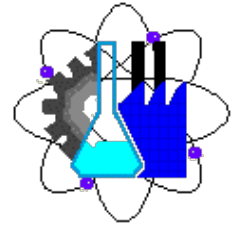




U.A.E.M

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



---

---

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN OPERACIÓN  
DE UNA PANTALLA LAMBERTIANA PARA EL HORNO  
SOLAR DE ALTO FLUJO RADIATIVO

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**I N G E N I E R O M E C Á N I C O**

**P R E S E N T A:**  
**Javier Licurgo Pedraza**

Asesor externo: **Dr. Claudio A. Estrada Gasca**

Asesor interno: **Dr. Rosenberg J. Romero Domínguez**

**Cuernavaca Mor. 2012**

---

Agradecimiento especial

Lugar en donde se desarrollo el trabajo de tesis:

Centro de Investigación en Energía (CIE),

de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Temixco Morelos.

Departamento de sistemas energéticos,

Coordinación de concentración solar.

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Y a la Facultad de ciencias químicas e ingeniería.

---

Dedicada a:

Mis padres, la señora Teresa Pedraza García y al señor Gerardo Licurgo Parra, por todo su amor, apoyo y la confianza que me dieron, con lo cual lograron hacer mas ligero mi camino.

Mi hermano, Ing. Eduardo Licurgo Pedraza, por su apoyo incondicional de toda la vida, por ser guía y ejemplo para mí.

Dios por la familia que tengo.

---

---

## **Agradecimientos**

Al Dr. Claudio A. Estrada primeramente por recibirme en las instalaciones del CIE, por la oportunidad de formar parte de éste increíble e importante proyecto a su cargo, por su paciencia, sus consejos y comentarios, por todo el apoyo brindado durante mi estancia en el CIE.

Al Dr. Rosenberg Romero por su inagotable paciencia y sus consejos, por sus palabras de aliento cuando las cosas parecían difíciles.

Al M.I. Ricardo A. Pérez Enciso por sus consejos y apoyo en todo momento, por todo el conocimiento compartido y por su gran amistad y la de su familia de quienes recibí una puerta abierta en todo momento, por su amistad.

Al Dr. Carlos A. Pérez Rábago por sus valiosos consejos y comentarios, por compartir sus conocimientos y por su apoyo durante la etapa experimental.

Al Dr. Rafael Castrejón G. por sus comentarios, consejos y por su atención.

Al Ing. Jesús Quiñones Aguilar por todo el apoyo técnico brindado durante mi estancia en el CIE y por su apoyo sus consejos y por su amistad.

A compañeros que conocí en el CIE Moisés Montiel, Ulises, Eduardo por sus comentarios, observaciones y amistad.

Al equipo de trabajo relacionado al proyecto, por parte del INAOE, al Ing. Javier Arriaga P., Al técnico Noé, por las experiencias compartidas y por su amistad. Al tecnólogo Leonel Reyes O. por su amistad y consejos.

A Maribel Fernández y Sharelly Cerdá, quienes en su momento como asistentes en la dirección del CIE-UNAM, siempre tuvieron una solución para los tramites referidos a mi estancia en el CIE.

A CONACyT y al SNI por el apoyo económico durante mi estancia en el CIE como ayudante de investigador.

A Francisco Hernández Tamayo y José A. García Castillo por ser compañeros y amigos durante la carrera y con quienes emprendimos juntos el reto de realizar la tesis en el CIE-UNAM.

A mi familia y amigos que me acompañaron en esta etapa de mi vida.

---

# Índice

## 1. Introducción

- 1.1 Energía solar y concentración solar
- 1.2 Hornos Solares
- 1.3 Descripción del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR) del CIE-UNAM,
- 1.4 Potencia solar concentrada
- 1.5 Objetivo

## 2. Descripción y preparación del blanco Lambertiano

- 2.1 Propiedades de superficie
- 2.2 Descripción de una superficie lambertiana
- 2.3 Preparación de la superficie lambertiana
- 2.4 El intercambiador de calor de placa plana
- 2.5 Balance de energía en la superficie

## 3. Instrumentación, operación y metodología experimental

- 3.1 Instrumentación y montaje
- 3.2 Operación
- 3.3 Metodología

## 4. Desarrollo experimental y análisis de resultados

- 4.1 Toma de imágenes y procesamiento
- 4.2 Determinación de las distribuciones de flujo radiativo concentrado
- 4.3 Determinación de concentraciones ópticas máximas
- 4.4 Análisis calorimétrico
- 4.5 Análisis alternativo de pérdidas en el blanco lambertiano.

## 5. Conclusiones

### Referencias y bibliografía

### Apéndice A

#### Planos del calorímetro

### Apéndice B

#### Programa para análisis de imágenes

### Anexo

#### Calculo de incertidumbre

---

## Lista de figuras

1.1	Descripción de las tecnologías solares	2
1.2	Sistemas de concentración solar	3
1.3	Componentes básicos de un horno solar, en configuración óptica sobre el eje.	4
1.4	Esquema del Horno Solar DLR en Colonia, Alemania, configuración Óptica fuera del eje	4
1.5	Horno Solar de Alto Flujo Radiativo, en el CIE-UNAM Temixco Morelos	6
1.6	Distribución de facetas y diseño final del concentrador del HSAFR	7
1.7	Fotografía y diagrama del concentrador con los grupos de facetas A y B montados	8
1.8	Atenuador visto desde el interior del HSAFR	9
1.9	Heliostato H36, Utilizado para operar el HSAFR con sus dos primeras ópticas grupos Ay B de espejos	9
1.10	Mesa de trabajo con movimiento en tres ejes, HSAFR CIE-UNAM	10
2.1	Efectos de la radiación incidente	14
2.2	Efectos de la reflexión en superficies a) reflexión especular b) reflexión difusa	14
2.3	Efecto de la variación del área proyectada en una superficie respecto al ángulo de observación	15
2.4	Geometría involucrada en un emisor lambertiano	16
2.5	Efectos de la reflexión e intensidad en una superficie lambertiana	17
2.6	a) Placa con acabado de maquinado, b) placa con tratamiento de superficie “sand blasting”	17
2.7	Esquema de experimentación con superficies	19
2.8	Gráfica de la tendencia de la intensidad, al variar el ángulo de incidencia y ángulo de visión	20
2.9	Esquema de experimento a diferentes ángulos de visión	21
2.10	Equipo experimental para conocer la forma de reflexión en superficies	19
2.11	Forma de reflexión de la placa de aluminio con tratamiento de sand-blasting	23
2.12	Esquema general de la pantalla lambertiana acoplada al Intercambiador de calor	24
2.13	Elementos del intercambiador de calor: a) cuerpo, b) difusor c) pantalla lambertiana	25
2.14	Esquema y fotografías del intercambiador de calor	25
2.15	Balance de energía en la pantalla lambertiana refrigerada	26
3.1	Termopares conectados a la entrada y salida de agua del	

---

	intercambiador de calor	29
3.2	Termopares tipo T colocados en la pantalla lambertiana	30
3.3	Pantalla lambertiana ya instrumentada y montada para experimentación	30
3.4	Cámara CCD montada al centro de la óptica para captura de imágenes	31
3.5	Pantalla principal del sistema de control SCADA del HSAFR, CIE-UNAM	32
3.6	Apertura del atenuador a diferentes porcentajes	32
3.7	Equipo del sistema hidráulico	33
3.8	Determinación del tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario	34
3.9	Esquema general del sistema experimental	35
4.1	Imágenes de resultados experimentales	38
4.2	Determinación del área del concentrador	40
4.3	a) Factores de sombreadamiento, b) espaciado entre espejos	41
4.4	Imagen que muestra el ruido de los alrededores	42
4.5	Eliminación directa del ruido en imágenes	42
4.6	Ruido en imágenes: a) mascara, b) imagen sin ruido exterior en valores de 0 y 1, c) imagen limpia	43
4.7	Target de referencia para calcular el tamaño del pixel	44
4.8	Flujo radiativo concentrado en $MW/m^2$ a) perfil de distribución b) contorno	46
4.9	Perfiles equivalentes de la distribución de flujo radiativo concentrado	48
4.10	Perfiles equivalentes de la distribución de flujo radiativo en soles de concentración	49
4.11	Balance de energía en la superficie	52
4.12	Esquema de la instrumentación para medir la energía reflejada por medio de un pirheliómetro	37
4.13	Pirheliómetro orientado para medir la radiación directa del blanco lambertiano	54

---

## Lista de tablas

4.1	Rango dinámico registrado en imágenes de resultados experimentales	39
4.2	Resultados del análisis de imágenes	47
4.3	Resultados de flujo radiativo concentrado a diferentes Valores de apertura del atenuador	49
4.4	Valores de concentración pico	50
4.5	Resultados de las mediciones de temperaturas en experimentación en estado estacionario	51
4.6	Pérdidas de energía totales por radiación y por calor removido por refrigeración	56



---

## Nomenclatura

Absortividad.....	$\alpha$
Área del spot de luz solar concentrada .....	$A_{spt}$
Área de superficie .....	$A$
Área efectiva de concentración .....	$A_e$
Área proyectada en superficie.....	$A_o$
Área total del concentrador .....	$A_c$
Atenuación por elemento atenuador .....	$\gamma$
Atenuación por sombreamientos .....	$\psi$
Atenuación por espaciamiento entre Espejos.....	$\omega$
Calor específico del agua (4172 J / Kg K).....	$C_p$
Calor removido (ecuación de calor útil).....	$Q_u$
Constante de Stefan-Boltzmann .....	$\sigma$
$5.669 \times 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}^4$	
Energía absorbida por la placa .....	$Q_e$
Energía radiativa concentrada .....	$Q_o$
Factor de configuración geométrica del intercambio radiativo entre la placa y la esfera celeste .....	$F_{1-2}$
Flujo másico .....	$\dot{m}$
Flujo radiante incidente .....	$E_o$
Irradiancia solar directa .....	$G_b$
Pérdidas de calor convectivas .....	$Q_c$
Pérdidas de calor por radiación.....	$Q_J$
Pérdidas de calor radiativas .....	$Q_r$
Porcentaje de atenuación .....	$\gamma$
Radiación directa.....	$(I_b)$
Radiancia de la superficie .....	$E$

---

Reflectividad.....	$\rho$
Reflectividad del concentrador .....	$\rho_2$
Reflectividad del heliostato .....	$\rho_1$
Relación de concentración promedio.....	$C_g$
Temperatura ambiente .....	$T_a$
Temperatura de entrada del fluido .....	$T_e$
Temperatura de la placa .....	$T_p$
Temperatura de salida del fluido .....	$T_s$
Transmitividad .....	$\tau$

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Energía solar y concentración solar

La energía es un recurso necesario para el desarrollo humano, en la civilización moderna hemos aprendido a cambiar la energía de una forma a otra y a utilizarla para que ésta pueda hacer trabajo por nosotros o para vivir más cómodamente. Sin embargo, el proceso de cambio de energía de una forma a otra, a menudo afectan al medio ambiente, cabe mencionar que aproximadamente el 80% de la energía primaria del mercado, actualmente está basada en los hidrocarburos, es por ello que se debe hacer un uso eficiente de los recursos energéticos, así como buscar alternativas tecnológicas que puedan satisfacer la necesidad energética de la sociedad y que minimicen las consecuencias negativas para el medio ambiente.

Dentro de las alternativas energéticas, se cuenta con el uso de las fuentes de energía renovable, que son aquellas que pueden ser reemplazadas de forma natural en un período corto de tiempo, como la solar y el viento por mencionar algunas. Utilizando las fuentes de energía renovables se pueden producir fuentes secundarias de energía como la electricidad y los combustibles.

La energía solar es la fuente de energía renovable más abundante sobre la tierra, es capaz de dar muchas veces la demanda total de energía actual. La radiación solar recibida cada 10 días sobre la Tierra equivale a todas las reservas conocidas de petróleo, carbón y gas<sup>1</sup>. Por esta razón la energía solar es la energía renovable que está siendo ya utilizada en varias partes del mundo, y que tiene un gran potencial para ser una de las fuentes básicas del suministro energético mundial en el futuro.

---

<sup>1</sup> <http://journalmex.wordpress.com/>

El panorama de la energía solar en la actualidad es claro y con ello es justificable su desarrollo tecnológico y científico, ello permitirá poder aprovechar este recurso energético haciendo más eficientes y baratos los sistemas que aprovechan esta fuente de energía y haciéndolos competitivos contra otros sistemas principalmente los que aprovechan las fuentes no renovables.

En la actualidad se podría decir que existen, para fines de aplicación práctica, tres ramas de tecnologías solares, descritas en la figura 1.1 [Winter, 1991].

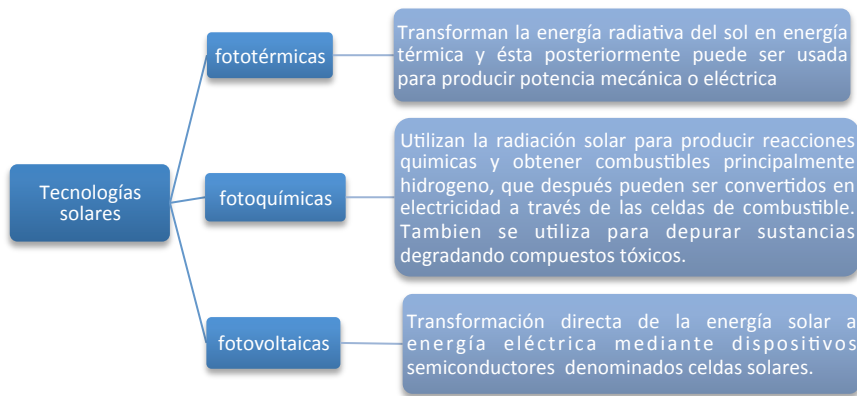


Fig. 1.1 Descripción de las tecnologías solares

Dentro de las tecnologías solares fototérmicas, se encuentran los sistemas de concentración solar, los cuales se dividen en concentración de foco puntual y concentración de foco lineal, ver figura 1.2. La concentración se puede hacer mediante espejos o lentes, se capta energía sobre toda el área del dispositivo concentrador para luego enfocar esos rayos en un área más pequeña y así aumentar la densidad de flujo radiativo. La idea de obtener un flujo radiativo concentrado, es aumentar la temperatura del receptor y aprovecharlo como fuente de calor.

A partir de los principios de la física con la segunda ley de la termodinámica, se sabe que se puede concentrar la luz solar hasta un máximo de 45 000 veces, que en términos de sistemas prácticos se reduce a unas 10 000 veces [Riveros, 2008]. Este nivel de concentración permite alcanzar temperaturas de alrededor de 3000 °C. [Energías renovables, 2010]. El caso de los Hornos Solares, que son sistemas de alta concentración, cae en esta situación.

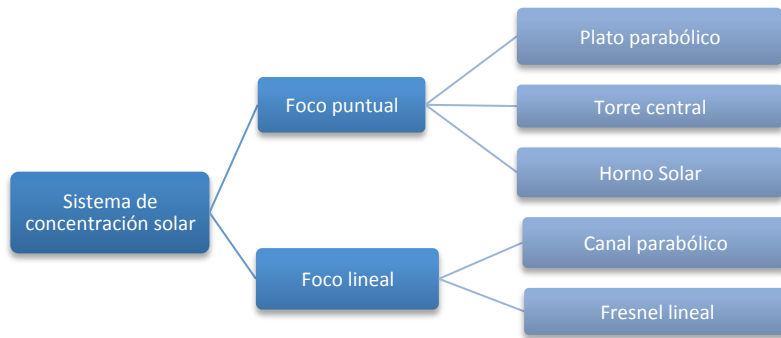


Fig. 1.2 Sistemas de concentración solar

## 1.2 Hornos Solares

En general los hornos solares son utilizados como herramienta de investigación con altos flujos radiativos en materiales, procesos y sistemas. En este contexto, el horno solar como herramienta de investigación, tiene como propósito principal generar conocimiento científico y tecnológico.

El desarrollo e investigación tecnológica referente a la concentración solar demanda contar con las instalaciones adecuadas, las herramientas y equipos necesarios. Por dichas razones, se toma el concepto de Horno Solar (HS) como el instrumento de investigación ideal para el estudio de flujos radiativos concentrados. A la fecha, en las instalaciones del CIE-UNAM, se ha instalado el primer horno solar de México para fines de investigación de tecnologías de concentración solar.

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

El nivel de potencia del Horno es ajustado por un tercer elemento llamado atenuador, el cual permite o no el paso de la radiación solar del heliostato al concentrador. Este atenuador trabaja como una persiana, y está localizado entre el heliostato y el concentrador, la figura 1.3 muestra los elementos básicos de un Horno Solar.

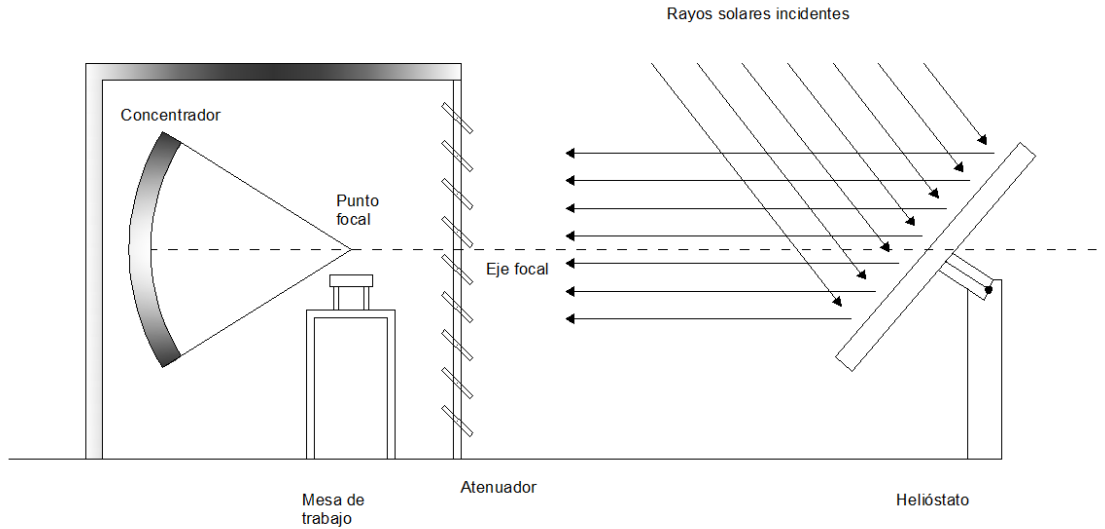


Fig.1.3 Componentes básicas de un horno solar, en configuración óptica "sobre el eje".

En los Hornos Solares se pueden distinguir dos configuraciones ópticas, de acuerdo a la relación de posición de los sistemas ópticos que lo forman. En el caso en el que la posición relativa de los sistemas heliostatos-concentrador está orientada de norte a sur y el punto focal está en línea con el sistema heliostatos-concentrador, se le llama "en el eje" o "sobre el eje", este eje corresponde con el eje principal del concentrador. La segunda configuración óptica de los Hornos Solares es "fuera de eje", la cual ofrece la ventaja de que el área de trabajo no causa pérdidas de energía por sombreamiento en el concentrador [Pitz Paal, 2007], la figura 1.4 muestra un esquema de configuración óptica fuera de eje.

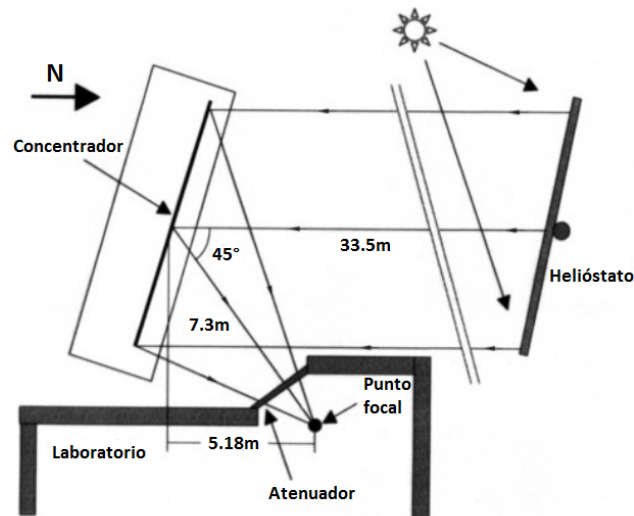


Fig. 1.4 Esquema del Horno Solar DLR en Colonia, Alemania, configuración óptica fuera del eje.

De los hornos solares que existen en el mundo, se pueden destacar los siguientes:

- El Horno Solar de Odeillo en Francia del Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS) de 1 Mega Watt térmicos.
- El Horno Solar de la Academia de las Ciencias de la Republica en Uzbekistan de 1000 Kilo Watt térmicos.
- El Horno Solar del, “Paul Scherrer Institute” (PSI) en Suiza de aproximadamente 25 – 40 Kilo Watt térmicos.
- El Horno Solar del “National Renewable Energies Laboratory” (NREL) en Colorado USA de 10 Kilo Watt.
- El Horno Solar del Centro de Investigaciones Energeticas Medio Ambientales y Tecnologicas (CIEMAT) ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA), España de 45 Kilo Watt.
- El Horno Solar del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en Colonia, Alemania de 20 Kilo Watt.

