



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SOLAR FOTOTÉRMICA

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y TÉRMICA DEL HORNO SOLAR DEL IER

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RICARDO ARTURO PÉREZ ENCISO

TUTOR PRINCIPAL
CLAUDIO ALEJANDRO ESTRADA GASCA, IER-UNAM
COMITÉ TUTORAL
CARLOS ALBERTO PÉREZ RÁBAGO, IER-UNAM
DAVID RIVEROS ROSAS, IGF-UNAM
CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES, IER-UNAM
HERNANDO ROMERO PAREDES RUBIO, PROGRAMA DE MAESTRÍA Y
DOCTORADO EN INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. ENERO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes
Secretario: Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca
Vocal: Dr. Hernando Romero Paredes Rubio
1^{er.} Suplente: Dr. David Riveros Rosas
2^{do.} Suplente: Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, México.

TUTOR DE TESIS:

NOMBRE

FIRMA

Dedicatoria

Dedico esta tesis con todo mi amor:

A mi esposa Viviana.

A mis hijos Adhara y Arath.

Agradecimientos

Al Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca, director de esta tesis, por su visión, apoyo, disposición y orientación; a los miembros de mi comité tutorial: Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago, Dr. David Riveros Rosas, Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes y Dr. Hernando Romero Paredes Rubio, les agradezco sus observaciones y sugerencias para mejorar este documento.

Al Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM) al permitirme el uso de sus instalaciones para realizar este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante mis estudios y al proyecto (123767), Laboratorio Nacional de sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS).

A la M.I. Estefanía Brito Bazan por su apoyo técnico en el desarrollo de software y control, al Ing. Javier Licurgo Pedraza, al M.I. Ernesto Anguera Romero y al Ing. Leonel Reyes Ochoa, por su apoyo técnico. A todos ellos por sus observaciones y comentarios, y por su amistad.

Al Dr. Luar Moreno Álvarez y al Dr. Eduardo Venegas Reyes por sus asesorías y apoyo, y por su amistad.

A los integrantes de la secretaría técnica del IER: al Arq. Francisco Rojas y al Ing. Ricardo Domínguez por su disposición y apoyo técnico.

A los integrantes del taller mecánico del IER: Ing. Jaime Villalobos, Gregorio Hernández, Arturo González, Javier Ayala y Esteban Luna, por el apoyo técnico en la fabricación de todos los dispositivos requeridos en este trabajo de investigación.

Al Ing. Rogelio Morán Elvira por su apoyo técnico y asesorías.

Al Ing. Javier Arriaga Petrona y al técnico Noé López Hernández, integrantes del INAOE, por su apoyo técnico. A Maribel Fernández por su apoyo y asesoría en la realización de trámites administrativos.

A mi esposa Viviana por apoyarme en esta aventura y a mis hijos: Adhara y Arath, por darme una razón más para seguir adelante.

A mis padres: Luz Miryam Enciso Dueñas y Mario Fidencio Pérez Carlos, por darme la oportunidad de vivir, por su apoyo y por la formación que me dieron. A mis hermanas y hermano: Rozmahely, Kateryna, Ydiz y Mario, por su apoyo.

A todos y cada una de las personas que tuvieron alguna aportación en este trabajo de investigación.

