion (cm/cm/°C)	5.5 x 10 ⁻⁵		ASTM E831

Application Characteristics

Adhesion to Aluminum ⁽³⁾	Initial 11.4	ASTM D903
180° Peel Strength (N/25mm)	Fully Cured 19.9	ASTM D903

(3) Adhesion depends on the nature of the surface. The indicated values are for reference only.

Storage and Operation

Shelf Life ⁽⁴⁾	1 year	
Maximum Operating Temperature	60°C	(140°F)
Cleaning	Brushless pressure wash with de-mineralized or de-ionized water only	

(4) Store in clean and dry environment that is not in direct sunlight in a location with an ambient temperature of 100°F (38°C) or less.

ANEXO 2

Cálculo de los coeficientes de convección usados para el análisis térmico

Para obtener el coeficiente de convección natural dentro de la cavidad recurrimos a la correlación de Stine and McDonald [Stine and McDonald, 1989]

$$Nu_L = 0.088 Gr_L^{\frac{1}{3}} \left(\frac{T_w}{T_o}\right)^{0.18} (\cos\theta)^{2.47} \left(\frac{d}{L}\right)^s \quad \dots (5.1)$$

Dónde:

d : Diámetro de apertura

L : Diámetro de la placa

θ : Ángulo de inclinación del receptor

T_o : Temperatura ambiente, K

T_w : Temperatura interna de la pared (placa metálica), K

Gr_L : Número de Grashof

$$s = 1.12 - 0.982 \left(\frac{d}{L}\right)$$

Ahora, consideramos que el ángulo θ de la ecuación (5.1) está tomado como se muestra en la *Imagen 5.1* donde en color azul se muestra el receptor

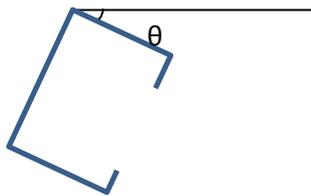


Imagen 5.1. Ángulo de inclinación del receptor respecto de la horizontal.

Notamos entonces que nuestro caso de estudio es con un ángulo de 90° ($\theta=90^\circ$), es decir, con la cavidad apuntando hacia abajo, y ya que la ecuación (5.1) depende del coseno del ángulo θ , entonces no habrá convección natural en la cavidad (siendo este valor cero).

Ahora empleamos la correlación de Ma Robert Y. [Ma Robert Y. 1993] para calcular el coeficiente de convección forzada en el interior de la cavidad, considerando factores como la velocidad del viento y la inclinación de la cavidad, tomada de la misma manera mostrada en la *imagen 5.1*.

$$h_{int} = f(\theta) * v^{1.401}$$

Dónde:

$$f(\theta) = 0.1634 + 0.7498 * \text{sen}(\theta) - 0.5026 * \text{sen}(2\theta) + 0.3278 * \text{sen}(3\theta)$$

v : Velocidad del viento en m/s

Consideramos que al ser una azotea el receptor estará expuesto a velocidades moderadas de entre 20 y 28 km/h según la escala de Beaufort, tomando el valor más alto de las velocidades moderadas (28 km/h) como valor de referencia, obteniendo para el interior de la cavidad que:

$$h_{int} = 10.3 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Para el coeficiente externo a la cavidad (en el aislante), dada la variabilidad de las condiciones de trabajo se definió como 25 (W/m²) ya que este valor representa el valor máximo usual de pérdidas por convección natural del aire.

Información de Simulación térmica avanzada de NX [www.siemens.com/nx, 2010]:

NX Advanced Thermal

Benefits

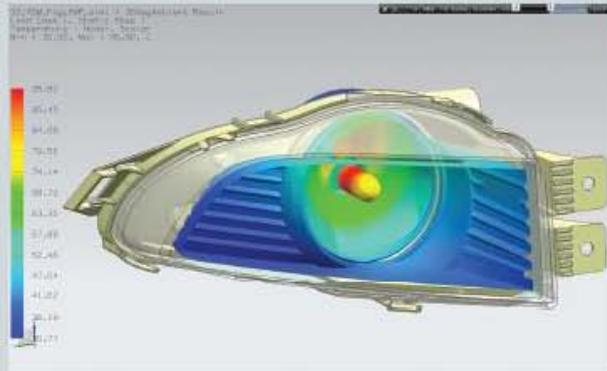
- Quickly move from NX CAD assembly to thermal simulation results
- Perform rapid what-if scenario investigations even for complex thermal analysis problems
- Reduce product design risk through high fidelity thermal simulation