### **1.3 Descripción del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR) del CIE-UNAM**

El Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR) del CIE-UNAM tiene una configuración de tipo “sobre el eje”, aunque este diseño sufre de perdidas por sombreadamiento en el sistema de concentración, también disminuye los errores en la óptica de concentración [Riveros et. al., 2010]. El HSAFR cuenta con un edificio que tiene un cuarto de control equipado con ordenadores, sistemas de adquisición de datos, monitores de video para la observación de experimentos, así como dispositivos automáticos para los controles del helióstato, atenuador, mesa de ensayos, e instrumentos para monitorear las variables involucradas en los experimentos llevados a cabo en la zona focal. En la figura 1.5 se presenta una fotografía del HSAFR.

Con el diseño óptico del HSAFR, se espera que genere una potencia térmica de 30 KW, con flujos radiativos pico por arriba de los 10 000 soles de concentración. Para ello se realizó una modelación de trazado de rayos para determinar la óptica óptima del concentrador y del helióstato. [Riveros et. al., 2010].

A continuación se describen los elementos principales del HSAFR del CIE UNAM.

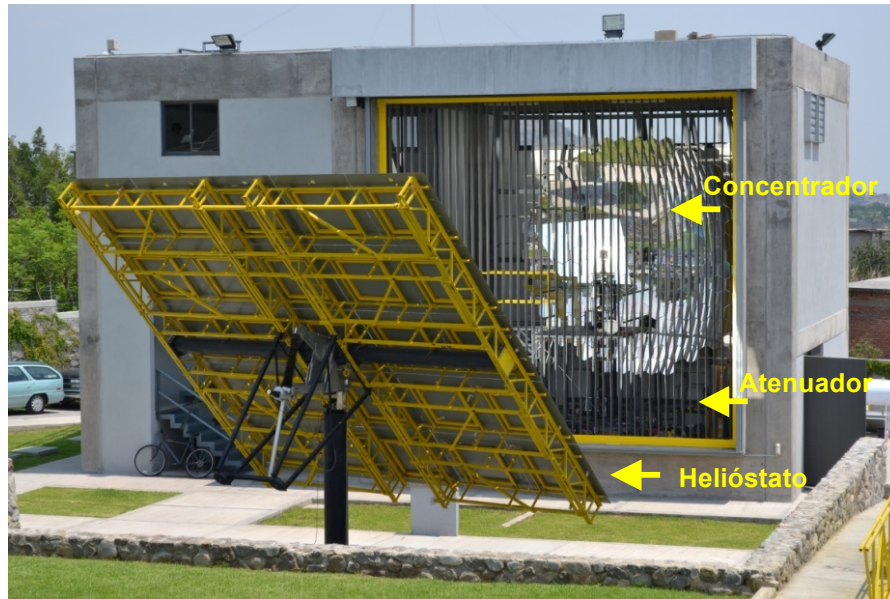
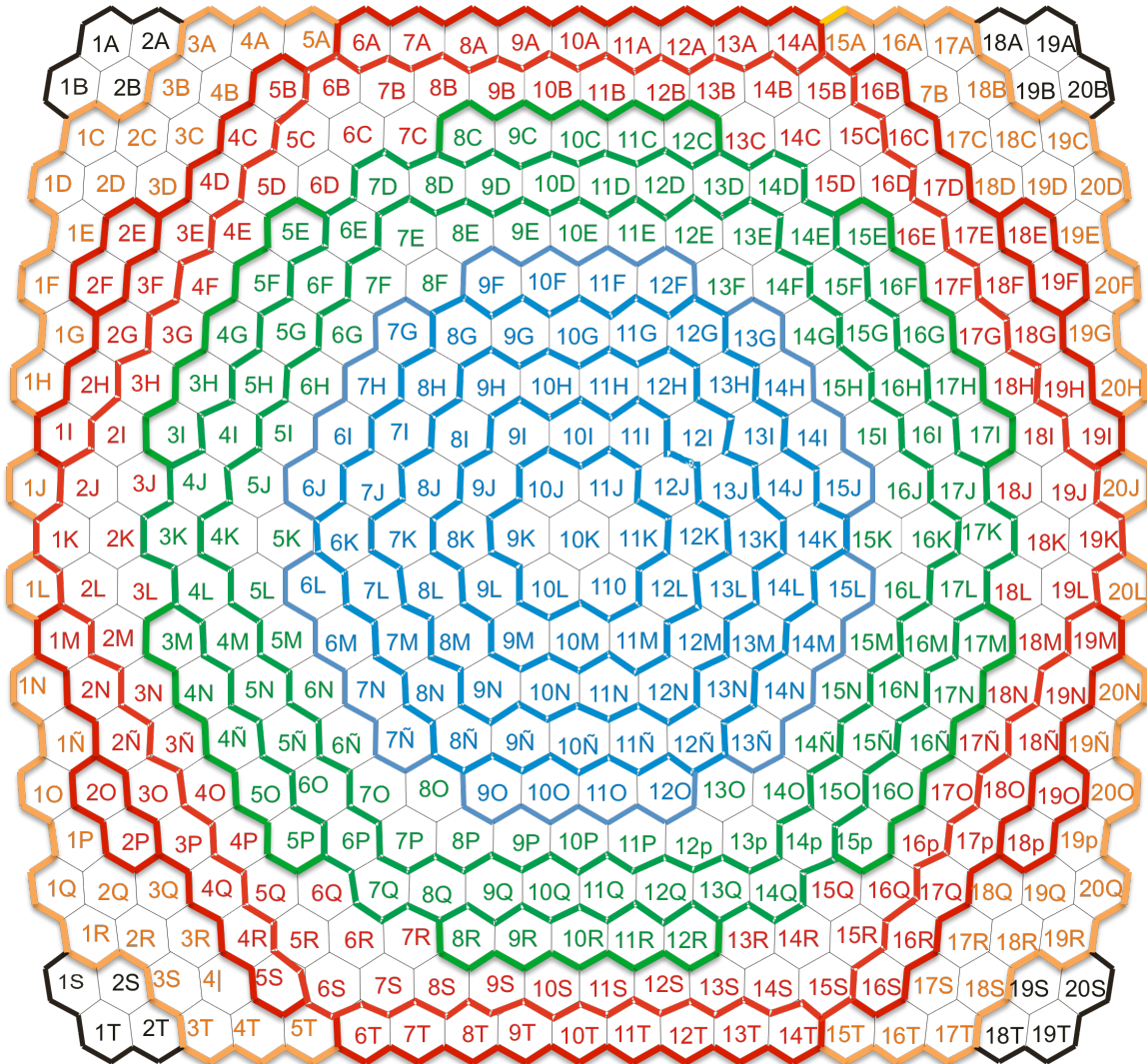


Fig. 1.5. Horno Solar de Alto Flujo Radiativo, en el CIE-UNAM, Temixco Morelos.

### **Concentrador**

El concentrador del HSAFR, es un concentrador facetado y consta de un arreglo en forma de panel de 409 espejos (o facetas) de primera superficie con aluminio depositado por evaporación. Los espejos tienen forma hexagonal con 40 cm de diámetro y superficie esférica. El arreglo de los espejos está dividido en cinco ópticas diferentes los cuales están montados sobre una estructura esférica de dimensiones 6.72 m X 6.2 m. Cada faceta se puede orientar individualmente para corregir errores de aberración esférica. La distancia focal del sistema concentrador es de 3.68 m, [Riveros et. al., 2010]. La figura 1.6 muestra el arreglo del concentrador facetado y cada color representa en grupo particular de facetas de acuerdo a su distancia focal.





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

Fig. 1.6 Distribución de facetas y diseño final del concentrador del HSAFR.

Cabe mencionar que para la realización de los experimentos y los resultados que se presentan en esta tesis, se trabajó solo con dos grupos de ópticas del HSAFR correspondientes a los grupos A y B, debido a que son pruebas realizadas en la primera etapa de construcción del HSAFR, en la fig. 1.7 se muestra una fotografía y el esquema de los grupos de espejos antes mencionados.

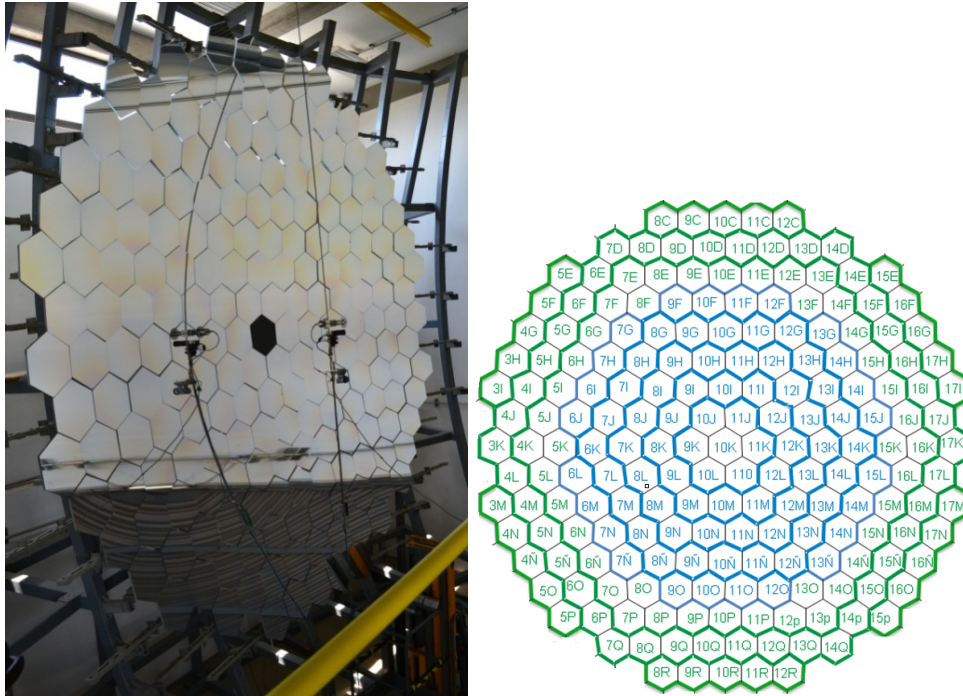


Fig. 1.7 Fotografía y diagrama del concentrador del HSAFR con los grupos de facetas A y B montados.

### **Atenuador**

El atenuador consta de 45 láminas de acero inoxidable sandblasteado colocadas de manera vertical en un marco de 6.29 m X 6.7 m. El atenuador controla la apertura de las persianas y con esto se regula la potencia del HSAFR en una escala del 0% al 100%, donde un 0% indica un cierre total del atenuador, un 100% indica que las persianas se encuentran perpendiculares al marco, en la figura 1.8 se muestra una fotografía del atenuador visto desde el interior del horno solar.

Otra función del dispositivo atenuador es la de brindar seguridad durante la experimentación, es decir si se llegaron a presentar imprevistos durante un experimento, el atenuador cuenta con un sistema de paro de emergencia.



Fig. 1.8 Atenuador visto desde el interior del HSAFR.

### **Helióstato**

Se instaló un helióstato de prueba de 36 m<sup>2</sup>, denominado H36. El cual permitió operar el HSAFR con sus dos primeras ópticas (grupos A y B), las cuales representan aproximadamente el 50% de la óptica total del instrumento.

El H36 se compone de 25 facetas de 1.2 x 1.2 m con 6 mm de espesor. Dichas facetas para el caso del HSAFR se alinean para formar un solo plano, con ello se garantiza que los rayos reflejados se introducen al recinto del concentrador de forma paralela al eje focal, en la figura 1.9 se muestra el H36.

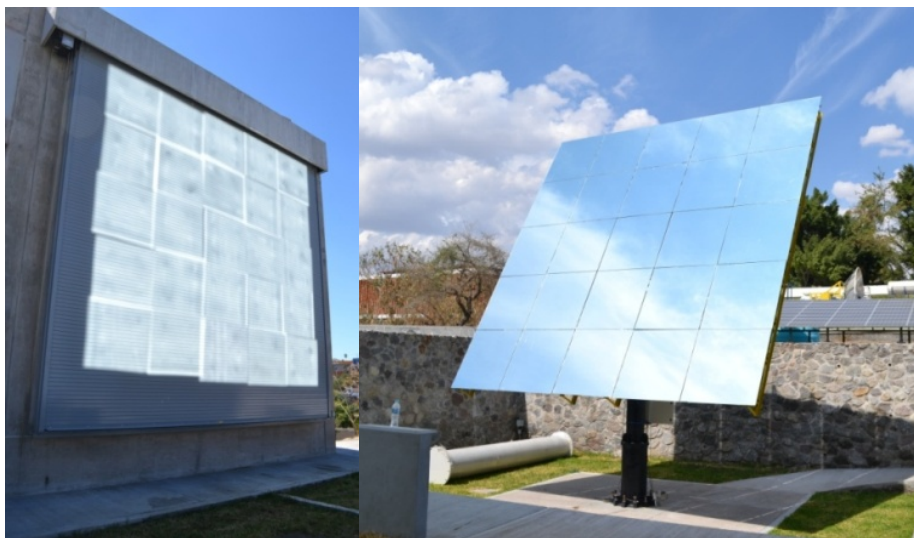


Fig. 1.9 Heliostato H36, utilizado para operar el HSAFR con sus dos primeras ópticas; grupos A y B de espejos.

### **Mesa de trabajo con movimiento en 3D**

El HSAFR tiene una mesa de trabajo que tiene desplazamiento en tres direcciones, (ejes, X, Y, Z). Sobre esta mesa se montan los dispositivos experimentales como receptores o reactores químicos. La mesa tiene la capacidad de proporcionar un movimiento con precisión de una décima de milímetro en cualquiera de las tres direcciones. Con esto se logra tener el control en el posicionamiento de los receptores/reactores en la zona focal del HSAFR. La figura 1.10 presenta fotografías de la mesa con movimiento tridimensional con capacidad de carga de 250 Kg.



Fig. 1.10 Mesa de trabajo con movimiento en tres ejes, HSAFR CIE-UNAM.

### **1.4 Potencia solar concentrada**

Dentro de la caracterización térmica del HSAFR se encuentra la determinación de la potencia de concentración. Existen diferentes métodos que permiten determinar dicha potencia de concentración.

Un primer método, teórico, consiste en evaluar la cantidad de radiación recibida con base en relaciones geométricas entre los distintos componentes del HSAFR [Cruz Sesma, 1997].

Un segundo método, también teórico, conocido como trazado de rayos el cual consiste en simular el comportamiento de los rayos solares al incidir en el sistema óptico del concentrador utilizando las leyes de reflexión y refracción.

Un tercer método es experimental y es conocido como calorimetría de agua fría [Cruz Sesma, 1997], [Estrada, et. al., 2007]. El receptor que se utiliza tiene como función recibir sobre su superficie el flujo radiativo concentrado y transferir el calor absorbido a un fluido para medir el calor. Este método implica conocer las propiedades termofísicas y ópticas del receptor. Los receptores utilizados pueden ser calorímetros de placa plana [Estrada et. al, 1995] o calorímetros de cavidad cónica [Pérez Rábago, et. al., 2006].

Un cuarto método también experimental, consiste en capturar la imagen de la luz solar concentrada en una superficie lambertiana, a través de una cámara CCD. El análisis de estas imágenes permite determinar la forma de la distribución de radiación producida por el concentrador. Una superficie lambertiana es aquella que refleja energía uniformemente en todas direcciones, por tanto la radiación es constante en cualquier ángulo de reflexión.

## **Justificación**

El desarrollo científico y tecnológico de las tecnologías termosolares ya es una realidad en otros países, sin embargo en nuestro país da paso a una nueva línea de investigación. En el caso particular de las tecnologías de concentración solar, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través del Centro de Investigación en Energía (CIE-UNAM) y en colaboración con distintas instituciones de estudios superiores tanto nacionales como internacionales, han impulsado la creación de un Laboratorio Nacional de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS), el cual se divide en tres sub proyectos: el primero, el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HSAFR), el segundo una Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR) y el tercero un Campo de Prueba de Heliostatos (CPH).

A la fecha se ha instalado el HSAFR en las instalaciones del CIE-UNAM, sin embargo el presente trabajo se realizó en la primera etapa de construcción de dichas instalaciones, la cual corresponde a trabajar con las dos primeras ópticas de espejos del sistema concentrador y con un heliostato de prueba de 36 m<sup>2</sup>. La finalidad de éste trabajo es dar una primera aproximación en la caracterización óptica y térmica del HSAFR evaluando de forma experimental la potencia solar concentrada mediante el método de análisis de imágenes. Para esto se construyó y operó un blanco lambertiano refrigerado.

El blanco lambertiano que actúa como receptor del Horno Solar, consiste de un intercambiador de calor de placa plana con flujo radial de agua para refrigerar la superficie lambertiana que recibirá la radiación solar concentrada. Una vez construido el blanco lambertiano, se instala en la zona focal del horno solar y se opera para la toma de imágenes que permite determinar los perfiles de radiación solar concentrada en la zona focal del HSAFR.

### **1.5 Objetivo.**

El objetivo general de este trabajo es la determinación de la potencia de concentración del HSAFR con las ópticas A y B de espejos, a través del diseño y la construcción de un blanco lambertiano para la determinación de las distribuciones de flujo radiativo concentrado en la zona focal del Horno Solar.

Así, los objetivos particulares del presente trabajo son:

1. El diseño térmico y mecánico del blanco lambertiano.
2. La construcción del blanco lambertiano
3. La puesta en operación del blanco lambertiano
4. La obtención de perfiles de distribución de radiación solar concentrada y su análisis para la determinación de la potencia de concentración.

# Capítulo 2

## Descripción y preparación del blanco Lambertiano

En el presente capítulo se hace la descripción del blanco lambertiano, comenzando por algunas propiedades generales de las superficies así como específicamente de las lambertianas. Se describe el procedimiento utilizado para caracterizar la superficie lambertiana utilizada y se presentan los resultados obtenidos. Otro punto tratado en este capítulo, es referente al diseño mecánico del blanco lambertiano refrigerado, se describen los elementos y el funcionamiento del intercambiador de calor de placa plana. Por último se presenta el balance de energía en la superficie del blanco lambertiano.

### 2.1 Propiedades de superficie

Para describir el blanco lambertiano refrigerado, es conveniente comenzar por algunas propiedades de superficie. La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. La radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones). [Holmann, 1998].

Todos los objetos, independientemente de la radiación que emitan van a recibir radiación emitida por otros cuerpos, fundamentalmente del sol, que en función del tipo de objeto que estemos considerando, puede seguir tres caminos:

- reflejarse (la radiación es reenviada de vuelta al espacio)
- absorberse (la radiación pasa a incrementar la energía del objeto)
- transmitirse (la radiación se transmite a través del cuerpo).

La fracción de energía que se refleja se denomina reflectividad ( $\rho$ ); la fracción de energía que se absorbe se denomina absorptividad ( $\alpha$ ); la fracción de energía que se transmite se denomina transmisividad ( $\tau$ ).

En la figura 2.1 se esquematiza lo descrito anteriormente y se puede observar que la parte reflejada de la irradiancia incidente más la parte emitida por el cuerpo, se denomina radiosidad [Incropera, 1999].

Siempre se cumple que:  $\rho + \alpha + \tau = 1$

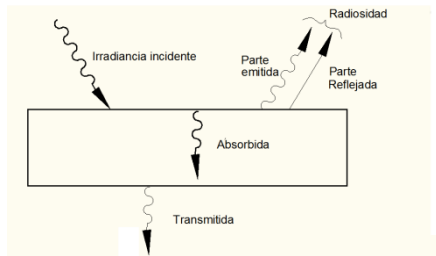


Fig. 2.1 Efectos de la radiación incidente

Las superficies se pueden idealizar como difusas o especulares, de acuerdo con la forma en que reflejan la radiación. La reflexión difusa ocurre si, sin importar la dirección de la radiación incidente, la intensidad de la radiación reflejada es independiente del ángulo de reflexión. Por el contrario, si toda la reflexión es en la dirección  $\theta_2$ , que es igual al ángulo incidente  $\theta_1$  se dice que ocurre la reflexión especular, ver figura 2.2, [Incropera, 1999].

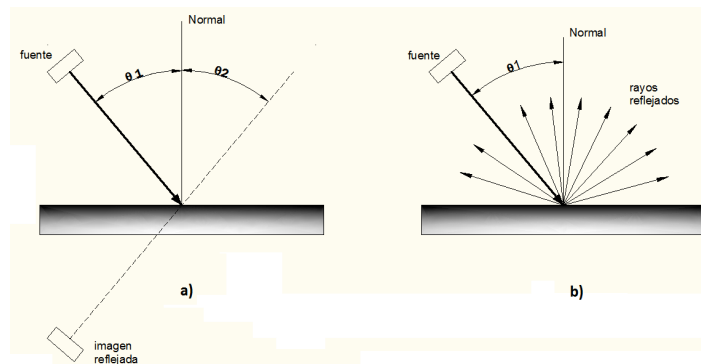


Fig. 2.2 Efectos de la reflexión en superficies, a) reflexión especular, b) reflexión difusa.



## 2.2 Descripción de una superficie lambertiana

Una superficie lambertiana se puede considerar como aquella que ofrece una reflexión difusa, es decir que independientemente del ángulo de incidencia de la radiación, la reflexión no tiene una dirección preferencial. Para cualquier superficie, al observarla a diferentes ángulos con respecto de su normal se aprecia un área de superficie observada, a la cual denominaremos área proyectada, la cual varía inversamente proporcional en función del coseno del ángulo de observación, ver figura 2.3.