Índice

Agradecimientos	<i>iv</i>
Resumen	<i>vi</i>
Abstract	<i>vii</i>
Lista de figuras	<i>viii</i>
Lista de tablas	<i>xii</i>
1. Introducción	<i>1</i>
1.1 Energía y medio ambiente	<i>1</i>
1.2 Tecnologías termosolares	<i>2</i>
1.3 Horno solar como instrumento de investigación	<i>11</i>
1.4 Revisión bibliográfica	<i>15</i>
1.5 Objetivos	<i>20</i>
2. El Horno Solar del IER y los métodos generales de evaluación	<i>22</i>
2.1 Descripción del Horno Solar del IER	<i>22</i>
2.2 Método teórico de trazado de rayos	<i>32</i>
2.3 Método experimental. Cámara CCD y superficie lambertiana	<i>43</i>
2.4 Métodos para determinar la potencia térmica	<i>47</i>
3. Caracterización Óptica del Horno Solar del IER	<i>51</i>
3.1 Error óptico global del HoSIER	<i>51</i>
3.2 Dispositivo para la toma de imágenes del spot solar. Placa Plana Lambertiana Refrigerada	<i>54</i>
3.3 Niveles de concentración solar del HoSIER a partir del “Factor de Horno”	<i>60</i>
3.4 Niveles de concentración solar del HoSIER a partir de la medición directa del flujo radiativo	<i>61</i>
3.5 Generación de Protosuperficies de intensidad radiativa en la zona focal	<i>62</i>
4. Caracterización Térmica del Horno Solar del IER	<i>68</i>
4.1 Método calorimétrico. Diseño del calorímetro de cavidad cónica	<i>68</i>
4.2 Potencia térmica del HoSIER	<i>82</i>
4.3 Coeficiente de operación del HoSIER	<i>92</i>
4.4 Temperatura máxima	<i>92</i>
4.5 Ficha técnica del HoSIER	<i>97</i>
5. Conclusiones y recomendaciones	<i>99</i>
Referencias.	<i>101</i>
Apéndices.	
A Metodologías para la alineación de los espejos del heliostato y del concentrador	<i>104</i>
B Esquema de los elementos de ensamble del concentrador del HoSIER	<i>109</i>
C Ecuación de control del atenuador	<i>111</i>

Resumen

En este trabajo de investigación se determinó el error óptico global, el pico máximo de concentración solar y la potencia del Horno Solar del IER, por medio de su caracterización óptica y térmica, aplicando metodologías novedosas y utilizando dispositivos especializados que son únicos en su tipo.

En la caracterización óptica del horno, se determinaron de manera teórica las distribuciones de flujo radiativo concentrado en la zona focal y se obtuvieron las distribuciones reales por medio de dispositivos que permitieron realizar mediciones de manera directa e indirecta de la radiación solar altamente concentrada en la zona focal.

Para la caracterización térmica, se diseñó y construyó un calorímetro de cavidad para la medición directa de la potencia del horno y se realizaron pruebas de fundición de diversos materiales para conocer la temperatura que es capaz de alcanzar.

Los resultados obtenidos del error óptico, del pico máximo de concentración solar y de la potencia del horno solar del IER mediante su caracterización óptica y térmica, indican que es un instrumento de investigación científica de gran calidad, lo que permitirá realizar pruebas y experimentos en México como se hacen en hornos similares en otras partes del mundo.

Abstract

In this work of investigation was determined the global optical mistake, the maximum beak of solar concentration and the power of the Solar Furnace of the IER, by means of his optical and thermal characterization, applying new methodologies and using specialized devices which are unique in his type.

In the optical characterization of the furnace, the flow distributions of radiative concentrated in the focal zone was decided in a theoretical way and the actual distributions were obtained by means of devices that allowed realizing measurements of a direct way and hint of the solar radiation highly concentrated in the focal zone.

For the thermal characterization, a calorimeter of cavity was designed and constructed for the direct measurement of the power of the furnace and was performed tests of smelting of diverse materials to know the temperature that is capable of reaching.

The results obtained of the optical mistake, of the maximum beak of solar concentration and of the power of the solar furnace of the IER by means of his optical and thermal characterization, indicate that it is an instrument of scientific investigation of great quality, allowing realizing tests and experiments in México as those who are done in furnaces that they find in other parts of the world.