Features

- Advanced heat transfer models for radiation and electric heating
- Parallel radiation solver for solution efficiency
- Advanced material models including phase change
- One-dimensional hydraulic network modeling

Summary

NX™ Advanced Thermal software extends the modeling and simulation capabilities of NX Thermal or NX Electronic Systems Cooling. The NX Advanced Thermal solver provides a wide range of methods for advanced radiation analysis, radiative and electrical heating models, advanced materials models such as phase change, charring and ablation, as well as one-dimensional hydraulic network modeling. Thermo-fluid coupling is enabled with NX Flow and NX Advanced Flow, and thermo-elastic effects can be simulated by mapping temperature results to NX Nastran®.



NX Advanced Thermal adds a rich feature set to the powerful simulation technology of NX Thermal. Intended for tackling complex thermal physics and challenging thermal management problems, NX Advanced Thermal offers the same best-in-class level of integration within the NX pre-processing, post-processing and simulation tools.

NX

www.siemens.com/nx

SIEMENS

NX Advanced Thermal

Applications of NX Advanced Thermal include simulation and analysis of a range of heat transfer problems in automotive, electronics, power, process and other industries. NX Advanced Thermal offers the following additional features on top of the NX Thermal license.

Advanced optical properties

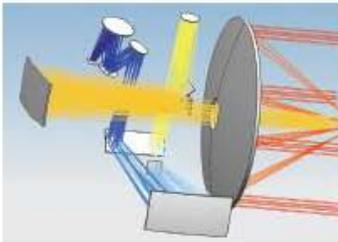
- Specular reflectivity, diffuse and non-diffuse transmissivity, index of refraction, solid absorption
- Direction-dependent optical properties, BRDF
- Wavelength-dependent properties for nongray analysis

Advanced material models

- Ablation and charring models
- Electrical resistivity and Joule heating
- Override sets for rapid evaluation of solution scenarios

Advanced radiation methods

- Deterministic and Monte Carlo ray tracing
- Nongray multiband radiative heat transfer



Radiative heating

- Solar heating with atmospheric and albedo flux models
- Radiative source definition, collimated or diffuse, spectrum-dependent, time and spatially varying flux

1D hydraulic network modeling

- 1D flow modeling using duct networks
- Ability to simulate convection to and from 1D duct networks

Advanced thermal couplings

- Perfect contact
- One-way heat transfer
- Free and forced correlation-based convection couplings
- Convective gap couplings
- User-defined couplings

Articulation and motion modeling

- Any combination of translational motion and rotational joints
- Time-dependent radiation and thermal couplings
- Post-processing of articulated mesh

Thermal control devices

- Peltier cooler models
- Active heater controllers, PID controllers

Open architecture

- Full access to thermal system equations
- Incorporation of external models
- Enhanced solution control

Parallelized radiation solver

- Distributed memory (MPI) based parallelization for highly scalable computation of view factors and radiative heating
- Applicable to multicore, network and cluster architectures

Supported hardware/OS

NX Advanced Thermal is an add-on module in the NX Advanced Simulation suite of applications. It requires a license of NX Thermal as a prerequisite. All standard NX hardware/OS platforms are supported (including Windows, Linux and selected 64-bit platforms). Contact Siemens PLM Software for any other specific hardware/OS support requests.



You can conduct coupled thermo-flow analysis without the need to transfer data between multiple software tools.