El efecto del área proyectada ocasiona que en una superficie lambertiana, la intensidad de la radiación reflejada varíe en función del coseno del ángulo de incidencia.

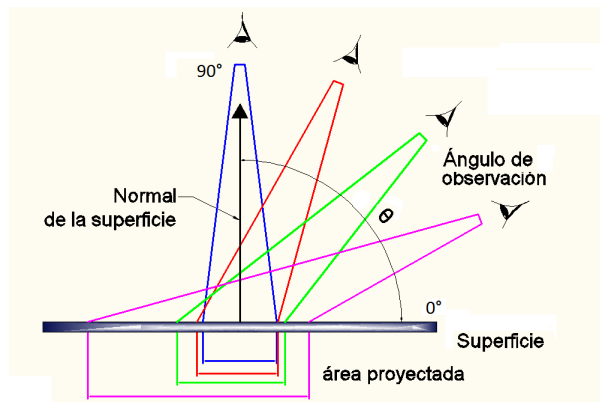


Fig.2.3 Efecto de la variación del área proyectada en una superficie respecto al ángulo de observación.

Se denomina emisor o reflector lambertiano, a cualquier superficie cuya radiancia varía en una función coseno respecto al ángulo de observación a la normal a la superficie, siendo la misma para todas direcciones, puesto que verifica la Ley de Lambert del Coseno: la irradiancia desde un elemento cualquiera de área sobre la superficie varía como el coseno del ángulo  $\theta$  entre la dirección considerada y la dirección normal a la superficie, ecuación 2.1 [Gómez, 2006].

$$E(\theta) = E_o \cos \theta \quad 2.1$$

Considerando un flujo luminoso uniforme y colimado, que incide sobre una superficie plana y se distribuye sobre ésta, según el ángulo de incidencia  $\theta$  como se muestra en la figura 2.4; el rectángulo de longitud  $L$  y ancho  $W$  recibe el flujo radiante  $E_o$ , cuya dirección de incidencia forma un ángulo  $\theta$  con la normal de la superficie.

Si se considera al área proyectada  $A_o$  que tiene un ángulo  $\theta$  como una ventana por la cual pasa la irradiancia  $E_o$ . Teniendo en cuenta que el flujo luminoso que llega al área  $A$ , es el mismo que el que atraviesa por  $A_o$ :

Entonces se tiene:

$$E A = E_o A_o \quad 2.2$$

Se observa que el área proyectada  $A_o$ , varía en función coseno

$$A_o = A \cos \theta \quad 2.3$$

De las ecuaciones 2.2 y 2.3, se tiene la ecuación 2.4 de la ley de Lambert o del coseno.

$$E = E_o \cos \theta \quad 2.4$$

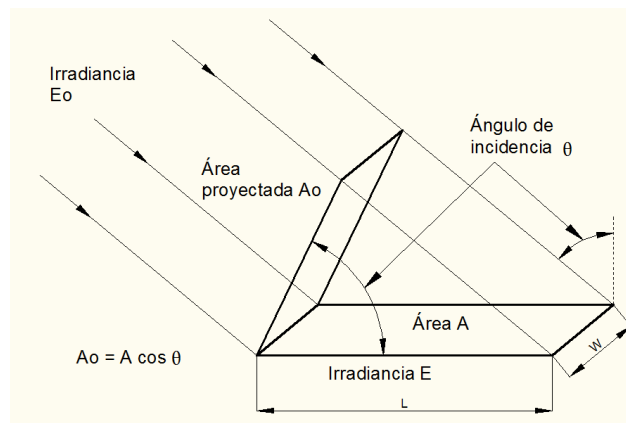


Fig. 2.4 Geometría involucrada en un emisor lambertiano.

Resumiendo, en el comportamiento de una superficie lambertiana, se involucran principalmente dos cosas, la radiación incidente y la radiación reflejada; esta última es la apreciada por el observador. La forma en la que es reflejada la radiación es hemisférica, no tiene direcciones preferenciales y es independiente del ángulo con que incide la energía radiante sobre la superficie lambertiana. Sin embargo, si varía el ángulo de incidencia de la radiación respecto a la normal de la superficie, entonces la intensidad de radiación que refleja la superficie varía en función del coseno del ángulo de incidencia; si el ángulo de incidencia se acerca a la normal de la superficie, entonces la intensidad se aproxima a su máximo, caso contrario si la radiación incidente se aleja de la normal, se aproxima a su valor mínimo que es cero.

En conclusión, el ángulo de incidencia no afecta en la forma de reflexión, pero sí la intensidad.

En el ejemplo de la figura 2.5, para un ángulo de incidencia  $\theta_1$  de la radiación, la intensidad que ve el observador es la misma para cualquier ángulo de observación  $\beta_1$ ; para el caso del ángulo de incidencia  $\theta_2$ , el observador ve la misma intensidad en cualquier ángulo de observación  $\beta_1$ . Sin embargo la intensidad que aprecia el observador con una incidencia  $\theta_2$  es mayor que la intensidad apreciada con una incidencia  $\theta_1$ .

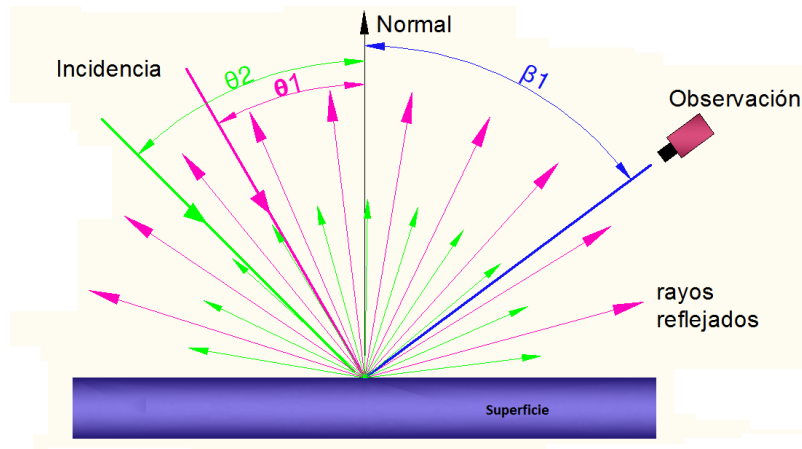


Fig.2.5 Efectos de la reflexión e intensidad en una superficie lambertiana

### 2.3 Preparación de la superficie lambertiana

Para la toma de imágenes de la luz solar concentrada en el foco, se propuso una placa de aluminio y partiendo del supuesto de que una superficie difusa uniforme se aproxima a una superficie lambertiana, se sometió la placa de aluminio a un proceso de acabado superficial llamado “*sand blasting*”, éste terminado de superficie consiste en proyectar un chorro de arena a presión sobre la superficie, el acabado de las superficies tratadas quedan uniformes y limpias de cualquier residuo de pintura, grasa u óxido.

El terminado superficial de *sand blasting* sobre la placa, ayuda a difuminar las marcas de maquinado de la placa para obtener una superficie uniforme. En la figura 2.6, se muestran las superficies, a) la superficie con el acabado del maquinado, b) la superficie después del procedimiento de *sand blasting*, con la cual se obtiene una superficie opaca uniforme, característica que se espera del blanco lambertiano.

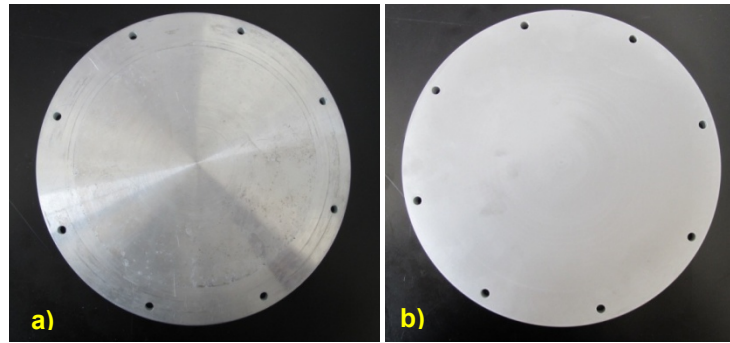


Fig. 2.6 a) Placa con acabado de maquinado, b) placa con tratamiento de superficie “sand blasting”.

Una vez sometida la placa de aluminio al tratamiento de *sand blasting*, se diseñó y desarrolló una serie de experimentos para conocer el comportamiento de dicha superficie y compararlo con los valores teóricos de la superficie lambertiana ideal. La experimentación también involucra conocer el comportamiento de al menos una superficie real (no necesariamente ideal para ser utilizada como blanco lambertiano) para determinar que el comportamiento lambertiano no es únicamente teórico.

### **Variación de la intensidad de la radiación reflejada por la superficie lambertiana**

La primer parte de la experimentación, consiste en comprobar cómo varía la intensidad de la radiación reflejada por la superficie lambertiana, cuando se hace variar el ángulo de la radiación incidente. Para lo cual se desarrollo el siguiente experimento.

Se utilizó la luz del sol como fuente de iluminación para la experimentación.

Para conocer el ángulo de la radiación incidente, se utilizó un tripie que tiene una base giratoria graduada angularmente de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , sobre la cual se colocaron las superficies a medir en el experimento.

Considerando que una hoja de papel blanco se aproxima a una superficie lambertiana y del hecho de que las superficies que se probaron son homogéneas, se optó por experimentar con una hoja de papel blanco y la placa de aluminio con el acabado superficial de *sand blasting*.

Para medir la intensidad de luz reflejada por las superficies, a diferentes posiciones angulares de la radiación incidente, se utilizó una cámara CCD montada sobre un segundo tripie, conectada a una computadora por medio de la cual se realizó la captura de imágenes. La cámara es el instrumento que permitirá conocer por medio de capturas de imágenes fotográficas los valores de intensidad de luz reflejada por las superficies en valores de escala de grises.

El procedimiento que se realizó para medir el comportamiento de cada superficie, se describe a continuación:

Se colocó la superficie a medir sobre la base giratoria del tripie. La superficie a medir, se alineó de manera perpendicular a la fuente luminosa (el sol). La cámara CCD se orientó de manera perpendicular a la superficie, una vez orientada la cámara se mantuvo fija en su posición, en la figura 2.7 se muestra un esquema general del experimento realizado.

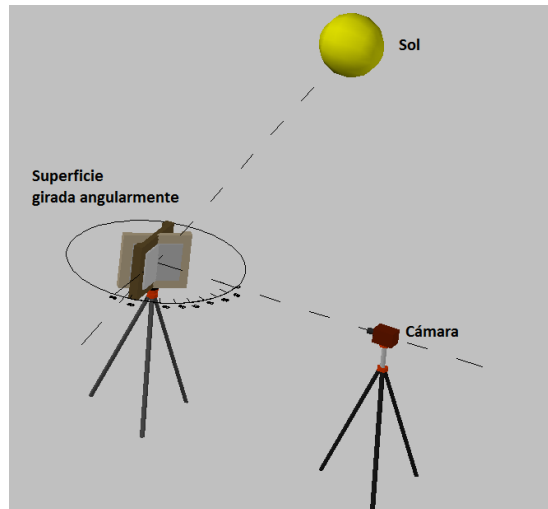


Fig. 2.7 Esquema de experimentación con superficies.

Una vez orientados y colocados los elementos involucrados, y considerando fija a la fuente luminosa se hizo girar la superficie en un rango de  $0^\circ$  a  $80^\circ$  con incrementos de  $10^\circ$ . La toma de imágenes para cada superficie tomó un tiempo de aproximadamente 1.5 minutos, razón por la cual se considera despreciable el movimiento en la posición del sol y se considera una fuente luminosa fija. Al girar angularmente a la superficie de prueba respecto a la posición fija de la fuente luminosa se hace variar el ángulo de la radiación incidente.

De forma similar el mantener fija a la cámara CCD, y hacer girar la superficie se está variando de igual forma el ángulo de observación, sin embargo para una superficie lambertiana es indistinto el ángulo de observación, puesto que siempre percibirá la misma intensidad en cualquier dirección.

Las imágenes tomadas de cada superficie, se analizaron en una rutina de Matlab<sup>®</sup>, en la cual de la matriz total de datos de la imagen, se define un área constante para todas las imágenes y se promedian los valores de intensidades de grises, con la cual se obtienen los datos presentados en la gráfica de la figura 2.8.

La gráfica muestra los valores normalizados de las intensidades registradas y las tendencias de las superficies, comparadas con la tendencia ideal. Se nota que la tendencia de la hoja de papel se aproxima a la ideal (coseno). Sin embargo aunque la tendencia de la placa de aluminio no corresponde a ninguna de las dos anteriores, se puede considerar que no se aleja mucho de la tendencia ideal.

Dicho comportamiento de la placa de aluminio hace notar que la forma de reflexión de la placa, tiene direcciones preferenciales, para poder determinar dicha distribución se realizó una segunda prueba a las superficies.

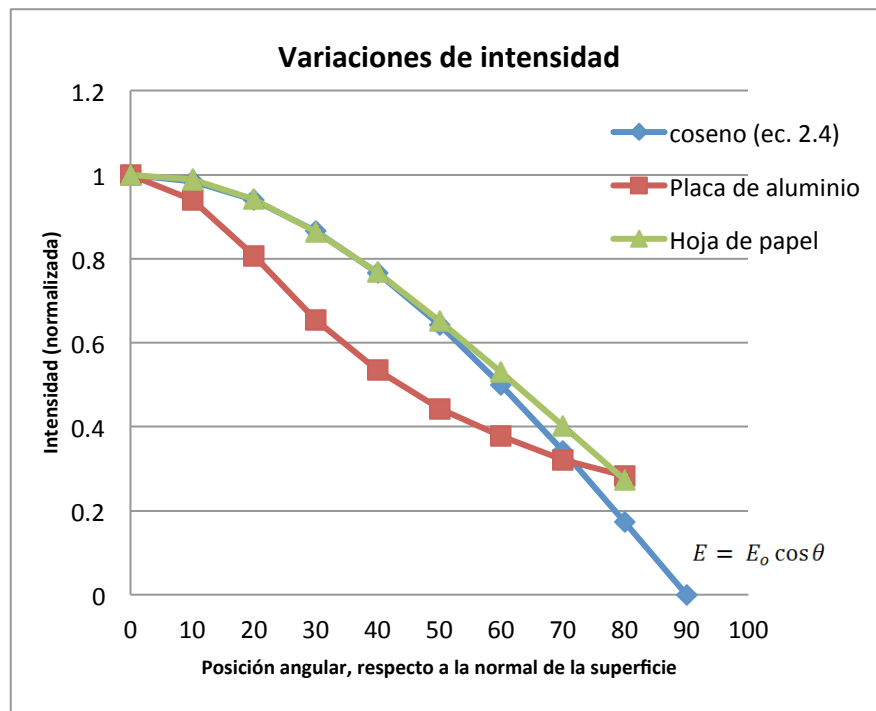


Fig. 2.8 Gráfica de la tendencia de la intensidad, al variar el ángulo de incidencia y ángulo de visión.

### **Forma en que es reflejada la radiación por las superficies**

La segunda prueba que se realizó es para determinar la forma en la que reflejan las superficies, es decir para conocer si la intensidad de luz registrada por el observador es la misma en cualquier ángulo de observación. Para esto, la experimentación consta nuevamente de utilizar al sol como fuente luminosa y alinear perpendicularmente la superficie que se va a probar con la fuente.

A diferencia del experimento descrito para medir la variación en la intensidad de luz reflejada, en esta ocasión, el objetivo es determinar la forma en que es reflejada la

luz por la superficie, para lo cual a un ángulo de incidencia de la radiación conocido, se toman imágenes con la cámara CCD a diferentes ángulos de visión, a dicho procedimiento lo denominaremos barrido de imágenes del observador, en la figura 2.9 se muestra el esquema general del experimento, donde se representan algunas de las diferentes posiciones del ángulo de visión.

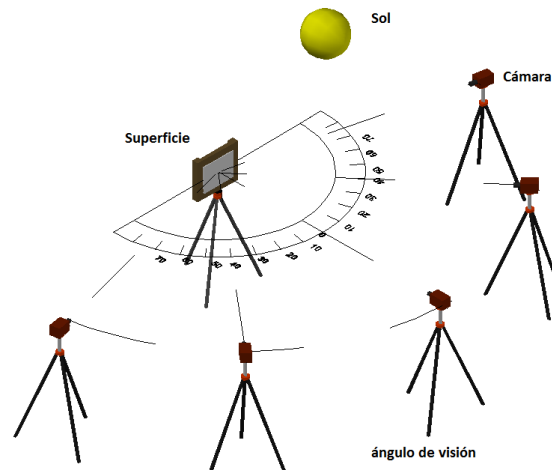


Fig. 2.9 Esquema de experimento a diferentes ángulos de visión.

Los elementos involucrados en este experimento, fueron básicamente los mismos que en el experimento anterior, con las modificaciones que se describen a continuación.

Para lograr hacer el barrido a diferentes posiciones angulares, se adaptó a un tripie una base giratoria graduada angularmente con la cual se conocía el ángulo de incidencia de la superficie. Al mismo tripie, se le acondicionó una solera de aluminio la cual giraba de manera independiente a la base de la placa, para conocer el ángulo de observación, la longitud de la solera sirvió para mantener la misma distancia de la cámara a la placa para no perder el enfoque. En la figura 2.10 se muestran fotografías del equipo experimental utilizado.

El procedimiento con el que se realizó la experimentación se describe a continuación:

El experimento consiste en hacer un barrido para la captura de imágenes a distintos ángulos de observación con la cámara CCD sobre la superficie, idealmente el barrido es conveniente realizarlo de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ , tomando como  $0^\circ$  la normal de la superficie, sin embargo se determinó hacerlo en un rango de  $-70^\circ$  a  $70^\circ$  respecto a la normal de la superficie tomando imágenes cada  $10^\circ$  debido a que a ángulos mayores, la cámara registra intensidades luminosas de los alrededores de la placa.

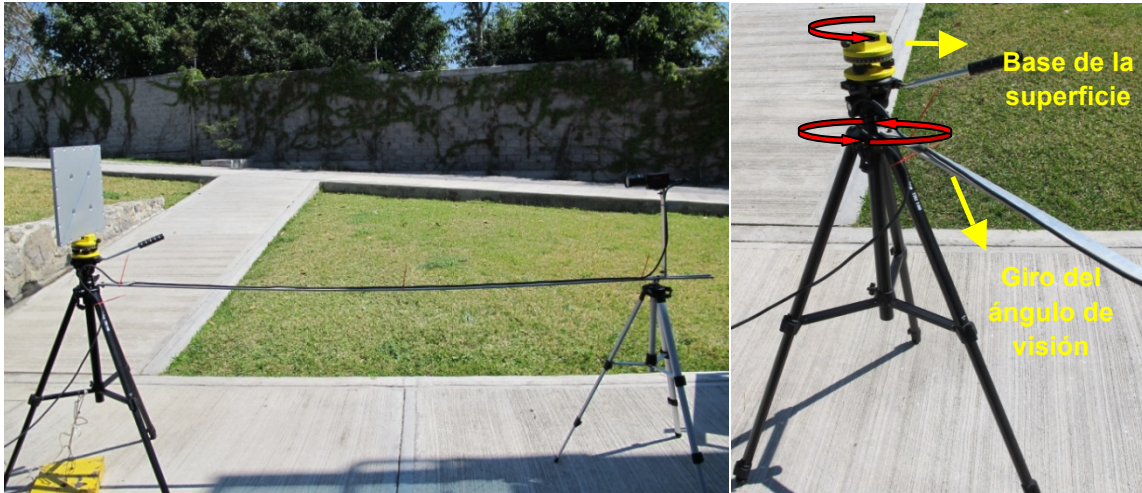


Fig. 2.10 Equipo experimental para conocer la forma de reflexión en superficies.

El barrido de imágenes del ángulo de visión, se realizó a distintas posiciones del ángulo de incidencia el cual se hizo variar de  $0^\circ$  a  $50^\circ$  respecto de la normal. Este rango angular para el ángulo de incidencia sobre la superficie, se fijó tomando en cuenta que el blanco lambertiano que operará en el HSAFR, recibirá incidencia de luz solar concentrada a un ángulo máximo de  $60^\circ$  respecto al eje focal, y para las ópticas (grupos A y B) utilizadas en este trabajo el ángulo mayor de incidencia es  $30^\circ$  respecto al eje focal, el cual queda dentro del rango de  $0^\circ$  a  $50^\circ$ .

Las imágenes tomadas por la cámara se procesaron y los resultados que determinan la distribución de la luz reflejada por la placa de aluminio se presentan en las gráficas de la figura 2.11. En la figura se muestran seis gráficas polares, cada una corresponde a un ángulo de radiación incidente distinto. La tendencia que aparece en cada gráfica, es la intensidad normalizada que se determinó del análisis de imágenes.

En los distintos gráficos se observa la distribución en que la luz es reflejada por la superficie de aluminio sandblastado, es prácticamente la misma para todas las gráficas. Como ya se había determinado con en el primer experimento, la placa con *sand-blasting* no tiene un comportamiento totalmente lambertiano en la variación de intensidad reflejada, sin embargo con este segundo experimento se determinó la forma en que refleja la superficie, aunque la reflexión no es hemisférica uniforme; se puede considerar de tendencia hemisférica y ahora se conocen las direcciones preferenciales de la reflexión de la radiación, que de acuerdo a las gráficas están entre los ángulos  $120^\circ$  y  $100^\circ$ .