Lista de figuras

1.1	<i>Esquema de una lente convergente convencional tipo lupa</i>	3
1.2	<i>Esquema de una lente tipo fresnel</i>	4
1.3	<i>Sistemas de concentración solar de reflexión. tipo plato parabólico.(Prototipo de la empresa sbp EuroDish de 10kW, en Odeillo, Francia)</i>	4
1.4	<i>Sistemas de concentración de reflexión. Tipo canal parabólico.(complejo de plantas SEGS en el desierto de Mojave, California, USA)</i>	5
1.5	<i>Sistemas de concentración solar. La figura a) corresponde a un concentrador solar tipo canal parabólico de enfoque lineal, la b) corresponde a un concentrador solar tipo fresnel lineal, la c) corresponde a un concentrador tipo plato parabólico de foco puntual y la d) corresponde a un concentrador tipo torre central</i>	6
1.6	<i>Imagen de la planta PSTFAR</i>	10
1.7	<i>Imagen de la planta de torre central CPH</i>	10
1.8	<i>Imagen del Horno Solar del IER HoSIER</i>	11
1.9	<i>Esquema general de un horno solar</i>	13
1.10	<i>Grafica de la temperatura de cuerpo negro en función de la intensidad de flujo radiativo absorbido</i>	14
1.11	<i>Esquema de los hornos solares en Odeillo (Francia). En el costado izquierdo del edificio se encuentra el horno de 6.5 kW con eje óptico vertical; el costado derecho conforma el concentrador de 2160m² del horno de 1000kW</i>	16
1.12	<i>Imagen del Horno Solare de 1000kW en Odeillo (Francia).</i>	16
1.13	<i>Vista de planta del horno solar del DLR (Colonia, Alemania) con configuración óptica “fuera del eje”. El punto focal se encuentra fuera del eje del sistema heliostato-concentrador</i>	17
1.14	<i>Instalaciones del horno solar de Colonia, Alemania. De izquierda a derecha se observa: el concentrador, el laboratorio donde se encuentra el punto focal y el heliostato</i>	17
1.15	<i>Esquema del ángulo de borde (φ_{rim}) de un concentrador solar en forma de disco parabólico y del ángulo del cono solar (θ).</i>	18
2.1	<i>Fotografía del H81 mostrando el arreglo de los 30 espejos</i>	23
2.2	<i>Esquema de una platina</i>	23
2.3	<i>Esquema de los marcos de las facetas, a la izquierda está el marco grande que tiene 16 platinas y el de la derecha es el marco pequeño con 12 platinas</i>	24
2.4	<i>Esquema del arreglo óptico de concentración solar, en el que se identifican los 5 grupos.</i>	26
2.5	<i>Arreglo de los 409 espejos del sistema óptico de concentración</i>	26
2.6	<i>Elementos que soportan a los espejos del concentrador</i>	27
2.7	<i>Imagen del mecanismo de movimiento de las persianas del atenuador</i>	28
2.8	<i>Atenuador visto desde el exterior del HoSIER</i>	28
2.9	<i>Mesa de trabajo con movimiento en tres ejes</i>	29
2.10	<i>Esquema de los dispositivos del sistema de refrigeración</i>	30
2.11	<i>Pantalla principal del sistema de control del HoSIER</i>	31