Contact

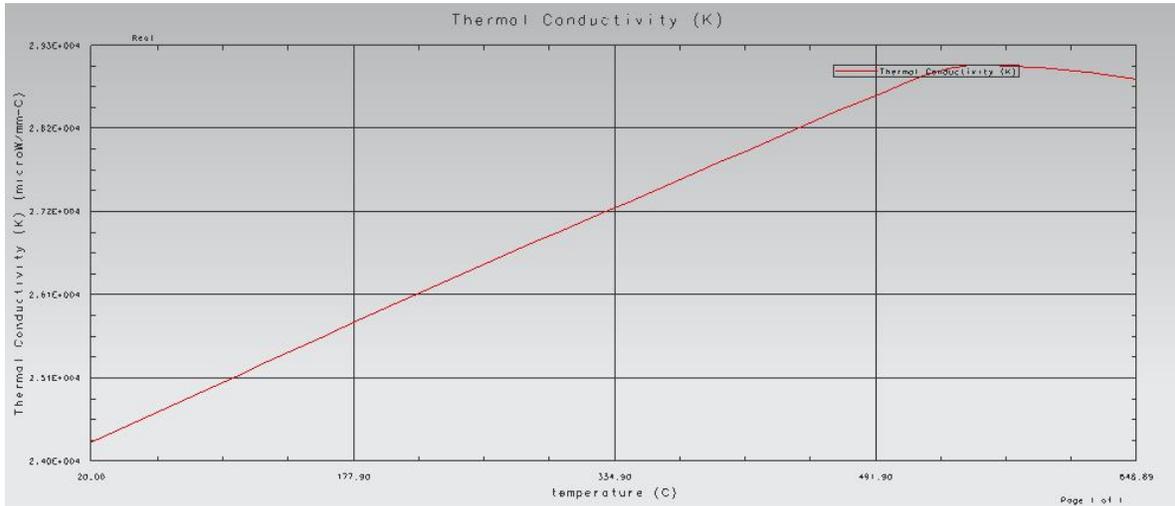
Siemens PLM Software
Americas 800 498 5351
Europe 44 (0) 1276 702000
Asia-Pacific 852 2230 3333

www.siemens.com/nx

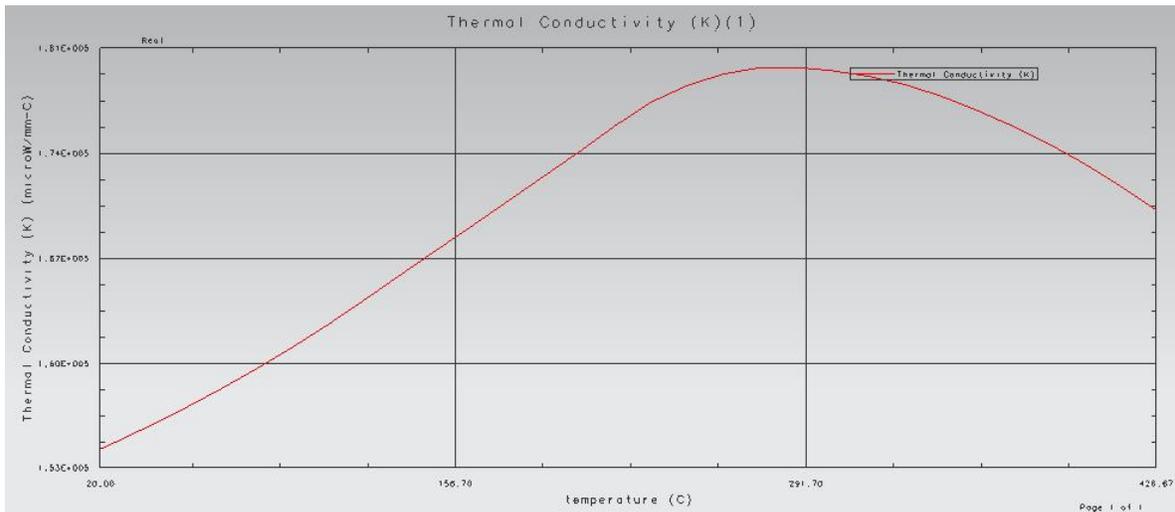
© 2010 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. All rights reserved. Siemens and the Siemens logo are registered trademarks of Siemens AG. D-Cubed, Femap, Geolus, GO PLM, I-deas, Insight, Jack, JT, NX, Parasolid, Solid Edge, Teamcenter, Tecnomatix and Velocity Series are trademarks or registered trademarks of Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. or its subsidiaries in the United States and in other countries. All other logos, trademarks, registered trademarks or service marks used herein are the property of their respective holders.
XB 10623 10/10 C

ANEXO 4

Conductividad térmica de Acero inoxidable AISI 410



Conductividad térmica de Aluminio 2014



Conductividad térmica del Aislante (Fibra de óxido de silicio-alúmina) para diferentes temperaturas

Temperatura (K)	530	645	750
Conductividad térmica	0.071	0.105	0.15