De los resultados experimentales obtenidos y para fines prácticos del presente trabajo, se puede considerar a la superficie de aluminio utilizada, como una superficie lambertiana.



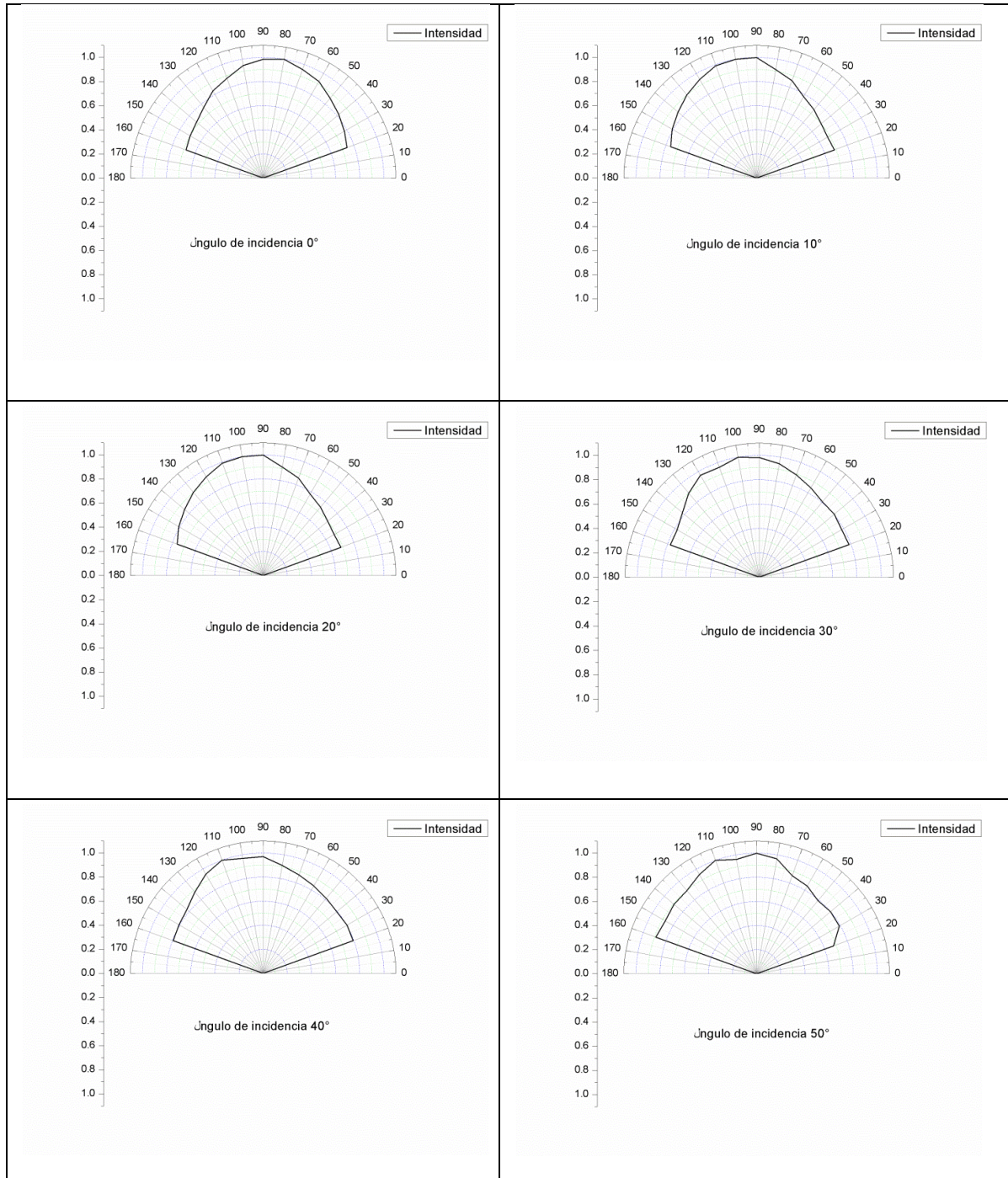


Fig. 2.11 Forma de reflexión de la placa de aluminio con tratamiento de sand-blasting

## 2.4 El calorímetro de placa plana

Siguiendo los requerimientos de conservación de energía con base en los estudios realizados por [Estrada et. al., 1995] y [Cruz Sesma, 1997], se diseñó un intercambiador de calor de placa plana el cual consiste básicamente en dos platos planos circulares con un fluido térmico que entra a través de la parte central del primer plato y se distribuye radialmente entre ambos.

En este caso la pantalla lambertiana es la que recibe la radiación solar concentrada, y el intercambiador de calor de placa plana tiene la función principal de refrigerarla para evitar que los flujos de radiación que inciden en la placa la puedan llegar a fundir, ver fig. 2.12.

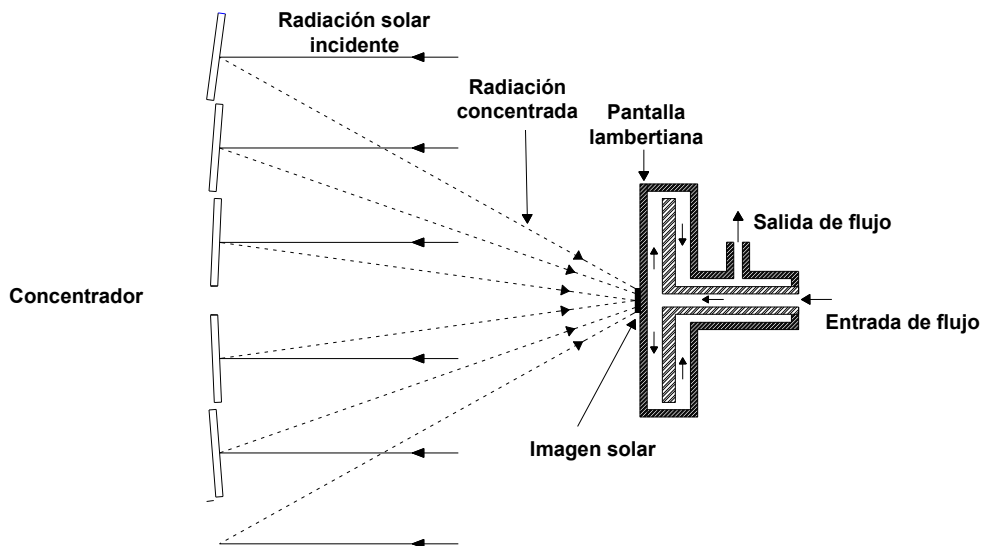


Fig. 2.12 Esquema general de la pantalla lambertiana acoplada al intercambiador de calor

Como se muestra en la figura 2.13, el intercambiador de calor consta básicamente de tres elementos: el cuerpo, el difusor ó distribuidor y la placa receptora en este caso la pantalla con superficie lambertiana.

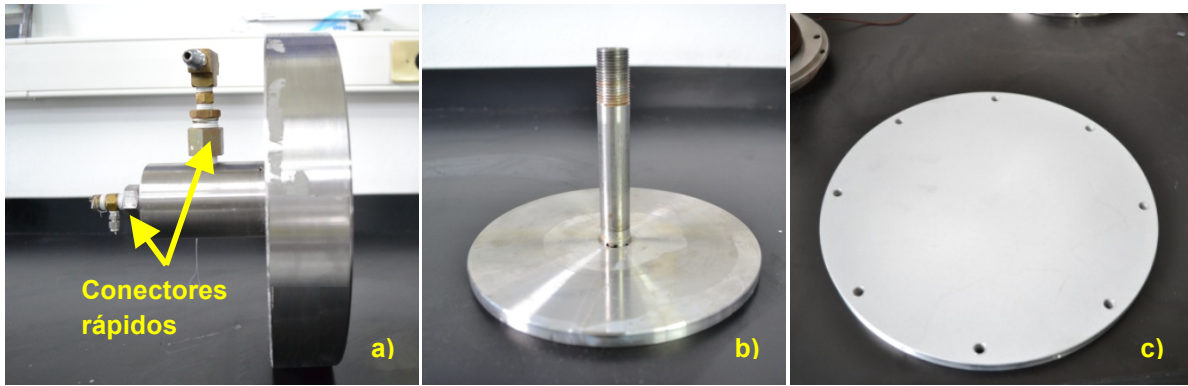


Fig. 2.13 Elementos del intercambiador de calor: a) cuerpo, b) difusor, c) pantalla lambertiana.

El cuerpo es el elemento principal donde se ensamblan los otros componentes. Tiene las conexiones rápidas para la entrada y salida del fluido. El difusor es una de las placas planas en las cuales el flujo de entrada de agua se distribuye radialmente. La pantalla lambertiana, es la placa expuesta a la radiación solar incidente, esta cuenta con orificios a los alrededores, para poder introducir termopares para tener mediciones de temperatura en la placa.

En la figura 2.14 se muestran los elementos principales del intercambiador de calor en un dibujo a computadora y fotografías del mismo (consultar apéndice A).

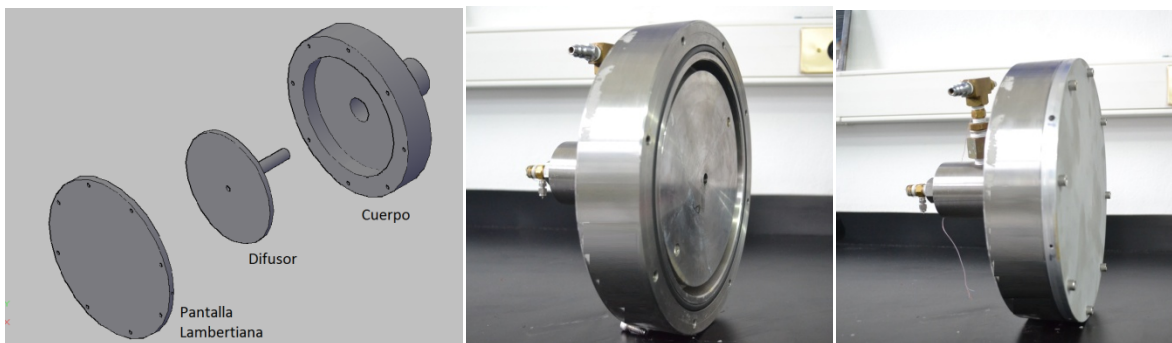


Fig. 2.14 Esquema y fotografías del intercambiador de calor.

## 2.5 Balance de energía en la superficie

En la superficie de la pantalla lambertiana que tiene una temperatura de superficie  $T_p$ , se hace el siguiente balance de energía, donde se toma en cuenta la energía solar concentrada absorbida por la placa  $Q_e$ , la energía removida por el fluido refrigerante  $Q_u$  y la energía perdida por convección  $Q_c$  y radiación  $Q_r$  con el medio ambiente que tiene una temperatura  $T_a$ , en la figura 2.15 se presenta un esquema del balance de energía en la pantalla lambertiana.

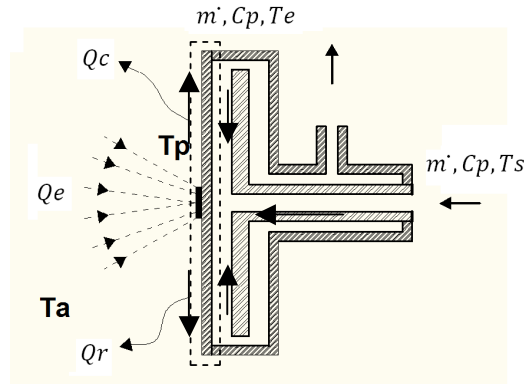


Fig. 2.15 Esquema de balance de energía en la pantalla lambertiana refrigerada.

Para este caso el requerimiento de conservación está dado por la ecuación 2.5, [Cruz Sesma, 1997].

$$Q_e = Q_c + Q_r + Q_u \quad 2.5$$

De la ecuación 2.5, cada término puede ser expresado con sus ecuaciones correspondientes. La energía radiativa concentrada que incide sobre la placa y que logra ser absorbida por la placa se denomina  $Q_e$ , la cual se determina con la ecuación 2.6, donde se ven involucradas la absorptividad de la placa  $\alpha$ , la reflectividad del heliostato  $\rho_1$ , la reflectividad de los espejos del concentrador  $\rho_2$ , y la irradiancia solar directa  $G_b$ .

$$Q_e = \alpha A_e \rho_1 \rho_2 G_b \quad 2.6$$

El término  $A_e$  es el área efectiva de captación del concentrador esto es, la geometría del concentrador delimita un área del concentrador  $A_c$ , sin embargo dicha área es atenuada principalmente por: el factor de atenuación del atenuador ( $\gamma$ ), por

sombreamientos debidos a la estructura de la mesa de trabajo e instrumentación ( $\psi$ ) y por un espaciamiento entre espejos ( $\omega$ ), expresando lo anterior se tiene que el área afectiva del concentrador  $A_e$ , esta dado por la ecuación 2-7:

$$A_e = \gamma \psi \omega A_c \quad 2.7$$

Retomando la ecuación 2.5, este requerimiento de conservación es válido para la condición de estado estable, y es posible expresar cada uno de los términos con las ecuaciones o modelos adecuados.

$$Q_c = hA_r(T_p - T_a) \quad 2.8$$

$$Q_r = \epsilon \sigma A_r F_{1-2} (T_p^4 - T_a^4) \quad 2.9$$

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad 2.10$$

El balance de energía toma entonces la forma:

$$\alpha A_e \rho_1 \rho_2 G_b = hA_r(T_p - T_a) + \epsilon \sigma A_r F_{1-2} (T_p^4 - T_a^4) + \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad 2.11$$

Donde:

$T_s$  es la temperatura de salida del fluido

$T_e$  es la temperatura de entrada del fluido

$\dot{m}$  es el flujo másico

$C_p$  es el calor específico del agua

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann  $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

$\alpha$  es la absorptividad de la superficie de la placa

$\epsilon$  es la emisividad de la superficie de la placa

$F_{1-2}$  es el factor de configuración geométrica entre la placa y la esfera celeste.

$A_r$  es el área del receptor

Si de la ecuación 2.11 se supone que la temperatura de la placa ( $T_p$ ) se aproxima a la temperatura del ambiente ( $T_a$ ), se observa que los términos de pérdidas por convección y por radiación se pueden despreciar obteniéndose:

$$\alpha A_e \rho_1 \rho_2 G_b = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad 2.12$$

Para aceptar la suposición anterior, de considerar la temperatura de la placa igual a la temperatura ambiente, la temperatura del fluido refrigerante de entrada al calorímetro se debe encontrar muy próxima a la temperatura ambiente y la diferencia de temperatura del agua entre la entrada y la salida ( $T_s - T_e$ ) debe ser menor a 5 °C; esta condición se obtiene variando el flujo másico, con esto se espera que la temperatura exterior de la placa sea próxima a la del ambiente, a éste método se le denomina calorimetría de agua fría, [Cruz Sesma,1997] ,[Acosta R., 2001].

Retomando el análisis térmico, si definimos a  $Q_0$  como la cantidad de energía radiativa incidente y antes de ser absorbida por la placa, tenemos que

$$Q_0 = A_e \rho_1 \rho_2 G_b \quad 2.13$$

De las ecuaciones 2.12 y 2.13 se tiene:

$$\alpha Q_0 = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad 2.14$$

Con la ecuación 2.14, se puede calcular a partir de los resultados experimentales, cual es la cantidad de energía que es removida por el fluido del total de energía solar concentrada incidente.

# Capítulo 3

## Instrumentación, montaje y metodología experimental

En éste capítulo, se detalla la instrumentación utilizada para medir temperatura, así como el sistema de adquisición de datos, el sistema de remoción del calor y la metodología empleada para la experimentación.

### 3.1 Instrumentación

#### Termopares

Para las mediciones de temperatura del agua a la entrada y a la salida del intercambiador de calor, se colocaron en los adaptadores de las conexiones rápidas para manguera, termopares tipo T (cobre-constantan) de alambre dúplex fino (0.019 in), como se muestra en la figura 3.1. Estas mediciones junto con la medición del flujo másico nos servirán para el estudio térmico que se vio en la sección 2.5 del capítulo dos.

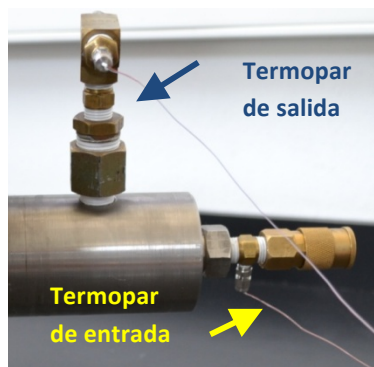


Fig. 3.1 Termopares conectados a la entrada y salida de agua del intercambiador de calor.

Para registrar y monitorear la temperatura de la pantalla lambertiana, ésta se instrumentó con tres termopares tipo T dentro de los orificios laterales que van a las distancias más cercanas al centro de la placa. Al intercambiador de calor se le colocó a las orillas, una cubierta de poliuretano de 2.5 cm de espesor con la finalidad de reducir las perdidas convectivas durante la experimentación y para proteger los termopares de la pantalla lambertiana. Para proteger a la capa de poliuretano del flujo radiativo incidente se le colocó una capa de papel de aluminio.

En la figura 3.2 se muestran los termopares colocados en la pantalla y un diagrama de los orificios para su colocación con sus respectivas distancias al centro.

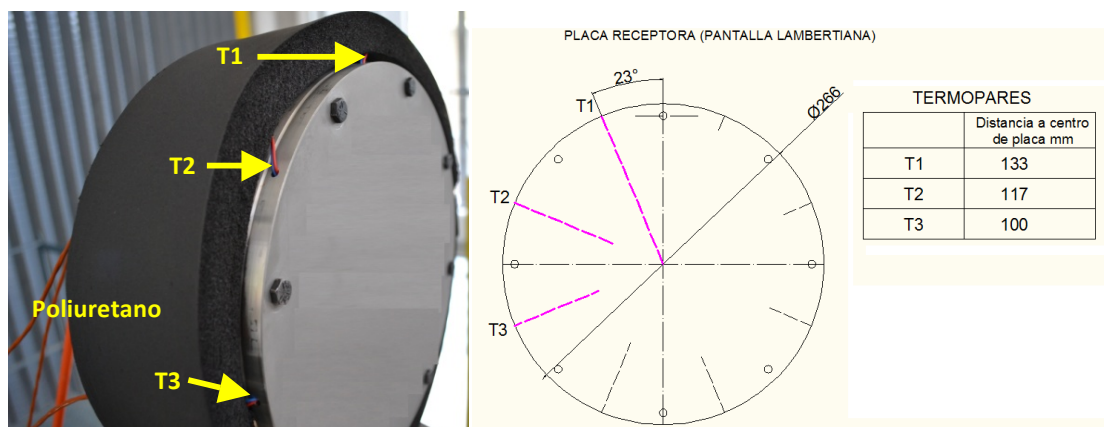


Fig. 3.2 Termopares tipo T colocados en la pantalla lambertiana.

### **Montaje**

Una vez armado e instrumentado el calorímetro, se colocó sobre la mesa de trabajo del horno solar y se alineó el instrumento sobre el eje óptico, a la distancia focal del sistema de 3.68 m, ver figura 3.3.



Fig. 3.3 Pantalla lambertiana ya instrumentada y montada para experimentación.



Para la toma de imágenes, se colocó al centro del sistema óptico de concentración una cámara con sensor CCD monocromática, marca infaimon, Pike F210B, ésta ofrece un completo control de los tiempos y señales, de la velocidad de obturación y de la sensibilidad, lo cual nos permite obtener imágenes de calidad para su posterior procesamiento.

Debido a que el sistema de adquisición de datos del HS no cuenta con la tarjeta de interfaz de la cámara CCD, la captura de imágenes se realizó desde una PC independiente del sistema de control. Esta PC también se ocupó para tomar la medida de la radiación directa al momento de la toma de imagen, desde la página de la estación solarimétrica del CIE-UNAM.

La cámara se operó con una configuración en captura de imágenes de 8 bits, esto quiere decir que se cuenta con un rango dinámico de 256 valores en escala de grises (de 0 a 255), valores mayores de 255 nos indicarían una saturación de la cámara, para evitar esta saturación, se utilizaron filtros ND (Densidad neutra). También conocidos como "filtros grises", reducen la cantidad de luz que llega al objetivo sin influir en su color o contraste.



Fig. 3.4 Cámara CCD montada al centro de la óptica para captura de imágenes

### **Sistema de adquisición de datos**

Las instalaciones del HSAFR cuenta con un sistema de control que permite manipular todas y cada una de sus componentes: la cortina, el atenuador, el helióstato, la mesa con movimiento tridimensional, el sistema de refrigeración, así como tomar datos de los diversos sensores ubicados en los dispositivos experimentales. Este sistema de control se ejecuta a través de un sistema SCADA (*Supervisión, Control y Adquisición de Datos*) por sus siglas en inglés, ver fig. 3.5.



Fig. 3.5 Pantalla principal del sistema de control SCADA del HSAFR, CIE-UNAM

Para la experimentación, la parte de hardware está equipada con sistemas de National Instruments, para la adquisición de datos de la experimentación, se cuenta con un controlador NI cFP-2220 que ejecuta LabVIEW *Real-Time* para registro de datos, análisis y control de procesos, este controlador cuenta con un modulo de entrada de termopares de ocho canales cFP-TC-125 que tiene entradas de termopar configurable por software.