2.12	<i>Figura esquemática de la trayectoria de un rayo de luz con el método de trazado de rayos</i>	32
2.13	<i>Esquema del ángulo del cono solar</i>	34
2.14	<i>Perfil del Sol uniforme</i>	35
2.15	<i>Perfil de distribución del Sol estándar</i>	36
2.16	<i>Comparativa de los perfiles de las distintas formas solares</i>	37
2.17	<i>Esquema de la reflexión de un rayo de luz</i>	38
2.18	<i>Error por rugosidad.</i>	39
2.19	<i>Error de ondulación o de pendiente.</i>	39
2.20	<i>Ejemplo de la convolucion de dos funciones</i>	41
2.21	<i>Filtro de Bayer utilizado en numerosas cámaras digitales</i>	43
2.22	<i>Efecto de la variación del área proyectada en una superficie respecto al ángulo de observación</i>	45
2.23	<i>Geometría involucrada en un emisor lambertiano</i>	46
2.24	<i>Efectos de la reflexión e intensidad en una superficie lambertiana</i>	47
3.1	<i>Imagen del spot de la modelación en SolTrace con un error óptico de 2 mrad y con una escala de intensidades de flujo en kW/m^2</i>	52
3.2	<i>Comparativa de los perfiles de distribución de la radiación solar concentrada en el foco del concentrador con errores ópticos de 0 a 4 mrad modelados en SolTrace y las regiones que presentan las máximas diferencias absolutas comparadas con el perfil sin errores</i>	53
3.3	<i>Diferencias punto por punto entre los perfiles con errores de 1 a 4 mrad y el perfil sin error</i>	53
3.4	<i>Esquema de las dimensiones de la placa del PPLR</i>	54
3.5	<i>Esquema de la configuración del sistema de refrigeración de la placa del PPLR</i>	55
3.6	<i>Imagen del sensor de flujo radiativo tipo Gardon</i>	55
3.7	<i>Resultado de la modelación CFD del sistema de refrigeración del PPLR. la flecha en azul representan la dirección del flujo de entrada de 4 lpm y la naranja de salida</i>	56
3.8	<i>Esquema de los componentes del PPLR</i>	56
3.9	<i>Imágenes del PPLR</i>	57
3.10	<i>Imagen de la cámara CCD utilizada para tomar imágenes del spot</i>	58
3.11	<i>Imagen del spot real del HoSIER en escala de grises (0 – 255).</i>	58
3.12	<i>Perfil real de la distribución de la radiación solar concentrada por el HoSIER en el foco del concentrador</i>	59
3.13	<i>Comparativa entre los perfiles modelados en SolTrace y el real</i>	59
3.14	<i>Imagen del spot, el Gardon y el centroide del spot</i>	62
3.15	<i>Planos paralelos a lo largo del eje óptico del concentrador modelados en SolTrace</i>	63
3.16	<i>Protosuperficies teóricas de radiación solar concentrada en la zona focal del HoSIER, a lo largo del eje óptico del concentrador</i>	64
3.17	<i>Esquema del arreglo experimental para la toma de imágenes de la radiación solar concentrada sobre una superficie lambertiana</i>	65
3.18	<i>Protosuperficies experimentales de radiación solar concentrada en la zona focal del HoSIER, a lo largo del eje óptico del concentrador</i>	66
3.19	<i>Perfiles de distribución de flujo radiativo a lo largo del eje óptico, obtenido a partir de las protosuperficies teóricas y experimentales</i>	67

4.1	<i>Comparativa entre los perfiles del spot solar obtenidos de la función de distribución normal y de la modelación en SolTrace</i>	70
4.2	<i>Esquema de la cavidad del calorímetro en el que se muestra la forma y sus dimensiones y la vista 3D</i>	71
4.3	<i>Comportamiento de la eficiencia de absorción de la cavidad cónica en función del cambio en la temperatura de la pared interna del cono</i>	73
4.4	<i>Distribución de radiación solar concentrada sobre la superficie interna del cono receptor de la cavidad cónica</i>	73
4.5	<i>Comparativa entre los resultados de la modelación en SolTrace y las funciones de las distribuciones de radiación solar concentrada sobre la superficie interna del cono receptor de la cavidad cónica</i>	74
4.6	<i>Cambio de la temperatura sobre la superficie interna del cono receptor de la cavidad cónica en función del tiempo, para distintos valores de h</i>	75
4.7	<i>Esquema de la sección transversal del cono receptor</i>	76
4.8	<i>Perfil de distribución de temperaturas sobre la superficie interna del cono receptor de la cavidad cónica y la relación entre la distribución de radiación solar concentrada</i>	77
4.9	<i>Esquema de la envoltura de la cavidad cónica</i>	77
4.10	<i>Distribución del flujo del agua entre el cono y la envoltura.</i>	78
4.11	<i>Esquema de la cubierta refrigerada</i>	78
4.12a	<i>Vista de corte y con desplazamiento de los elementos del calorímetro</i>	79
4.12b	<i>Vista 3D del calorímetro ensamblado</i>	79
4.13	<i>Esquema de la ubicación de los termopares en la cavidad del calorímetro</i>	80
4.14	<i>Imagen del cono del calorímetro en el que se aprecian los termopares instalados.</i>	81
4.15	<i>Imagen de la cubierta del calorímetro a la que se le está puliendo con lijas finas</i>	82
4.16	<i>Comportamiento del calorímetro y del atenuador a diferentes porcentajes de apertura</i>	83
4.17	<i>Grafica de las temperaturas registradas en el cono del calorímetro a diferentes porcentajes de apertura del atenuador</i>	84
4.18	<i>Imágenes de la radiación solar que queda fuera de la abertura del CAVICAL-2</i>	87
4.19	<i>Imagen de la cubierta del CAVICAL-2 al momento de la medición de la potencia del HoSIER</i>	88
4.20	<i>Imagen del target y una regla graduada necesaria para conocer el tamaño del pixel</i>	89
4.21	<i>Imagen del spot y del sensor de flujo (Gardon)</i>	90
4.22	<i>Temperatura de cuerpo negro en función de la intensidad de flujo radiativo</i>	93
4.23	<i>Distribución de temperaturas en función del perfil del flujo radiativo del spot solar</i>	94
4.24	<i>Imagen del arreglo experimental para la fundición de tungsteno en la que se aprecia el reactor y al grafito</i>	94
4.25	<i>Imagen del reactor con el grafito emitiendo energía térmica después de haber cerrado las persianas del atenuador</i>	95
4.26	<i>Imagen del tungsteno fundido en el grafito</i>	96
4.27	<i>Perfil de la potencia acumulada en función de la distancia radial a partir del centro del spot, el perfil del flujo radiativo del spot y el flujo promedio</i>	98

contenido en el 95% del spot

A1	<i>En la imagen a) se muestra el arreglo de los 30 espejos del H81 y en la b) se indican los elementos que los soportan</i>	105
A2	<i>En la imagen a) se presentan los brazos y las costillas niveladas y en la b) se muestran además los marcos nivelados</i>	106
A3	<i>Alineación de platinas</i>	106
A4	<i>Esquema del sistema óptico de concentración solar, en el que se identifican los 5 grupos</i>	107
A5	<i>En la imagen a) se muestra el arreglo de los 409 espejos del sistema óptico de concentración y en la b) se indican los elementos que los soportan</i>	107
A6	<i>Esquema del método de alineación de espejos del sistema óptico de concentración solar</i>	108
A7	<i>En la imagen a) se muestra la plantilla de alineación con los puntos correspondientes al grupo B y en la b) presenta una imagen de los reflejos de los espejos ya alineados de ese mismo grupo sobre la plantilla de alineación</i>	108
C1	<i>Esquema de las características del atenuador con las persianas traslapadas</i>	111
C2	<i>Esquema del ángulo α y su respectivo triángulo</i>	112
C3	<i>Esquema de las variables de la ecuación C1</i>	112
C4	<i>Resumen de los ángulos β, α y θ</i>	113
C5	<i>Grafica de la ecuación C4</i>	114

Lista de tablas

1.1	<i>Coefficientes típicos para un horno solar de doble reflexión</i>	19
1.2	<i>Hornos solares en el mundo y sus principales características</i>	20
2.1	<i>Horas de operación del HoSIER en función de la temporada del año.</i>	25
3.1	<i>Diferencias absolutas promedio entre los perfiles modelados y el real, en los intervalos de -0.024 a -0.020 y de 0.020 a 0.024</i>	60
3.2	<i>Coefficientes del HoSIER para tres distintos casos</i>	61
4.1	<i>Potencia del HoSIER obtenida con SolTrace</i>	69
4.2	<i>Potencia térmica del HoSIER medida con el calorímetro a diferentes porcentajes de apertura del atenuador</i>	83
4.3	<i>Estimación de los parámetros de las condiciones de uso del HoSIER</i>	84
4.4	<i>Resultados de las modelaciones de la potencia que queda fuera del CAVICAL-2 a diferentes CSR</i>	86
4.5	<i>Factor de corrección del método imagen-gardon para la medición de la potencia concentrada por el HoSIER</i>	91
4.6	<i>Condiciones de operación del HoSIER en la prueba de fundición de tungsteno</i>	96
4.7	<i>Especificaciones del HoSIER en condiciones óptimas de operación</i>	97
C1	<i>Relación de porcentaje de apertura y pulsos del encoder</i>	114

Capítulo 1

Introducción

En el presente capítulo se describe brevemente el estado actual del consumo de energía a nivel mundial, las principales fuentes energéticas, los impactos que estas provocan en el medio ambiente y la alternativa del uso de las energías renovables. Particularmente se describen las tecnologías de concentración solar y las características principales de los hornos solares y los objetivos de este trabajo de investigación.