### Control de apertura del atenuador

La toma de imágenes se realiza a diferentes valores de apertura del atenuador, se confía en el control del elemento atenuador y su caracterización para considerar los valores de apertura que se indican al momento de la toma de imágenes, la figura 3.6 muestra imágenes de diferentes aperturas del atenuador.



Fig. 3.6 Apertura del atenuador a diferentes porcentajes.

### **Sistema de refrigeración**

El sistema de refrigeración del HSAFR, cuenta con sistemas de válvulas de paso, una electro válvula reguladora de caudal, un flujómetro de coriolis, terminales con conectores rápidos para manguera y dos depósitos de fluido refrigerante; el primer depósito es el encargado de suministrar fluido a la entrada del intercambiador de calor por medio de una bomba centrífuga de  $\frac{3}{4}$  HP, el segundo depósito recibe el fluido refrigerante, por medio de una bomba de  $\frac{1}{2}$  HP se hace recircular el agua hacia el primer depósito, en la figura 3.7 se presentan fotografías de algunos de estos elementos.

Para éste caso, en la experimentación, se utiliza el flujo másico máximo que entrega el sistema de refrigeración que es de  $4.6 \text{ Kg}/\text{min}$ . Evaluando la temperatura y el flujo másico suministrado, se mantiene un ambiente controlado durante la experimentación. Con ello se puede calcular la cantidad de energía que se extrae a través del receptor.



Fig. 3.7 Equipo del sistema hidráulico.

### **Determinación del estado estacionario.**

El balance de energía presentado en la sección 2.5 del capítulo 2, hace referencia de ser valido para condiciones de estado estable, esto es, el momento en el que la temperatura de salida del fluido refrigerante permanece prácticamente constante, bajo esta condición se dice que se tiene un estado estable o estacionario en el sistema.

Se realizó un experimento para determinar el tiempo que tarda la temperatura del agua en alcanzar el estado estacionario, en la figura fig. 3.8, se presenta la curva del comportamiento de la temperatura respecto al tiempo del experimento y también se muestra la curva ajustada que nos permite determinar el tiempo de respuesta del intercambiador de calor  $\tau \approx 31 s$ . Con un valor de tres veces  $\tau$ , se tiene el 95% del estado estacionario el cual corresponde a un tiempo de 92.82 segundos. Con esto se define que el tiempo mínimo de espera para alcanzar el estado estacionario durante la operación del blanco lambertiano es de 1.5 minutos ( $3 \tau$ ).

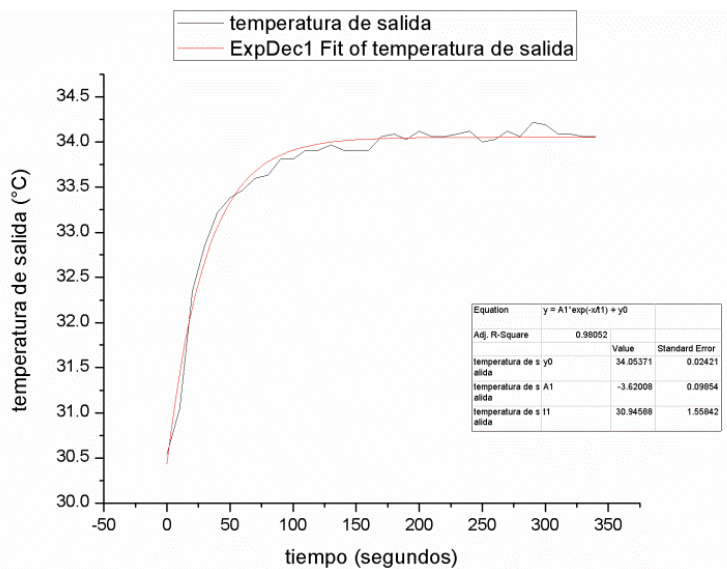


Fig.3.8 Determinación del tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario.

Una vez definidos los elementos involucrados en el desarrollo experimental, se hace un esquema del mismo, el cual se presenta en la figura 3.9.

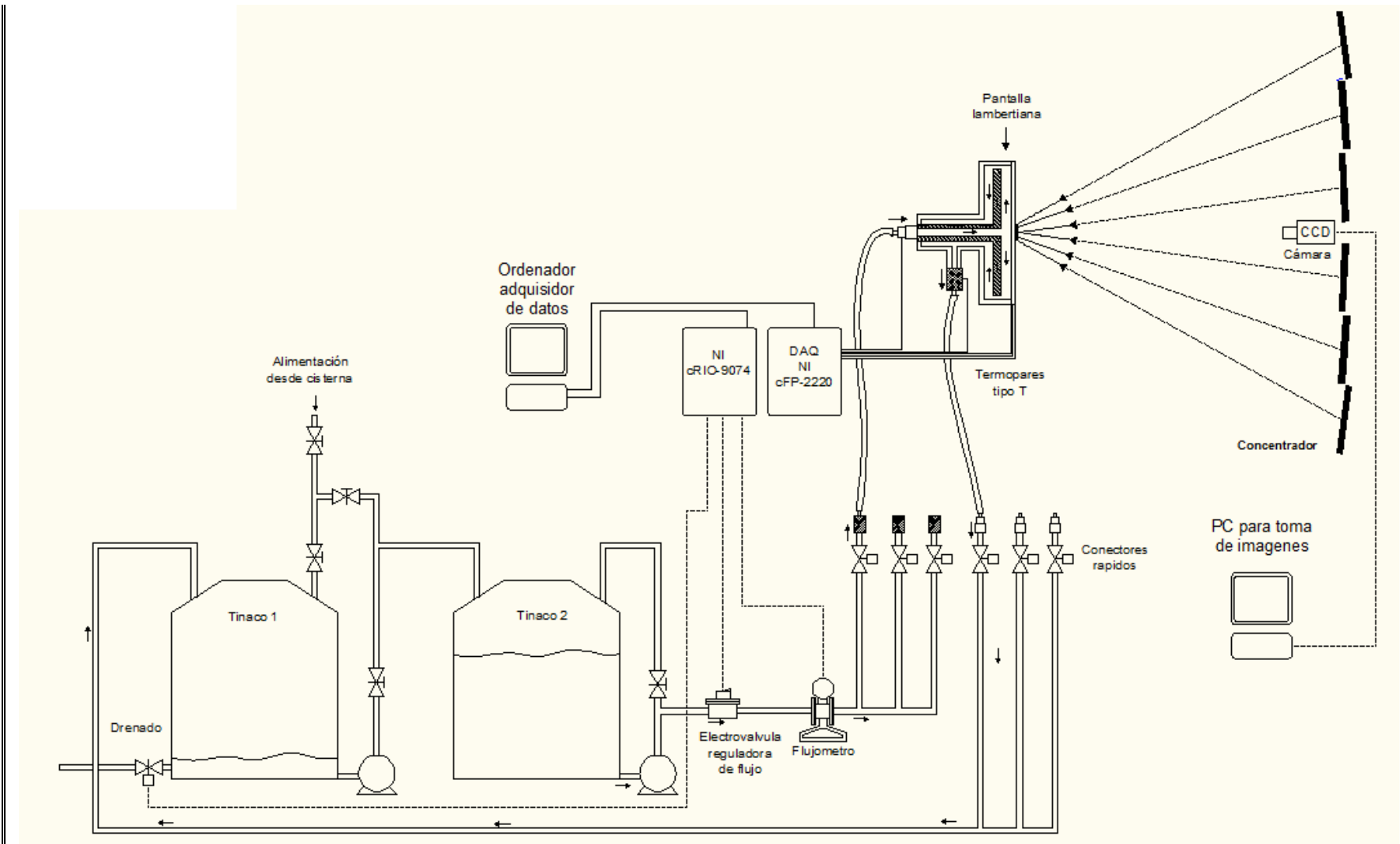


Fig. 3.9 Esquema general del sistema experimental.

---

## **Metodología experimental**

Antes de iniciar la campaña experimental, se aseguró que los componentes involucrados funcionaran de manera adecuada, y se procedió de la siguiente manera:

1. Iniciar el sistema de control del HS.
2. Establecer al helióstato en modo de seguimiento al sol.
3. Apertura de la cortina del concentrador con el atenuador al 0%.
4. Activar sistema de refrigeración, este se detiene hasta terminar la corrida experimental.
5. Sin recibir radiación concentrada, se hace el enfoque de la cámara sin filtros sobre la pantalla lambertiana refrigerada, para toma de imagen de referencia "target", el cual sirve como referencia para el posterior procesamiento.
6. Sin modificar el enfoque definido en el target, se ajustan los filtros neutros y se abre el atenuador al 100%, hasta que los valores de pixeles al momento de la toma de imagen sean menores a 255.
7. Se abre el atenuado a la apertura requerida (comenzando al 100%). La toma de cada imagen tiene un periodo de duración de 8 minutos, 5 minutos para alcanzar el estado estacionario y 3 minutos de espera para tener las condiciones iniciales e iniciar una nueva toma, esto es para el análisis térmico.
8. Sin modificar los ajustes de la cámara al 100%, la captura de imágenes se hace en decrementos de 10% de apertura del atenuador, comenzando en el 100% hasta el 0%.
9. Al momento de hacer la toma de imágenes, se registra el dato de radiación solar directa desde la página de la estación solarimétrica del CIE-UNAM.

# Capítulo 4

## Desarrollo experimental y análisis de resultados

En éste capítulo se presentan los resultados experimentales de la toma de imágenes y se detalla el procesamiento utilizado con el cual se obtienen los valores de flujo radiativo concentrado y los valores de concentración óptica. También se presentan los resultados del análisis calorimétrico y un análisis alternativo en el balance de energía en el blanco lambertiano utilizado.

### 4.1 Toma de imágenes y procesamiento

De acuerdo a la metodología experimental planteada en el capítulo 3, la primera imagen tomada es la del “target”, la cual sirve como referencia para el análisis de la distribución de radiación, las siguientes imágenes capturadas son a los diferentes porcentajes del atenuador, en la figura 4.1, se presentan en ese orden las imágenes tomadas con sus respectivos valores de radiación directa ( $I_b$ ) al momento de la toma de la imagen.

Las imágenes tomadas, están formadas por una matriz de dimensiones 1280 X 960 pixeles, esta matriz proporciona los valores de intensidad luminosa registrados por cada pixel del sensor de la cámara CCD. Los valores de cada pixel se encuentran en un intervalo de 0 a 255, siendo 255 el valor de mayor intensidad luminosa registrada por el sensor de la cámara, estos valores registrados por cada pixel son los que servirán para determinar los valores de concentración mediante el procesamiento de imágenes.

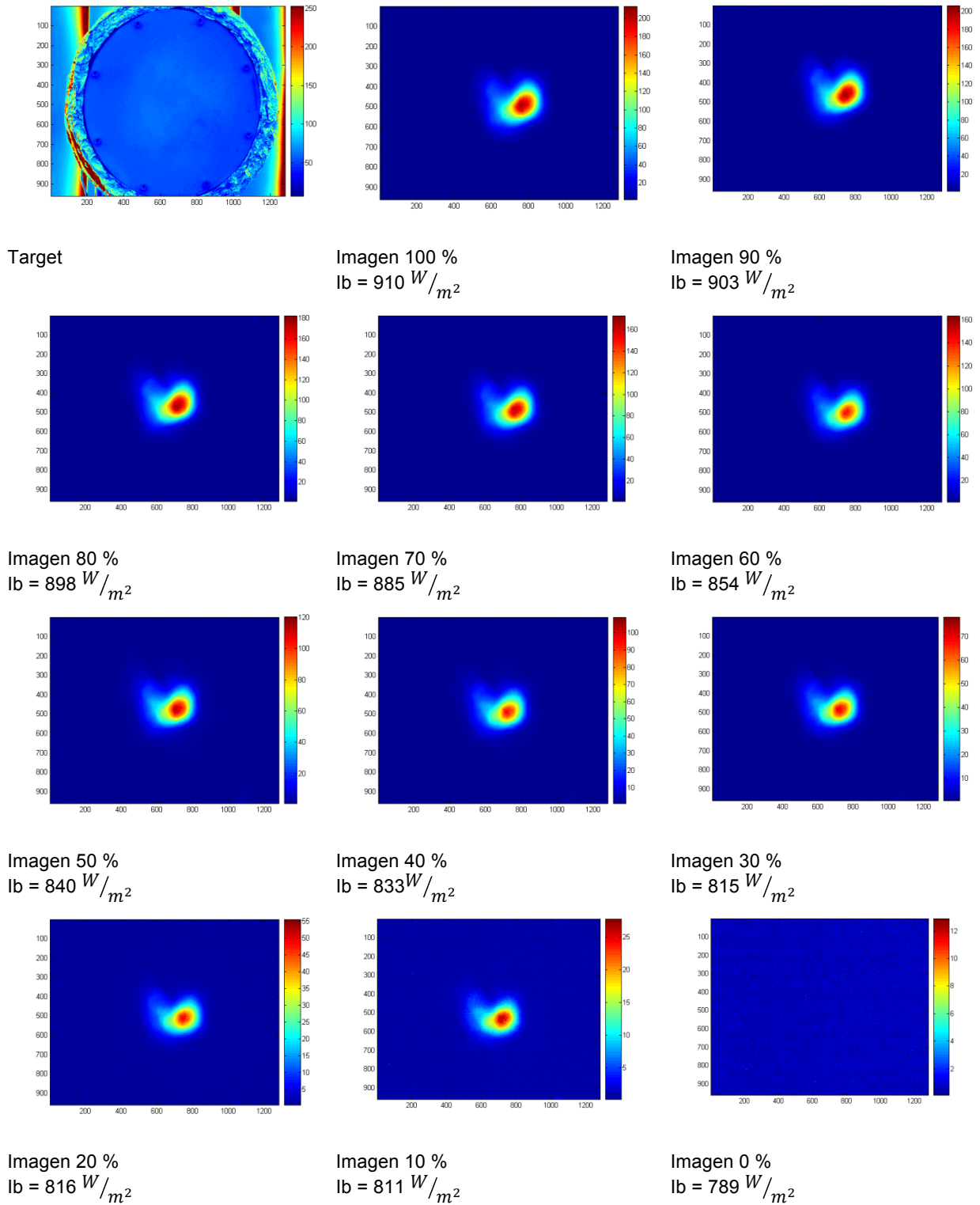


Fig. 4.1 Imágenes de resultados experimentales



En la tabla 4.1, se presentan los primeros datos obtenidos de los resultados experimentales de la toma de imágenes. Basados en la metodología experimental descrita, al mantener fijos los filtros neutros en la cámara CCD para un porcentaje de apertura del atenuador al 100 % se ve afectado el rango dinámico registrado por la cámara, es decir en el rango de valores de apertura del atenuador del 80% al 10%, el rango dinámico con filtros fijos va decreciendo mientras decrece la apertura del atenuador.

Tabla 4.1 Rango dinámico registrado en imágenes de resultados experimentales

<b>% Atenuación</b>	<b>Rango Dinámico</b>
<b>Registrado en la imagen</b>	
<b>100</b>	0 – 215
<b>90</b>	0 – 208
<b>80</b>	0 – 184
<b>70</b>	0 – 174
<b>60</b>	0 – 165
<b>50</b>	0 – 121
<b>40</b>	0 – 110
<b>30</b>	0 – 79
<b>20</b>	0 – 56
<b>10</b>	0 – 28

### **Procesamiento de imágenes**

De la figura 4.1 se puede apreciar que las imágenes tomadas del spot de luz solar concentrada, presenta un contorno irregular, debido a esto, se propone el procesamiento de imágenes que se describe a continuación. Para el procesamiento de información de las imágenes, se desarrollaron tres rutinas en MATLAB®, (ver apéndice B), en la primer rutina llamada “radiación”, se muestran las instrucciones para el procesamiento de imágenes; con la segunda rutina llamada “radiación2”, se calcula la cantidad de energía y se hace el cálculo del tamaño de pixel, en la tercera rutina “conversión\_imagen\_v2”, se obtienen los valores de concentración solar promedio y pico, lo mismo para valores de flujo radiativo concentrado. A continuación se describe el procedimiento de análisis de imágenes.

## Cálculo del área del concentrador

En el análisis de imágenes para determinar la cantidad de energía solar concentrada, se debe conocer cuál es el área del concentrador formado por el contorno de las dos ópticas de espejos con que se trabajó. Para esto, se utilizó un equipo de medición por coordenadas portátil, CMM, Metronor System, (*coordinate measurement machine*), con este equipo se midió un cuadrante del contorno formado por las dos ópticas de espejos del concentrador, el *software* del equipo de medición genera un archivo de CAD. El archivo se exportó a un software de CAD (*SolidWorks*<sup>®</sup>) y al considerar simétrico el concentrador, se completó la geometría del perímetro del área de concentración utilizada. El software nos da el valor del área en milímetros cuadrados el cual es de: 20 189 213.88118 mm<sup>2</sup>. El área del concentrador expresado en metros corresponden a 20.19 m<sup>2</sup>, ver figura 4.2.

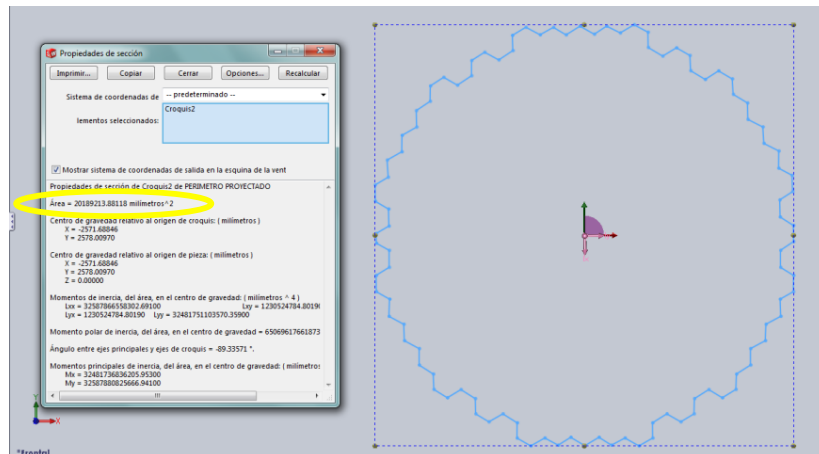


Fig. 4.2 Determinación del área del concentrador

Como ya se a mencionado, el área del concentrador se ve reducida por el espaciamento que existe entre los espejos o facetas que lo forman; haciendo un cálculo considerando uniforme un espaciamento entre espejos de 6 mm, este representa una reducción del 3% en el área de concentración.

Otro factor de pérdida considerado, es el ocasionado por sombreadamiento, el cual es ocasionado principalmente por la instrumentación montada para la experimentación sobre la mesa de trabajo, la mesa misma y la plataforma que permite el acceso a ésta. Se realizó un cálculo estimado del sombreadamiento en el área de concentración y se determinó que representa una disminución del área de concentración del 5%, en la figura 4.3 se muestran los esquemas de los factores que disminuyen el área del concentrador.

Con los datos anteriores se puede conocer el área efectiva de concentración para el procesamiento de imágenes, la cual se calcula con la ecuación 2.7 presentada en el capítulo 2. El término  $\gamma$ , es el porcentaje de apertura del atenuador con el cual se

tomó cada imagen, el valor de  $\psi$  es del 5% por sombreados,  $\omega$  es el espaciado entre espejos del 3% y  $A_c$  es el área del contorno de los espejos del concentrador igual a 20.19 m<sup>2</sup>.

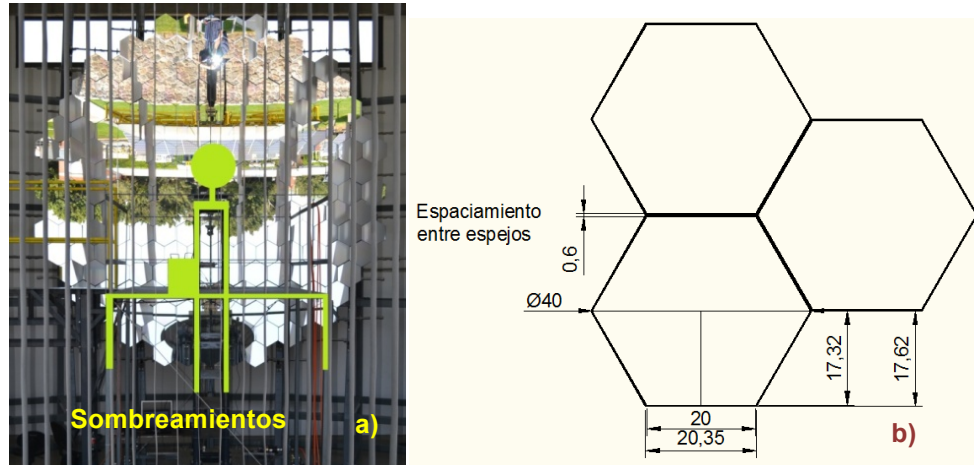


Fig. 4.3 a) Factores de sombreado , b) espaciado entre espejos.

### **Determinación y eliminación del ruido en las imágenes**

En las imágenes tomadas, la cámara CCD logra capturar valores en intensidades de grises de los alrededores del blanco lambertiano, que son valores que no sirven para el análisis de imágenes, porque son de una zona donde no hay radiación concentrada incidente, a esta intensidad luminosa de los alrededores se le llamó ruido en las imágenes.