1.1 Energía y medio ambiente

La energía es un recurso necesario para el desarrollo humano. Hoy en día a nivel mundial las mayores fuentes de energía provienen del petróleo, gas natural y carbón con un *40.8%*, *15.5%* y *10.1%*, respectivamente [WEO, 2013], es decir, el *66.4%* del consumo energético mundial proviene de combustibles fósiles. Por otro lado, la quema de hidrocarburos trae consigo un impacto negativo en el medio ambiente, como son la emisión de gases de efecto invernadero tales como el CO_2 , CH_4 y NO_x causantes del cambio climático que se está presentando en nuestros días y que en el futuro a largo plazo, si se continua con las tendencias actuales de emisiones de gases de efecto invernadero la temperatura global del planeta se podría incrementar hasta unos 6°C , [WEO, 2008]. Es por ello que se debe hacer un uso eficiente de este tipo de fuentes energéticas, así como buscar alternativas que no tengan consecuencias negativas para el medio ambiente. Entre las estrategias que se están implementando, se encuentra el desarrollo de equipos con eficiencias más altas, el ahorro de energía y la búsqueda de nuevas fuentes de energía que puedan abastecer de manera sustentable las demandas energéticas que la humanidad requiere sin que se deteriore el medio ambiente, siendo las energías renovables como la eólica, hidráulica, biomasa, geotermia, y sobre todo la solar, las que presentan una alternativa para mitigar esta problemática.

La energía solar es una fuente de energía renovable que está disponible en toda la faz de la Tierra. A pesar de que no se recibe con la misma intensidad en toda la superficie terrestre, de que varía dependiendo de la temporada del año y de que sólo está disponible durante el

día, la cantidad de energía que recibe la Tierra al año es muy grande. Esto se puede calcular tomando en cuenta el flujo radiativo solar extraterrestre que es de 1367 W/m^2 [Duffie, 1991], si se considera que solo el 58% de éste alcanza a llegar a la corteza terrestre [Wallace, 1977], y tomando en cuenta las dimensiones y geometría de la tierra, se determina que la energía solar recibida es del orden de $2.3 \times 10^{23} \text{ J}$ al año. Si el consumo actual de energía en el mundo es de $3.7 \times 10^{20} \text{ J}$ al año [WEO, 2013], puede deducirse que la energía solar es suficiente para satisfacer esta demanda energética, ya que el consumo anual representa apenas el 0.16% de esta.

México se encuentra en una zona geográfica apta para aprovechar la energía solar, debido a que los niveles de radiación solar que recibe están dentro de la franja de mayor intensidad en el mundo, con valores de insolación promedio superiores a 5.5 KWh/m^2 al día [SWERA].

Para poder aprovechar la energía solar, se requieren dispositivos que permitan modificar las características con las que se recibe de manera natural sobre la faz de la tierra o transformarla a otro tipo de energía. A continuación se describen las tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar.

1.2 Tecnologías termosolares

En la actualidad se podría decir que existen para fines de aplicación, tres ramas de tecnologías solares [Winter, 1991]:

- a) Los sistemas fotovoltaicos, los cuales consisten en la transformación directa de la energía contenida en los fotones, provenientes de la radiación solar, en energía eléctrica, mediante dispositivos semiconductores denominados celdas fotovoltaicas.
- b) Los sistemas fototérmicos, los cuales transforman la energía radiativa del Sol en energía térmica y ésta posteriormente puede ser usada para producir potencia mecánica o eléctrica, a través de máquinas termodinámicas.
- c) Los sistemas fotoquímicos, los cuales utilizan la radiación solar para producir combustibles solares que después pueden ser convertidos en electricidad a través de las celdas de combustibles o depurar sustancias degradando compuestos tóxicos.

En el caso de los sistemas fototérmicos y fotoquímicos es necesario alcanzar medianas y altas temperaturas y para lograrlo se requiere el uso de tecnologías de concentración solar.

Sistemas de concentración solar

La concentración solar tiene por objetivo aumentar la densidad de flujo radiativo o radiación solar directa que se recibe de manera natural sobre la Tierra y esto se logra

mediante dispositivos ópticos que desvían los rayos de Sol a una superficie llamada receptor, provocando con esta concentración, un aumento considerable de la temperatura del receptor y permitiendo operar maquinas térmicas eficientemente o generando reacciones químicas de alta temperatura. Para lograr que la radiación solar directa desviada por los dispositivos ópticos siempre se dirija al receptor, se requieren de mecanismos que les permitan seguir el movimiento aparente del Sol. Existen diversos dispositivos ópticos para lograr el efecto de concentración solar, entre los cuales se encuentran los siguientes:

1. Sistemas ópticos de refracción: que son dispositivos que permiten que la radiación solar pase a través de ellos y por el efecto de refracción y por la forma que tienen, se desvían los rayos solares a la zona focal, y es en el foco donde se ubica el receptor, un ejemplo de este tipo de lentes son las lupas y las lentes de Fresnel [Leutz et al., 1999]. En la figura 1.1 se muestra un esquema de una lente convencional tipo lupa y en la 1.2 una lente tipo Fresnel.
2. Sistemas ópticos de reflexión: los cuales desvían los rayos solares hacia un receptor por efecto de la reflexión, los espejos pueden ser planos, con curvaturas circulares o parabólicas para tener un cierto nivel de concentración. En la figura 1.3 se muestran un sistema del tipo plato parabólico, que desvía los rayos solares hacia un receptor ubicado en la zona focal y en la figura 1.4 un concentrador tipo canal con curvatura parabólica, que desvía los rayos solares hacia su línea focal.

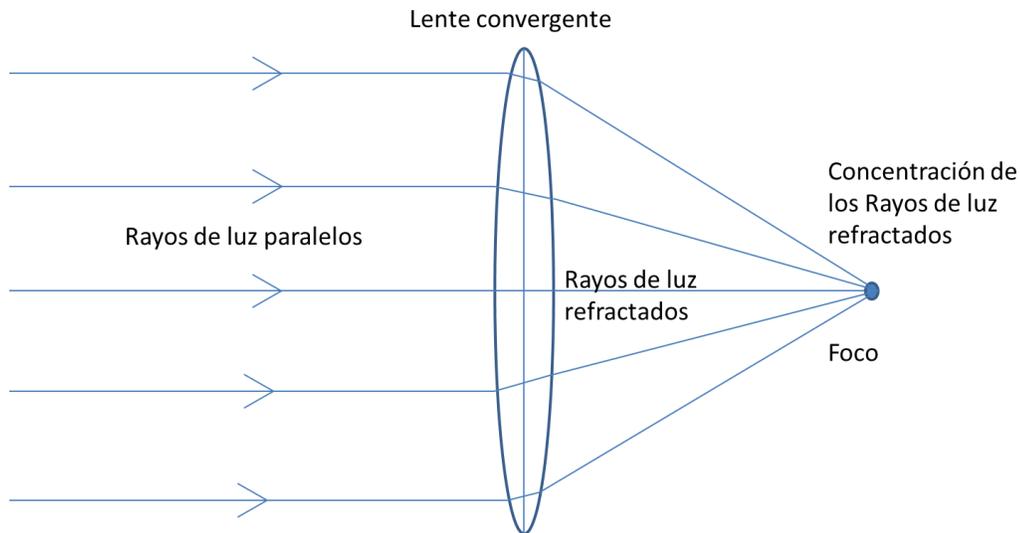


Figura 1.1. Esquema de una lente convergente convencional tipo lupa.