Para visualizar el ruido de los alrededores captados por la cámara CCD, a la matriz de datos que forman las imágenes a procesar, se dividió entre ella misma, con esto se obtiene una imagen binaria, es decir formada por con valores de 0 y 1, los valores de 1 muestran los pixeles que contienen valores en intensidades, dentro del blanco lambertiano y de los alrededores los cuales no forman parte del área de la luz solar concentrada, en la imagen de la figura 4.4 se muestra el ruido de los alrededores de la imagen tomada al 100% de apertura del atenuador.

Como se ha mencionado, el ruido en las imágenes no forma parte de la radiación solar concentrada incidente en la pantalla lambertiana, por esta razón, antes de procesar las imágenes en matlab<sup>®</sup>, se procedió a eliminar el ruido en las imágenes, los criterios analizados para la eliminación del ruido en las imágenes se presentan a continuación.

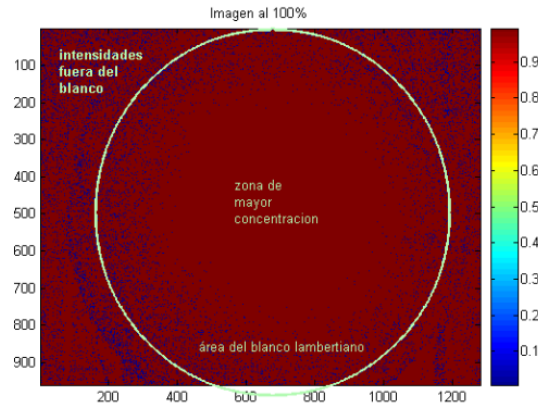


Fig. 4.4 Imagen que muestra el ruido de los alrededores.

Como primera opción para eliminar el ruido en las imágenes a procesar, se restaron valores directamente a toda la matriz de datos de las imágenes; como ejemplo se presenta la figura 4.5, en la cual se seleccionó la imagen tomada al 100% de apertura del atenuador; se comenzó por restar a la matriz de datos de dicha imagen un valor de 1, sin embargo el ruido de los alrededores no se eliminó completamente como se puede apreciar en la figura 4.5 a). Debido a que restar el valor de 1 a la matriz de datos de la imagen al 100% no eliminaba completamente el ruido, se probó restar un valor de 2 a la matriz de datos de la imagen, sin embargo como se muestra en la figura 4.5 b), aún puede percibirse ruido en los alrededores.

Se descartó el método de restar valores directo de la matriz de datos, debido a que no se elimina por completo el ruido y analizando que con eliminar un valor de 2 a la imagen a procesar, se tienen pérdidas de información de hasta un 48% principalmente en las imágenes que tienen un corto rango dinámico, que son las imágenes tomadas a bajos porcentajes del atenuador.

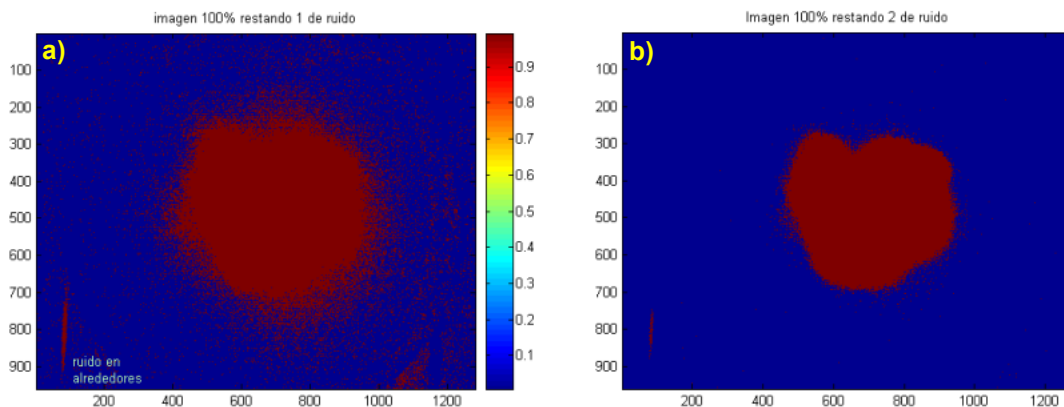


Fig. 4.5 Eliminación directa del ruido en imágenes

Como segundo análisis para eliminar el ruido y partiendo del hecho de que sólo la información que está dentro del blanco lambertiano es de utilidad para el análisis de las imágenes, se creó una imagen de las mismas dimensiones que las imágenes a procesar (1280 X 960 píxeles), ésta nueva imagen creada a la cual denominaremos como máscara, servirá como filtro para la eliminación del ruido.

En esta nueva imagen máscara, se dibuja un círculo del mismo tamaño del círculo formado por el blanco lambertiano en la imagen tomada del target. La imagen máscara es una imagen binaria, en la cual los valores de los píxeles dentro del círculo son 1 y los valores fuera de éste son 0. El filtrado del ruido por medio de la imagen máscara, se logra al multiplicar la matriz de la imagen a procesar con la matriz de datos de la máscara, con esto no se afecta a la información de los píxeles que se encuentran dentro de la pantalla lambertiana en las imágenes procesar, recordando que ésta información es de utilidad para el procesamiento de imágenes.

En la figura 4.6 se muestra un ejemplo del filtrado de ruido por medio de la imagen máscara sobre la imagen a procesar con el 100% de apertura del atenuador. En la fig. 4.6 a) se muestra la imagen binaria de la máscara, en b) se muestra la imagen binaria de la imagen tomada al 100% de apertura del atenuador ya sin ruido en los alrededores, en el c) se muestra la imagen del 100% limpia de ruido, lista para analizarla.

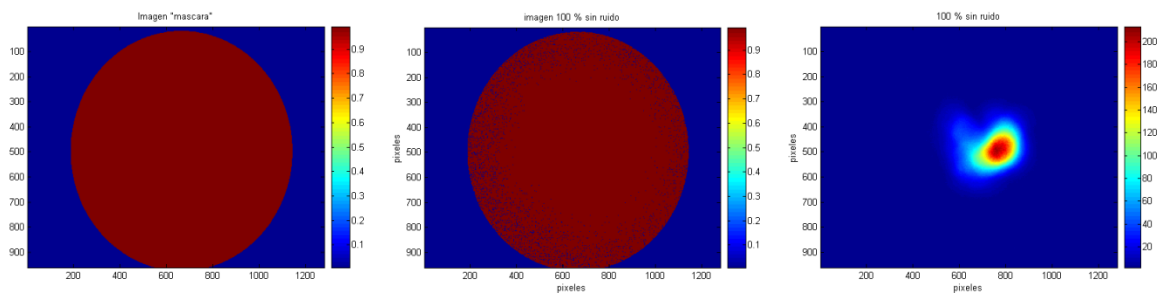


Fig. 4.6 Ruido en imágenes; a) máscara, b) imagen sin ruido exterior en valores de 0 y 1 c) imagen limpia

Del estudio para la eliminación del ruido en las imágenes, se decidió hacerlo por el filtrado de la imagen máscara, debido a que elimina por completo el ruido de los alrededores y no modifica los valores de intensidad luminosa que son registrados por la cámara dentro de la pantalla lambertiana.

### Cálculo del tamaño de pixel y área del spot de la luz solar concentrada

Después de eliminar el ruido de las imágenes a procesar, se debe calcular cuál es el área del spot de la luz solar concentrada, para esto primeramente se debe calcular cuanto mide la longitud de un pixel a lo cual denominamos tamaño de pixel.

Para calcular el tamaño de pixel, se carga en matlab® la imagen de referencia “target”, de esta imagen se conoce que sus dimensiones en pixeles son 1280 X 960, se miden la cantidad de pixeles que abarca el blanco en su diámetro, para esto se toman referencias en el eje X. En la figura 4.7 se ilustran las referencias  $X_1$  y  $X_2$ . Las referencias sirven para calcular el número de pixeles ( $N_{pixeles}$ ) dentro del blanco lambertiano mediante la ecuación 4.1.

$$N_{pixeles} = X_2 - X_1 \quad 4.1$$

Conociendo la medida física del diámetro del blanco lambertiano (0.266 m) y el número de pixeles que hay en el diámetro del blanco lambertiano en la imagen; se calcula el tamaño del pixel dividiendo el diámetro del blanco entre el número de pixeles, lo anterior se puede expresar por la ecuación 4.2. Una vez determinado el tamaño considerando que sea cuadrado, se puede conocer el área de un pixel elevando el valor  $T_{pixel}$  al cuadrado.

$$T_{pixel} = \frac{Diametro}{N_{pixeles}} \quad 4.2$$

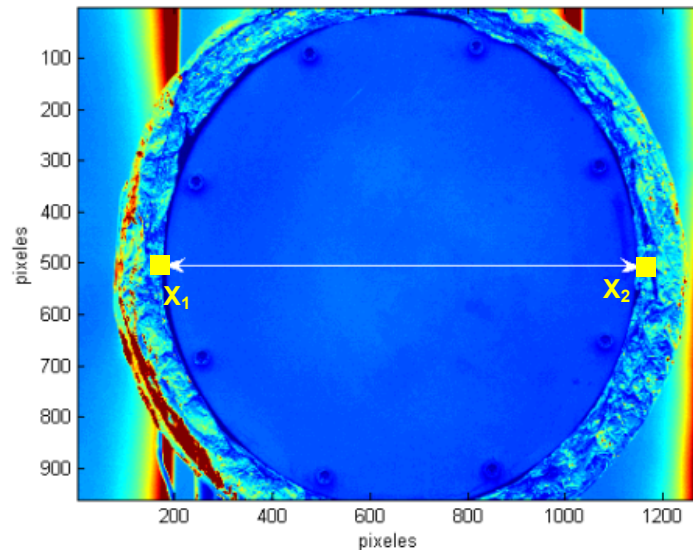


Fig. 4.7 Target de referencia para calcular el tamaño del pixel.

El tamaño del área del *spot* de cada imagen a procesar se calcula multiplicando la cantidad de pixeles que forman el *spot* por el área de pixel, como resultado se obtiene el área del *spot* en unidades de superficie.

Lo descrito hasta el momento como lo es el área efectiva de concentración, la eliminación del ruido en las imágenes y el cálculo del área del spot, es el procedimiento que sigue la rutina “radiacion2” en la primer parte del procesamiento de imágenes. La rutina “radiacion2” se anexa en el apéndice B.

## 4.2 Determinación de las distribuciones de flujo radiativo concentrado

El cálculo de las distribuciones de flujo radiativo concentrado de cada imagen, se determinó mediante el procedimiento que se describe a continuación. Primero se calcula la relación de concentración promedio ( $C_g$ ) del concentrador y la superficie plana del blanco lambertiano, la cual se define como el cociente del área efectiva del concentrador  $A_e$  entre el área del spot de la luz solar concentrada  $A_{spot}$ . Las unidades que expresan la relación de concentración promedio  $C_g$  son los soles de concentración.

$$C_g = \frac{A_e}{A_{spot}} \quad 4.3$$

Para determinar los valores de concentración a partir de los datos proporcionados por las imágenes tomadas en la experimentación, es necesario calcular una constante ( $K$ ), que relacione la información de las imágenes con sus correspondientes valores en unidades de concentración solar. Con la ecuación 2.13 presentada en el capítulo 2, se puede determinar la energía radiativa concentrada que incide sobre el blanco lambertiano. Debido a que cuando se realizó este trabajo no se tenían medidos los valores de reflectividad de los elementos ópticos del HSAFR del CIE-UNAM; se tomaron como referencia valores reportados por [Neumann, 1996] del Horno Solar DLR en Alemania, donde se tiene un valor de reflectividad del helióstato  $\rho_1$  igual a 0.87 y la reflectividad del concentrador  $\rho_2$  igual a 0.89, considerando que los espejos en ambas instalaciones tienen propiedades similares,

$$Q_0 = A_e \rho_1 \rho_2 G_b \quad (2-13)$$

Una vez calculada la cantidad de energía solar concentrada incidente  $Q_0$ , se divide entre el área del spot de la luz solar concentrada ( $A_{spot}$ ), como resultado se obtiene el flujo radiativo concentrado promedio ( $I_p$ ), este valor representa el aumento en la densidad de flujo radiativo concentrado.

$$I_p = \frac{Q_0}{A_{spot}} \quad 4.4$$

Otra forma de calcular  $I_p$  utilizando la relación de concentración  $C_g$  se muestra en la ecuación 4.5, la cual se puede determinar al combinar las ecuaciones 4-4 y 2-13.

$$I_p = \frac{Q_0}{A_{spot}} = \frac{A_e \rho_1 \rho_2 G_b}{A_{spot}} = C_g * \rho_1 \rho_2 G_b \quad 4.5$$

De manera similar, con la información en escala de grises de las imágenes a procesar, se determina un valor de intensidad promedio en valores de escala de grises  $I_{pgris}$ . Para esto, se suman los valores de intensidad registrados por cada pixel y se divide entre el número de pixeles que contienen información.

$$I_{pgris} = \frac{\text{Suma de intensidad en escala de grises}}{\text{número de pixeles con informacion de intensidad}} \quad 4.6$$

Dividiendo el flujo radiativo promedio  $I_p$ , entre el valor promedio de intensidades de grises  $I_{pgris}$ , se obtiene la constante  $K$  de relación, ecuación 4.7.

$$K = \frac{I_p}{I_{pgris}} = \left( \frac{W}{\text{grises} * m^2} \right) \quad 4.7$$

Una vez calculada la constante de relación  $K$ , se multiplica por la matriz de datos de la imagen que forma la distribución del spot, y se obtiene la distribución de flujo radiativo concentrado. En la figura 4.8 se muestra un ejemplo de la imagen procesada tomada al 100% de apertura del atenuador, en la fig. 4.8 a), se muestra la distribución del flujo radiativo concentrado en unidades de mega watts, en la fig. 4.8 b) se muestra el contorno de la misma figura en una vista superior, esto es de frente al blanco lambertiano.

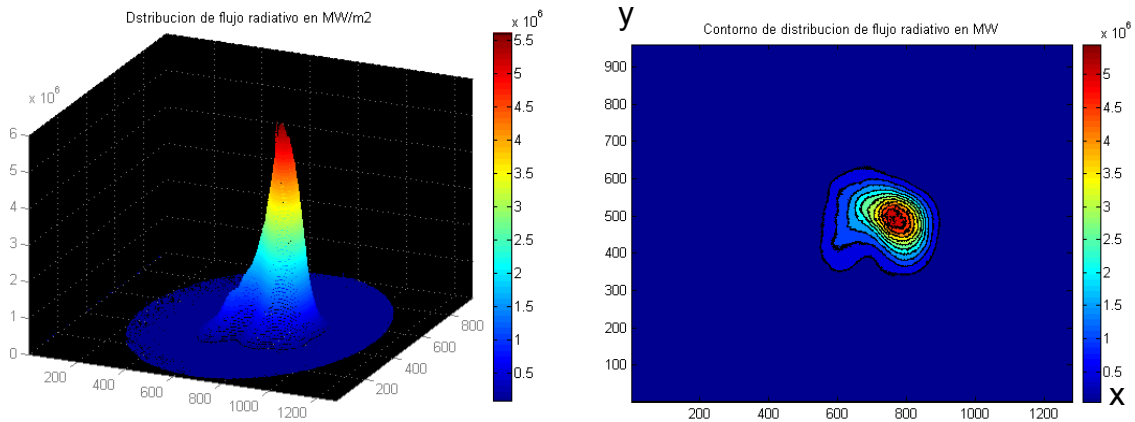


Fig. 4.8 Flujo radiativo concentrado en MW/m<sup>2</sup> a) Perfil de distribución b) contorno de la luz solar concentrada

El análisis que se describió para relacionar la información contenida en las imágenes a procesar con sus correspondientes valores de flujo radiativo concentrado, es el utilizado en la rutina “conversión\_imagen\_v2” del procesamiento de imágenes, el código fuente de dicha rutina se presenta en el apéndice B.

La geometría ideal de los contornos de intensidades del spot formado por un concentrador solar de foco puntual, son formas circulares y concéntricas, para mostrar los valores de distribución de flujo radiativo de un spot ideal, se puede obtener un perfil representativo que cruza por el valor pico de la distribución; para el



caso de un spot ideal puede ser representado por un perfil que sería una línea que sigue una tendencia de campana de gauss.

Como se ha mencionado, el contorno del spot de las imágenes obtenidas del experimento, no es una imagen simétrica, en consecuencia no se puede definir a un perfil representativo del flujo de energía radiativa concentrada. Partiendo del valor calculado del flujo radiativo concentrado de cada imagen es posible determinar el valor pico del flujo radiativo concentrado.

El perfil equivalente para cada imagen de los resultados experimentales, se obtiene a partir de los valores de concentración solar calculados del procesamiento de imágenes y a partir de la medición de la radiación directa registrada al momento de la toma de la imagen. Con estos datos se obtienen los perfiles por medio de una función de distribución  $F(r)$ , ecuación 4.8, [Neumann, 1996]. Donde  $C_{peak}$  es el valor de la concentración pico,  $I_{dir}$  es la radiación solar directa registrada al momento de la toma de la imagen,  $r$  es el radio del spot de luz solar concentrada y  $\sigma$  es la desviación estándar de la función de distribución gaussiana. En la tabla 4.2 se presentan los resultados del procesamiento de imágenes los cuales servirán para determinar los perfiles equivalentes.

Las unidades de los valores pico de concentración son los soles de concentración y estos se calculan dividiendo el flujo radiativo concentrado entre la irradiancia solar directa registrada al momento de la toma de la imagen.

$$F(r) = C_{peak} * I_{dir} * e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} , \text{ en } \frac{W}{m^2} \quad 4.8$$

Tabla 4.2 Resultados del análisis de imágenes

No. de imagen	Atenuación en %	Ib al momento de la toma $W/m^2$	Concentración pico
1	100	910	5950
2	90	903	5195
3	80	898	4528
4	70	885	4306
5	60	854	4066
6	50	840	2919
7	40	833	2562
8	30	815	1775
9	20	816	1141
10	10	811	440

De la ecuación 2.13 del capítulo 2, se puede calcular la cantidad de energía incidente en el blanco lambertiano, esta cantidad de energía es la que se quiere representar en el perfil equivalente, para esto se obtiene la integral del volumen de revolución del perfil de distribución por medio de la ecuación 4.9, que es la forma general para la integral de volumen del solido de revolución respecto al eje “y”, [Leithold, 1987].

$$2\pi \int_a^b xf(x)dx \quad 4.9$$

De la ecuación 4.8 y 4.9, la integral de volumen queda expresada por medio de la ecuación 4.10, de esta ecuación es necesario determinar el valor de la constante  $\sigma$ .

$$2\pi \int_0^r r \left[ C_{peak} * I_{dir} * e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \right] dr \quad 4.10$$

Evaluando la integral definida por la ecuación 4.10, se obtiene la expresión que permite calcular la cantidad de energía solar concentrada incidente en el blanco lambertiano, la cual se define por:

$$2 * C_{peak} * I_{dir} \left[ 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \right] \pi \sigma^2 \quad 4.11$$

Como se mencionó anteriormente, la cantidad de energía incidente en el blanco lambertiano es igual a la integral de volumen de la función de distribución, igualando las ecuaciones 2.13 y 4.11, se obtiene la ecuación que nos permite obtener el perfil equivalente.

$$A_e \rho_1 \rho_2 G_b = 2 * C_{peak} * I_{dir} \left[ 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \right] \pi \sigma^2 \quad 4.12$$

Partiendo de los datos de la tabla 4.2, para un valor del 100% de apertura del atenuador y considerando despreciable el término exponencial de la ecuación 4.12, debido que al incrementar el radio, el argumento de la función exponencial tiende a infinito, en consecuencia  $e^{-\infty} = 0$ . Por lo anterior, se puede despejar la desviación estándar de la ecuación 4.12, obteniendo así un valor de  $\sigma \approx 0.01963 \text{ m}$ . Para un valor de  $r = 3\sigma \approx 0.058 \text{ m}$ , se calcula que se contiene el 98% del área bajo la curva de gauss, es decir en un radio de spot de luz solar de aproximadamente 6 cm, se tiene un 98% de la energía solar concentrada incidente en el blanco lambertiano.

En los gráficos de la figura 4.9 se puede apreciar la comparativa de los perfiles equivalentes del flujo radiativo concentrado. Se puede observar que para una apertura del atenuador del 100% y con una radiación solar directa  $I_b = 910 \text{ Wm}^{-2}$  al momento de la toma de la imagen, se determinan valores de flujo radiativo concentrado de alrededor de 5.4 mega watts por metro cuadrado. Como puede apreciarse los valores de flujo radiativo concentrado disminuyen conforme disminuye el porcentaje de atenuación, siendo los valores mínimos de flujo radiativo concentrado correspondiente al 10% de la apertura del atenuador, de aproximadamente 0.3 Mega Watts por metro cuadrado ( $\text{MW} / \text{m}^2$ ), la curva que representa esto es la más próxima al eje x.

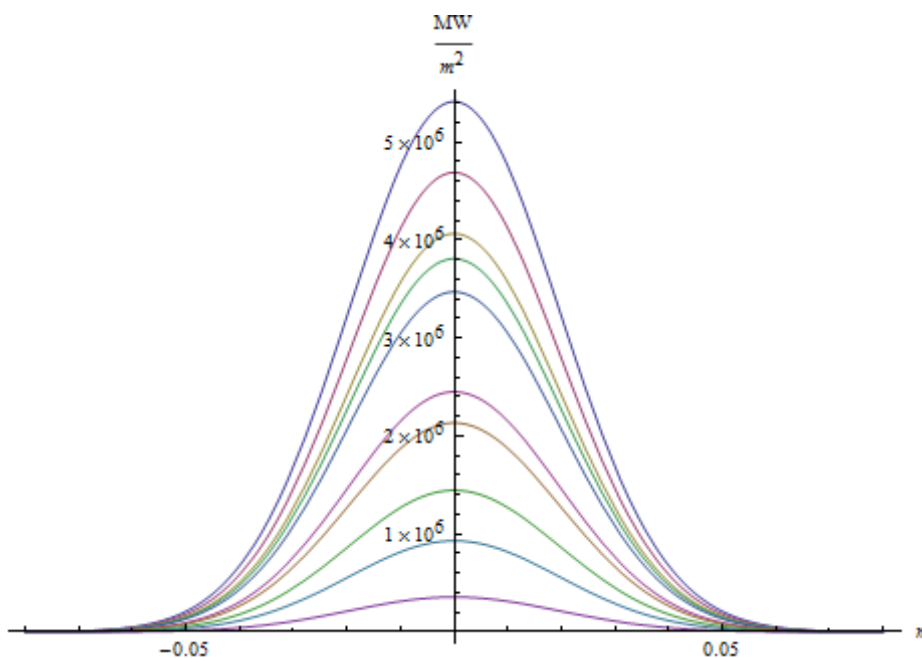


Fig. 4.9 Perfiles equivalentes de la distribución de flujo radiativo concentrado.

En la tabla 4.3 se presentan los valores pico ( $MW / m^2$ ) del flujo radiativo concentrado, correspondientes a cada valor de apertura del atenuador.

Tabla 4.3 Resultados de flujo radiativo concentrado a diferentes valores de apertura del atenuador.

% atenuador	flujo radiativo concentrado (pico) ( $MW/m^2$ )
100	$5.41 \pm 8\%$
90	$4.69 \pm 8\%$
80	$4.07 \pm 8\%$
70	$3.81 \pm 8\%$
60	$3.47 \pm 8\%$
50	$2.45 \pm 8\%$
40	$2.13 \pm 8\%$
30	$1.45 \pm 8\%$
20	$0.93 \pm 8\%$
10	$0.36 \pm 8\%$

### 4.3 Determinación de las concentraciones ópticas máximas

Para expresar los perfiles representativos en unidades de concentración (soles), como ya se ha mencionado, se dividen los valores de los perfiles de distribución radiativo concentrado, entre la irradiancia solar directa registrada al momento de la toma de la imagen.

Los perfiles representativos expresados en unidades de concentración se muestran en los gráficos de la figura 4.10. Para las dos ópticas de espejos del concentrador con las cuales se realizó este trabajo, se determinaron valores de concentración pico para una apertura del 100% del atenuador, cercano a los seis mil soles. Como se puede observar en el grafico al reducir el porcentaje de atenuación se reducen los niveles de concentración, siendo los mínimos registrados para un 10% de atenuación de alrededor de 440 soles.

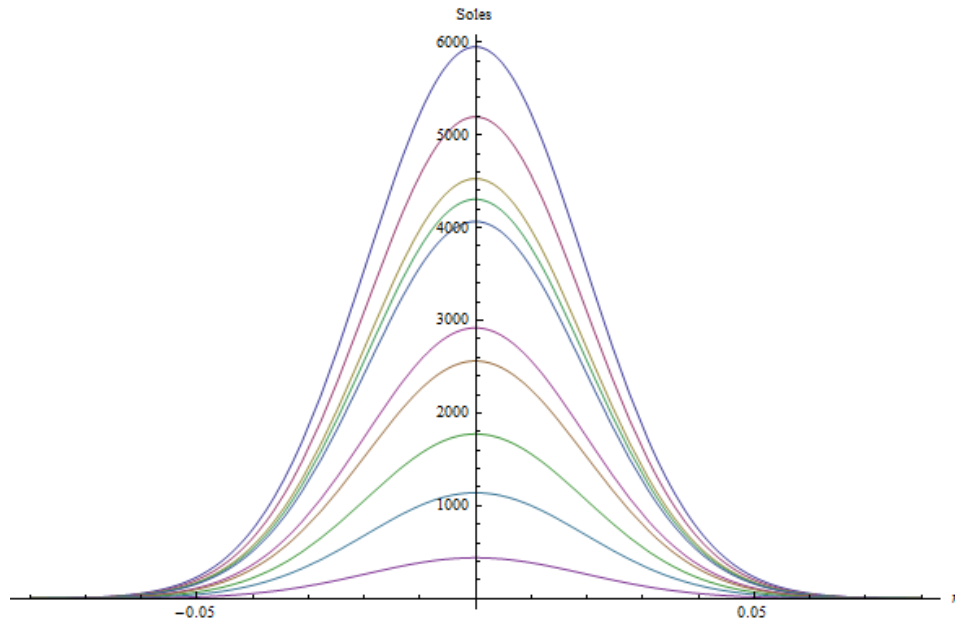


Fig. 4.10 Perfiles equivalentes de la distribución de flujo radiativo en soles de concentración.

En la tabla 4.4, se muestran los valores de concentración solar pico para cada porcentaje de apertura del atenuador.

Tabla 4.4 Valores de concentración pico

<b>% atenuador</b>	<b>Concentración pico (soles de concentración)</b>
<b>100</b>	5950 ± 8%
<b>90</b>	5195 ± 8%
<b>80</b>	4528 ± 8%
<b>70</b>	4306 ± 8%
<b>60</b>	4066 ± 8%
<b>50</b>	2916 ± 8%
<b>40</b>	2562 ± 8%
<b>30</b>	1775 ± 8%
<b>20</b>	1142 ± 8%
<b>10</b>	440 ± 8%

#### 4.5 Análisis calorimétrico

Los resultados de las mediciones de temperatura registrados por los termopares colocados en los diferentes puntos de la placa receptora, así como a la entrada y salida del fluido refrigerante, se presentan en la tabla 4.5. Los valores de temperatura que se presentan en la tabla, fueron tomados durante el estado estacionario y nos servirán para realizar el análisis térmico.

En la primera columna se presentan los distintos valores de porcentaje de apertura del atenuador con que se trabajó. En la segunda columna “ $T_e$ ”, se muestra la temperatura de entrada del fluido refrigerante en el intercambiador de calor. Se puede apreciar que dicha temperatura permanece cercana a los 30 °C para todos los casos analizados, esto es debido a que el fluido de entrada se suministró de un mismo depósito, sin hacer recircular el agua de salida del intercambiador. En la tercera columna “ $T_s$ .” se muestra la temperatura de salida del fluido en °C, siendo registrada una temperatura máxima de 39 °C a un porcentaje de apertura del atenuador del 100%.

Los termopares instrumentados en la placa como  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$ , registraron valores de temperatura del interior de la placa. Los valores registrados por  $T_1$  son los mayores respecto a los registrados por  $T_2$  y  $T_3$  como se esperaba, debido a que la posición de  $T_1$  es la más cercana al centro de la placa y el spot se ubicó lo más cercano al centro del blanco lambertiano. Como puede apreciarse las mayores temperaturas registradas por los tres termopares se presentan a un 80% de apertura del atenuador y no al 100% como se esperaba; esto pudiera atribuirse a que si por alguna razón el spot se mueve de lugar en la pantalla lambertiana y el pico de concentración incidente se aproxima a los termopares, entonces éstos pueden registrar una mayor temperatura en ese momento.

Tabla 4.5 Resultados de las mediciones de temperaturas en experimentación en estado estacionario.

% Atenuador	Te °C	Ts °C	Termopares en placa			$\Delta T$ Ts - Te	Flujo másico $\dot{m} * Cp * \Delta T$	Qu (watt) $\dot{m} * Cp * \Delta T$	Gb W / m <sup>2</sup>	Qo (watt) $A_e \rho_1 \rho_2 G_b$	% Energía Removida
			T1 °C	T2 °C	T3 °C						
100%	30.2	39.0	83.0	66.8	53.3	8.8	4.5	2756.6	910	13109.4	21%
90%	30.2	38.5	89.7	74.4	58.8	8.3	4.5	2590.8	903	12883.4	20%
80%	30.3	37.8	91.2	87.1	76.1	7.5	4.5	2353.0	898	11219.4	21%
70%	30.3	36.4	68.8	57.9	48.7	6.2	4.5	1933.7	885	9636.8	20%
60%	30.3	35.7	68.4	59.7	51.4	5.4	4.5	1683.4	854	7706.5	22%
50%	30.3	35.0	69.2	67.1	57.9	4.6	4.5	1448.7	840	6350.9	23%
40%	30.4	34.1	58.7	53.7	47.2	3.7	4.5	1167.1	833	5155.2	23%
30%	30.3	33.1	50.5	46.4	43.0	2.7	4.5	848.0	815	3743.9	23%
20%	30.3	32.2	41.2	38.6	38.0	1.9	4.5	582.0	816	2585.5	23%
10%	30.3	31.2	37.0	35.7	35.6	0.9	4.5	291.0	811	1413.8	21%

Continuando con el análisis de datos presentados en la tabla 4.3, a partir de los datos de temperatura del fluido refrigerante se puede calcular la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) la cual es de 8.8 °C para el 100% de apertura del atenuador, para porcentajes de atenuación menores al 60% el  $\Delta T$  calculado es menor a 5.4 °C, lo cual favorece a la calorimetría de agua fría. El flujo másico ( $\dot{m}$ ) igual a 4.5 kg/min presentado en la tabla, es constante durante el experimento y es el máximo que puede ser suministrado. Con los valores de temperatura del fluido y el valor medido del flujo másico, por medio de la ecuación 2-10 presentada en el capítulo 2, se puede calcular la cantidad de energía ( $Q_u$ ) que fue removida por el fluido térmico.

Una vez calculada la cantidad de energía ( $Q_u$ ) removida por el fluido refrigerante; a partir de la ecuación 2-13 del capítulo 2, se calculó la cantidad de energía radiativa incidente ( $Q_0$ ), este valor se presenta en la tabla 4.3. Retomando la ecuación 2-14 del análisis térmico del capítulo 2, se puede despejar el término  $\alpha$ , obteniendo la siguiente ecuación 4.13:

$$\alpha = \frac{\dot{m}c_p(T_s - T_e)}{A_e \rho_1 \rho_2 G_b} = \frac{Q_u}{Q_0} \quad 4.13$$

De la ecuación 4.13, se calcula que la fracción de energía que logra ser removida por refrigeración representa el 22% del total de la energía que incide sobre el blanco lambertiano. Para las condiciones en que se operó el blanco lambertiano, se tiene un promedio de absorptividad  $\alpha = 0.22$  para una pantalla de aluminio con tratamiento de superficie de “sand-blasteado”, puede observarse que éste valor carece de unidades.

En la bibliografía es escasa la información acerca de las propiedades de los materiales, sin embargo se reportan valores de absorptividad del aluminio en un intervalo a diferentes acabados del material que van desde 0.09 para aluminio pulido a 0.15 para hoja de aluminio, [Yunus Cengel, 2007]. Otros valores reportados de absorptividad del aluminio varían del 0.1 para aluminio altamente pulido a 0.2 para aluminio pulido [Siegel, 2002]. Como se puede observar los valores reportados en la bibliografía varían y es escasa la información sobre cómo fueron obtenidos dichos valores, la pureza del material, etc.

El valor de absorptividad ( $\alpha = 0.22$ ) calculado para la placa de aluminio utilizada en este trabajo se nota mayor que los reportados, esto pudiera atribuirse a las características del material, su composición debido a que no es aluminio puro y al tratamiento superficial de sand blasting, sin embargo este valor calculado puede considerarse aceptable.

#### 4.6 Análisis alternativo de pérdidas de energía en blanco lambertiano

Retomando el análisis calorimétrico de la sección anterior, puede apreciarse que del total de la energía solar concentrada, sólo el 22% de ésta, fue removida por el fluido refrigerante, lo que deja como incógnita saber en donde se perdió el 78% de la energía faltante.

Retomando el balance de energía en la superficie de la placa, se conoce la cantidad de energía solar concentrada  $Q_0$  y también se conoce la cantidad de energía removida por el fluido refrigerante  $Q_u$ , haciendo un ajuste en el balance de energía, que incluye la fracción de energía que se pierde por radiosidad  $Q_J$ , es decir energía reflejada mas emitida, se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_0 = Q_J + Q_c + Q_u \quad 4.14$$

Del balance de energía queda como incógnita el término  $Q_c$ , que representa las perdidas convectivas. En la figura 4.11 se muestra un esquema del ajuste en el balance de energía en la superficie.

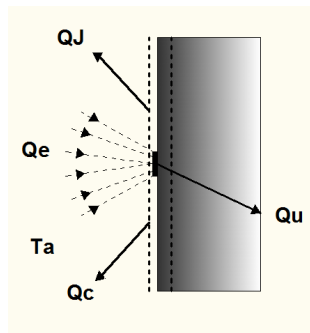


Fig.4.11 Balance de energía en la superficie.

A manera de hacer más completo el balance de energía en la superficie del blanco lambertiano, durante la experimentación se colocó un pirheliómetro orientado hacia el blanco lambertiano, este instrumento mide la radiación solar directa; aquí se utilizó para medir la radiación reflejada por el blanco lambertiano. Colocado a una distancia de 2.95 m como el ángulo de visión del instrumento es de  $5^\circ$ , el instrumento tiene un campo de visión de 24.5 cm de diámetro, lo cual es suficiente para observar el diámetro de la pantalla lambertiana, ver figura 4.12.



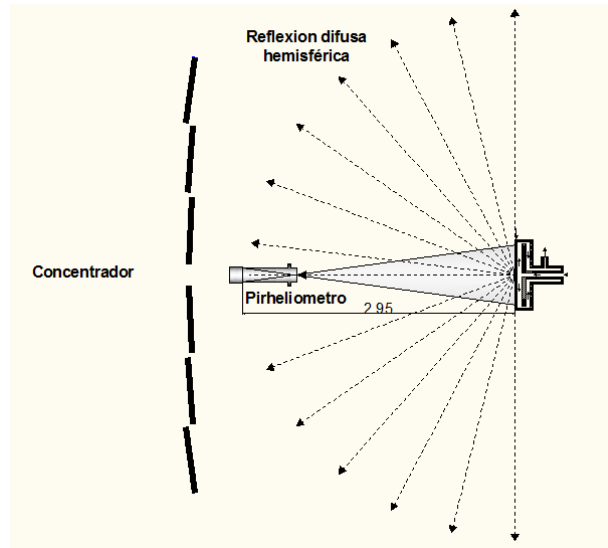


Fig. 4.12 Esquema de la instrumentación para medir la energía reflejada por medio de un pirheliómetro

Como se ha mencionado, el pirheliómetro es el instrumento utilizado para medir el flujo de radiación solar directa, lo cual nos da la medida en watts sobre metro cuadrado. En la figura 4.13 se muestran fotografías del instrumento colocado en el eje focal del sistema concentrador, y orientado hacia el blanco lambertiano refrigerado.

Para estimar la parte de la energía que está siendo reflejada por el blanco lambertiano, se mide con el pirheliómetro la luz solar que es reflejada por la superficie lambertiana. Considerando que la superficie utilizada es una lambertiana, se supone que la intensidad de luz solar que refleja es la misma en todas direcciones, con base en esto, se puede conocer el área de la semiesfera de radio 2.95 m, (distancia de la placa al sensor del pirheliómetro), se considera la semiesfera, puesto que la superficie refleja solo con la parte frontal y no en todas direcciones, el área de la semiesfera de radio 2.95 m es igual a  $54.67 \text{ m}^2$ . Al multiplicar la medida de flujo radiativo registrada por el pirheliómetro, por el área superficial, se obtiene la cantidad de energía que está siendo reflejada.

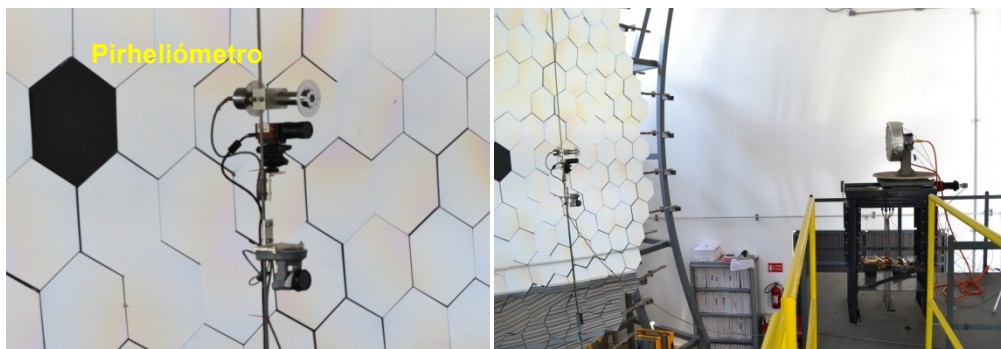


Fig. 4.13 Pirheliómetro orientado para medir la radiación directa del blanco lambertiano.

En la tabla 4.6 se muestran los datos que permiten hacer el cálculo con el ajuste en el balance de energía. En la primera columna se muestra el porcentaje de atenuación, en la segunda columna se presenta la cantidad de energía solar concentrada. La tercera columna muestra la medida del flujo radiativo medida con el pirheliómetro. En la cuarta columna “watts emitidos por radiación ( $Q_r$ )” se muestra el cálculo de la cantidad de energía radiada, es decir el producto de la medida del pirheliómetro por el área de la semiesfera.

Conociendo la cantidad total de energía incidente  $Q_0$  y la cantidad de energía  $Q_r$ , se obtiene la proporción que forma ésta del total, la cual se presenta en la columna cinco en valores de porcentaje y representa para el 68% a una apertura del atenuador del 100%. Para ese mismo porcentaje de apertura del atenuador, se conoce la cantidad de energía removida por el fluido la cual es del 21%, sumando ambos valores  $Q_r + Q_u$ , se conoce que ambas pérdidas suman el 89% respecto del total, lo cual deja como incógnita un 11% de pérdidas, las cuales pueden atribuirse a pérdidas convectivas.

Se observa que el porcentaje de energía removida por refrigeración  $Q_0$  permanece casi constante, representando un promedio del 22% del total. Para el caso del porcentaje de la energía  $Q_r$  se observa que mientras disminuye el valor de apertura del atenuador, los valores de la columna “% Energía Radiada  $Q_r$ ” aumentan en un rango que va del 68% al 76%. Es lógico pensar que a mayores porcentajes de apertura del atenuador se tienen mayores temperaturas, lo cual favorece y hace más significativas las pérdidas convectivas, mientras que a bajas temperaturas las pérdidas convectivas se hacen menos significativas y dominan las pérdidas radiativas. Por esta misma razón es que puede apreciarse que al momento de sumar  $Q_r + Q_u$ , la cantidad de energía faltante del 100% es menor a porcentajes de atenuación menores.

Tabla 4.6 Perdidas de energía totales por radiosidad y por calor removido por refrigeración.

% Atenuador	$Q_0$ Watts $A_e \rho_1 \rho_2 G_b$	Rad Pirheliómetro W/m <sup>2</sup>	Watts emitidos por radiosidad ( $Q_r$ )	% Energía Radiada ( $Q_r$ )	$\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$ $Q_u$ (W)	% Energía Removida ( $Q_u$ )	$Q_u + Q_r$
<b>100%</b>	13109.4	162.1	8865.2	68%	2756.6	21%	89%
<b>90%</b>	12883.4	160.6	8779.9	68%	2590.8	20%	88%
<b>80%</b>	11219.4	140.6	7688.5	69%	2353.0	21%	90%
<b>70%</b>	9636.8	122.6	6701.0	70%	1933.7	20%	90%
<b>60%</b>	7706.5	101.6	5553.2	72%	1683.4	22%	94%
<b>50%</b>	6350.9	85.1	4652.7	73%	1448.7	23%	96%
<b>40%</b>	5155.2	69.7	3808.4	74%	1167.1	23%	97%
<b>30%</b>	3743.9	51.7	2826.9	76%	848.0	23%	98%
<b>20%</b>	2585.5	35.7	1949.9	75%	582.0	23%	98%
<b>10%</b>	1413.8	19.6	1072.8	76%	291.0	21%	96%

# Capítulo 5

## Conclusiones

En este trabajo se llevó a cabo la descripción y puesta en operación de una pantalla lambertiana refrigerada para el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del CIE-UNAM. El blanco lambertiano consiste de una placa plana con acabado superficial de “sand-blasteado” con la cual se consigue una reflexión difusa para la toma de imágenes de la luz solar concentrada con las primeras dos ópticas de espejos del sistema concentrador, y de un intercambiador de calor de placa plana cuya principal función es la de refrigerar la pantalla para evitar que se funda.

Retomando el objetivo general del presente trabajo, el cual consiste en determinar la potencia de concentración del HSAFR, se caracterizó y operó un blanco lambertiano refrigerado con el cual a partir de resultados experimentales, se planteó una metodología para el análisis y procesamiento de imágenes. La puesta en operación del blanco lambertiano incluye la instrumentación para la campaña experimental de toma y procesamiento de imágenes para determinar la distribución y niveles de la concentración solar, así como el análisis térmico del intercambiador de calor para calcular las pérdidas de energía por calor removido.

El objetivo general se cumplió de la siguiente manera, para la determinación de los niveles y la distribución de la radiación y concentración solar, se colocó una cámara monocromática CCD en el eje focal y al centro del sistema de concentración. Se propuso la metodología para la toma de imágenes en formato de ocho bits el cual ofrece un rango dinámico de 256 valores en escala de grises (valores de 0 a 255).

A una apertura del atenuador del 100%, se le colocaron a la cámara CCD filtros neutros que únicamente reducen la intensidad de luz para evitar tomar imágenes saturadas, es decir con valores por encima de 255. Una vez ajustados los filtros al

100% del atenuador se mantuvieron fijos para tomas de imágenes con porcentajes menores de atenuación.

En los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes con la metodología propuesta, se determinaron valores de concentración ópticas de alrededor de 6 000 soles de concentración con las dos primeras ópticas de espejos con que se trabajaron. Respecto a la metodología se encontró que dejar fijo el ajuste de la intensidad de luz con los filtros en la cámara CCD para el 100% de apertura de atenuación, provoca que para la toma de imágenes a cada decremento de porcentaje de atenuación el rango dinámico registrado por la cámara también va disminuyendo lo cual aunque es lógico, es poco favorable para hacer el análisis y procesamiento de imágenes puesto que las imágenes con menor rango dinámico, dificulta la comparativa de perfiles de distribución de radiación.

Los objetivos particulares del trabajo se cumplieron de la siguiente manera, respecto al diseño térmico y mecánico del blanco lambertiano, se describió el funcionamiento y se presentan los planos del diseño. También dentro del diseño, una parte importante es la caracterización de la superficie utilizada.

La primera parte experimental consiste en la caracterización de la superficie lambertiana que se propuso como blanco lambertiano para recibir la radiación solar concentrada incidente. Para este caso se propuso una placa de aluminio con acabado superficial de *sand blasting* con la cual se difuminaron las marcas superficiales de maquinado y se obtuvo una superficie opaca uniforme libre de impurezas de grasa y óxido.

Se realizaron dos experimentos para la caracterización de la superficie de la pantalla lambertiana. En el primer experimento, se determinó la tendencia que sigue la variación en la intensidad de luz reflejada por la superficie lambertiana y una hoja de papel blanco, cuando se hace variar el ángulo de la radiación solar incidente. Las tendencias descritas por cada superficie se compararon con la tendencia ideal la cual es una función coseno. Se determinó que la superficie de la hoja de papel tiene una tendencia igual a la tendencia ideal, es decir, es una superficie lambertiana real; mientras que la placa de aluminio no lo es en su totalidad, es decir, tiene direcciones de reflexión preferenciales.

El segundo experimento sobre superficies, consistió en determinar la forma de reflexión por la placa de aluminio con *sandblasting*. Del experimento se determinaron las gráficas polares que se presentan en la figura 2.11 del capítulo 2, que muestran que aunque la superficie de la placa de aluminio no es lambertiana en su totalidad, se aproxima a serlo, teniendo como direcciones preferenciales el rango angular entre  $120^\circ$  y  $100^\circ$ . Basados en los resultados obtenidos de la caracterización de la

superficie de aluminio, se consideró aceptable el comportamiento de la placa como una superficie lambertiana.

Referente al diseño térmico, se planteó un balance de energía en la superficie del blanco lambertiano, el cual fue completado con un análisis alternativo presentado en el capítulo 4, de los estudios de las pérdidas por calor removido por el fluido refrigerante, se determinó que la pantalla lambertiana utilizada, tiene una absorptancia promedio del 22% del total de energía de entrada por el flujo radiativo concentrado.

Los demás objetivos generales, como la construcción y la puesta en operación, fueron cumplidos puesto que el blanco lambertiano sirvió para realizar las pruebas experimentales y obtener los perfiles de distribución de la potencia solar concentrada.

### **Recomendaciones**

A cerca de la caracterización de la superficie lambertiana, se recomienda hacer pruebas con diferentes materiales. También probar distintos grados de arena en el procedimiento de sand blasting. Incluso hacer un análisis microscópico de la rugosidad de la superficie tratada, para poder conocer si existe una relación de la rugosidad a nivel microscópico con el comportamiento lambertiano.

Respecto a la toma y procesamiento de imágenes, se recomienda que al trabajar imágenes a 8 bits a diferentes porcentajes de apertura del atenuador, para cada imagen que se tenga que tomar, se ajusten los filtros neutros en la cámara para conservar un rango dinámico en cada imagen dentro de la misma escala. Otra opción para hacer análisis de imágenes es trabajar con imágenes a 16 bits con el cual se tiene un rango dinámico de 65 537 (valores de 0 a 65 536).

Los resultados de las imágenes tomadas con la cámara CCD muestran un contorno del spot no uniforme, es decir no es una figura con un contorno que tenga simetría, esto puede atribuirse principalmente a errores de alineación de las facetas tanto del sistema de concentración como del heliostato, por lo cual se recomienda verificar y corregir según sea el caso dichas alineaciones.

Los niveles de concentración obtenidos con los perfiles equivalentes, muestran que no son proporcionales los decrementos con respecto al porcentaje de atenuación por lo cual se recomienda trabajar en una caracterización del elemento atenuador. También se recomienda una caracterización del HSAFR con otros métodos como por medición de potencia térmica total incidente en la zona focal por medio de un calorímetro de cavidad como el CAVICAL.

---

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

Acosta R., 2001. Estudio teórico experimental de la transferencia de calor en la placa absorbadora del calorímetro que actúa como receptor del DEFRAC. Tesis de Maestría, CIE-UNAM, Temixco, Mor.

Cengel., Michael A. Boles, 2003, Termodinámica, 4ta. Edición, Mc Graw Hill.

Cengel, 2007, Transferencia de calor y masa, un enfoque practico, 3ra. Edicion, Mc Graw Hill Interamericana.

Cruz Sesma Felipe, 1997, Diseño, construcción y prueba de un calorímetro para el DEFRAC (**D**ispositivo para el **E**studio de **F**lujos **R**adiativos **C**oncentrados), tesis de maestría en ciencias en ingeniería mecánica, - Opción térmica.

Energías renovables, 2010, 25 años de la UNAM en Temixco, Centro de Investigación en Energía,

Estrada C. A., Cervantes J. G., 1995, Convective heat transfer in a disk-receiver of a solar concentrated radiative flux measuring system. Proceedings of the 30<sup>th</sup> Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Vol. 2, pag. 581-584. American Society of Mechanical Engineering, USA.

Estrada C. A. , Jaramillo O. A., Acosta R., Arancibia-Bulnes C. A., 2007, Heat transfer analysis in a calorimeter for concentrated solar radiation measurements, Solar Energy 81 (2007) 1306-1313

Gómez González Emilio, 2006, Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría v.1.0, ESI-Universidad de Sevilla.

Holman J. P., 1998, Transferencia de calor, 8.<sup>a</sup> edición, 1.<sup>a</sup> en español, Mc Graw Hill.

Holman J. P. 1982, Métodos experimentales para ingenieros, Mc Graw Hill.

Incropera Frank P., David P. de Witt, 1999, Fundamentos de Transferencia de Calor, 4<sup>a</sup> edición, Prentice Hall, México 1999

Jaramillo O. A., Pérez Rábago C. A., Arancibia-Bulnes C. A., Estrada C. A., 2008, A flat-plate calorimeter for concentrated solar flux evaluation, Solar Energy 33 (2008) 2322

Leithold Louis,1987, El cálculo con geometría analítica, quinta edición, Harla 1987.

Modest F., 2003, Radiative Heat Transfer, second edition,

Neumann A. and Groer U., 1996, Experimenting with concentrated sunlight using the DLR solar furnace

---

Pérez Rábago Carlos Alberto, 2003, Diseño, Construcción y Puesta en Operación de un Calorímetro de Cavidad Cónica para un Concentrador Solar de Foco Puntual (DEFRAC), tesis de maestría en ingeniería, – Energía (Fototérmica)

Pérez-Rábago C. A., Marcos M. J., Romero M., Estrada C. A., 2006, Heat transfer in a conical calorimeter for measuring thermal power of a point focus concentrator, Solar Energy 80 (2006) 1434-1442.

Pitz-Paal R., 2007. High Temperature Solar Concentrators, in Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK.

Riveros Rosas David, 2008, Diseño óptico del horno solar de alto flujo del CIE-UNAM, Tesis de doctorado en ingeniería, - Energía (Solar fototérmica)

Riveros-Rosas D., Herrera-Vázquez J., Pérez-Rábago C. A., Arancibia-Bulnes C. A., Vázquez-Montiel S., Sánchez-González M., Granados-Agustín F., Jaramillo O. A., Estrada C. A., 2010, Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico. Solar Energy 84 (2010) 792-800.

Rueda Cornejo Ma. Elena, 1996, Transferencia de calor en un receptor circular plano con flujo radial para un sistema de concentración solar con varios espejos, tesis de maestría en energía solar, - Opción fototérmica

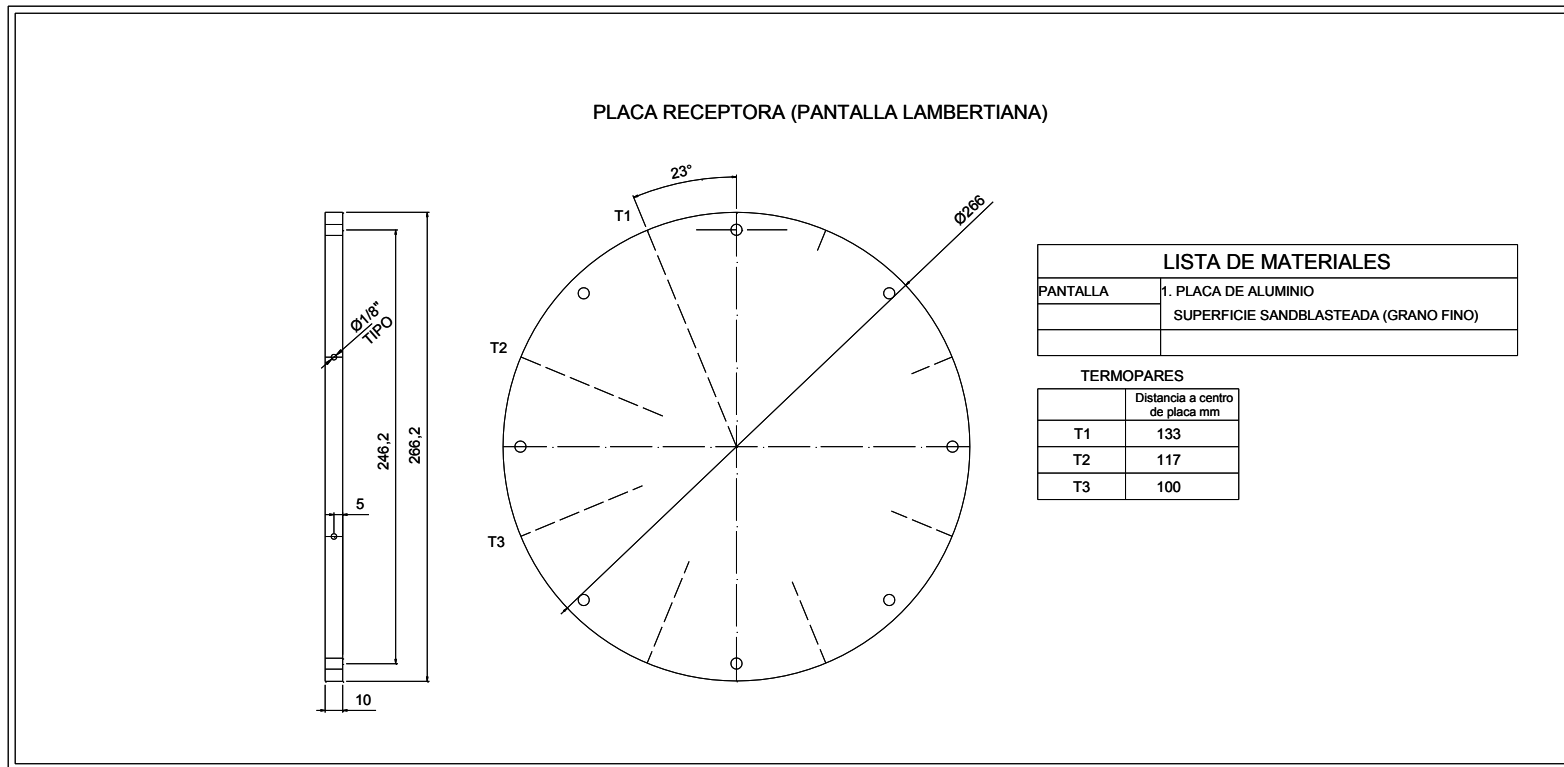
Siegel Robert and John Howell, 2002, Thermal Radiation Heat Transfer, 4<sup>th</sup> edition, Taylor & Francis.

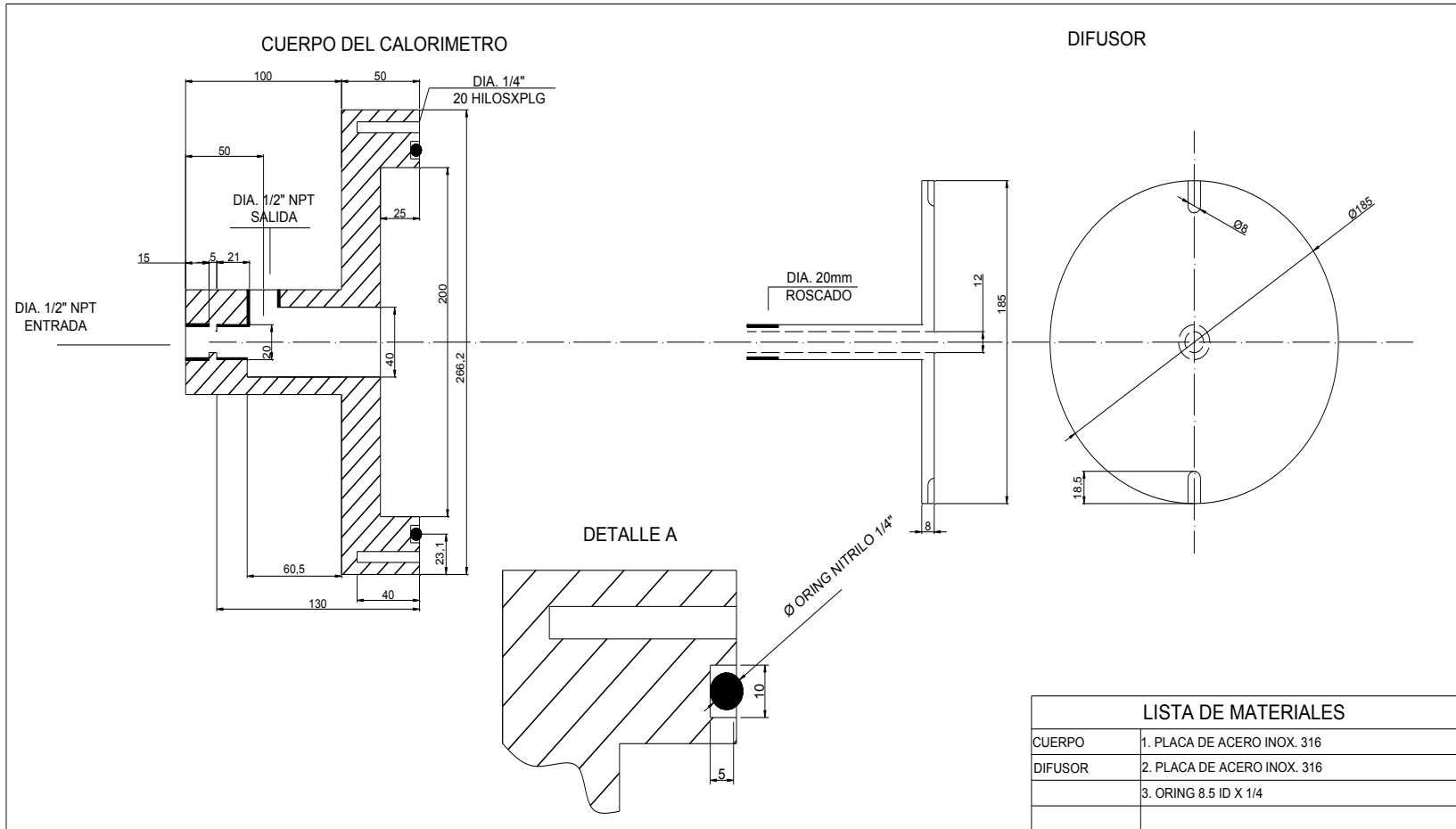
Winter, C.J., Sizmann R.L., Vant-Hull L.L., 1991. Solar Power Plants, Fundamentals, Technology, Systems, Economics. Springer Verlag, New York.



## Apéndice A

### Planos del intercambiador de calor de placa plana





---

## Apéndice B

### Programas para análisis de imágenes

#### Rutina de instrucciones, “Radiación”

```
fprintf('\n');  
fprintf('\n');  
fprintf('=====PROCESAMIENTO DE IMAGENES');  
fprintf('\n');  
fprintf('\n');  
fprintf('\n');  
fprintf(' == Paso1, abre tu imagen de target y a la variable  
"cdata" nombrala " target" ');  
fprintf('\n');  
fprintf(' == Paso2, abre tu imagen a procesar');  
fprintf('\n');  
fprintf(' == Paso4, obtén coordenadas, de la distancia de  
referencia de la imagen target');  
fprintf('\n');  
fprintf(' == Paso3, escribe la instrucción "radiacion2" para  
continuar');
```

#### Rutina de adquisición de datos, “Radiacion2”

```
fprintf('\n');  
fprintf('\n');  
lb = input('cual es el el valor de irradiancia en W/m2: ');
```

---

```

Rhoh = input('cual es el valor de reflectividad del heliostato
(entre 0 y 1) : ');
Rhoc = input('cual es el valor de reflectividad del concentrador
(entre 0 y 1): ');
Ac = input('cual es el area del concentrador en m2: ');
Atenuacion = input('cual es el porcentaje de apertura del
atenuador (entre 0 y 100): ');
Pespacio= input('cual es el porcentaje de área de espaciamiento
entre espejos (entre 0 y 100): ');
Psombra = input('cual es el porcentaje del area de
sombreamiento (entre 0 y 100): ');
fprintf('\n');
Qb = Ib * Rhoh * Rhoc * Ac *Atenuacion/100 * (1-(Pespacio/100))*
(1-(Psombra/100));
fprintf('\n');
fprintf('\n');
fprintf('\n');
dtarget= input('cual es la distancia de referencia del target en
metros: '); %Esta distancia servira para calcular el tamaño del
pixel
x1= input('cual es la coordenada x1 del pixel (imagen target): ');
%primer coordenada para determinar el tamaño de pixel
x2= input('cual es la coordenada x2 del pixel (imagen target): ');
%primer coordenada para determinar el tamaño de pixel
tpixel = dtarget/(x2 -x1);
Apixel = tpixel * tpixel;
fprintf('\n');
%fprintf('\n La potencia concentrada es = %f Watts', Qb);
%fprintf('\n El area de pixel es = %f m2', Apixel);

```

Rutina de procesamiento de datos, “conversión imagen v2”

```

fprintf('\n');
fprintf('\n');
r = input ('¿Cuál es el valor del ruido? = ');
clean = cdata - r;

```

```
cleanm = clean.*mascara;  
unos = cleanm./cleanm;  
suma = sum (unos);  
suma = suma';  
suma = sum (suma); % suma total del area de mancha con matriz  
de 0 y 1  
maximo = max (clean);  
maximo = maximo';  
maximo = max (maximo);  
maximod = double(maximo);  
cleand = double(clean);  
cleand = cleand.*mascarad;  
unit = cleand./maximod;  
Aspot = Apixel * suma ;  
lsp = Qb / Aspot; %Radiacion solar promediada  
sumagris = sum (cleand);  
sumagris = sumagris';  
sumagris = sum (sumagris); % suma total de intensidades de  
grises  
grisp = sumagris / suma; %intensidad promedio de grises  
cte = lsp / grisp ;  
imgfinal = cleand .*cte;  
lsm = maximod *cte; %irradiancia del spot maximo  
cpico = lsm / lb ;  
imgsoles = unit .* cpico;
```

---

## Anexo

### Cálculo de incertidumbre

Si consideramos un valor calculado  $R$  en función de varias mediciones ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ) se puede expresar de la siguiente forma, [Holman,1982]:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Designando a  $w_r$  como la incertidumbre en el resultado y  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  como las incertidumbres de las variables independientes respectivas; entonces la incertidumbre en el resultado esta dado por [Holman,1982]:

$$w_r = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

Para calcular la incertidumbre en los cálculos de los niveles de concentración se evalúan las incertidumbres de las ecuaciones: 2.7 y 2.13 presentadas en el capítulo 2. También se analiza la incertidumbre en las operaciones presentadas en el capítulo 4 del análisis de imágenes, obteniéndose una incertidumbre de alrededor del 8%