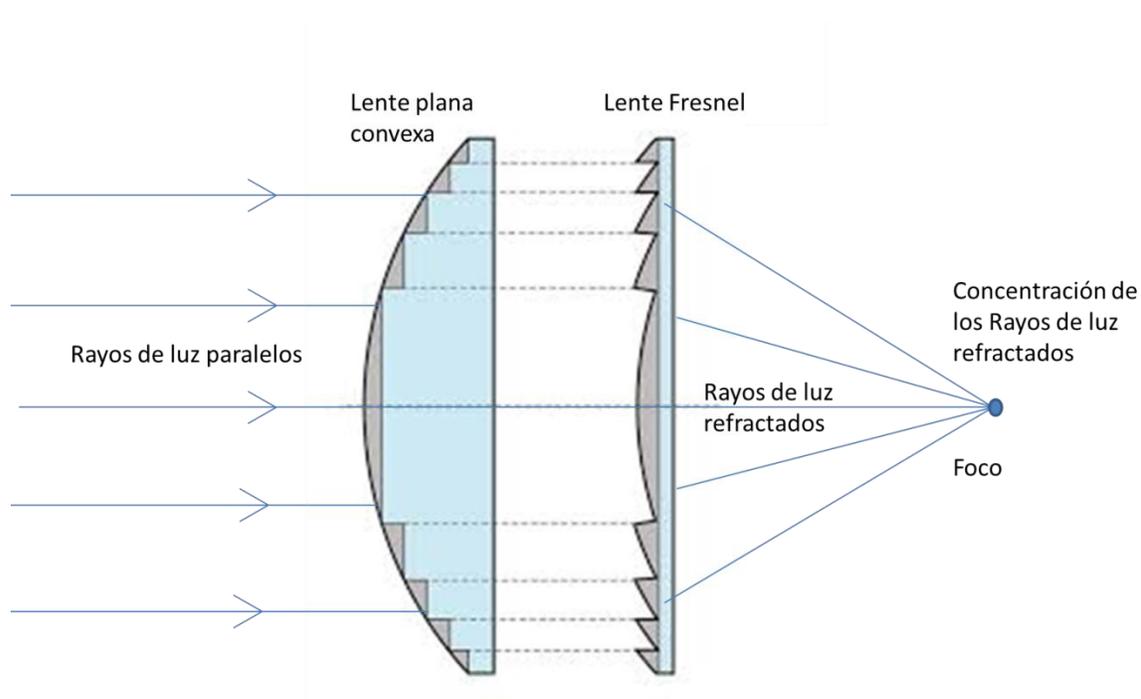


Figura 1.2. Esquema de una lente tipo fresnel.



Figura 1.3. Sistemas de concentración solar de reflexión. tipo plato parabólico.(Prototipo de la empresa sbp EuroDish de 10kW, en Odeillo, Francia)



Figura 1.4. Sistemas de concentración de reflexión. Tipo canal parabólico.(complejo de plantas SEGS en el desierto de Mojave, California, USA)

La concentración solar permite obtener altas temperaturas y por lo tanto se puede usar se usa tanto para genera potencia eléctrica o para la producción de combustibles solares a través de procesos termoquímicos.

Generación de potencia eléctrica a través de concentración solar

La generación de potencia eléctrica a través de concentración solar se refiere a la transformación de la energía térmica de la radiación solar directa en energía eléctrica, usando diversos dispositivos ópticos de concentración. En la actualidad existen tres tipos de sistemas termosolares de generación de potencia eléctrica con concentración solar que han alcanzado un desarrollo significativo, estos sistemas son los siguientes:

- Los sistemas de enfoque en línea, que concentran la radiación solar en tubos colocados a lo largo de la línea focal, por ejemplo a través de un canal parabólico reflejante o con sistemas tipo Fresnel lineal Figuras 1.5a y 1.5b.
- Los sistemas de enfoque puntual que utilizan platos o discos paraboloïdales para reflejar la radiación solar en un receptor colocado en el foco del concentrador. Figura 1.5c.
- Los sistemas de enfoque puntual tipo torre central, los cuales utilizan grandes campos de reflectores que siguen el movimiento aparente del sol (helióstatos) para concentrar la luz solar en un receptor colocado en la parte superior de una torre. Figura 1.5d.

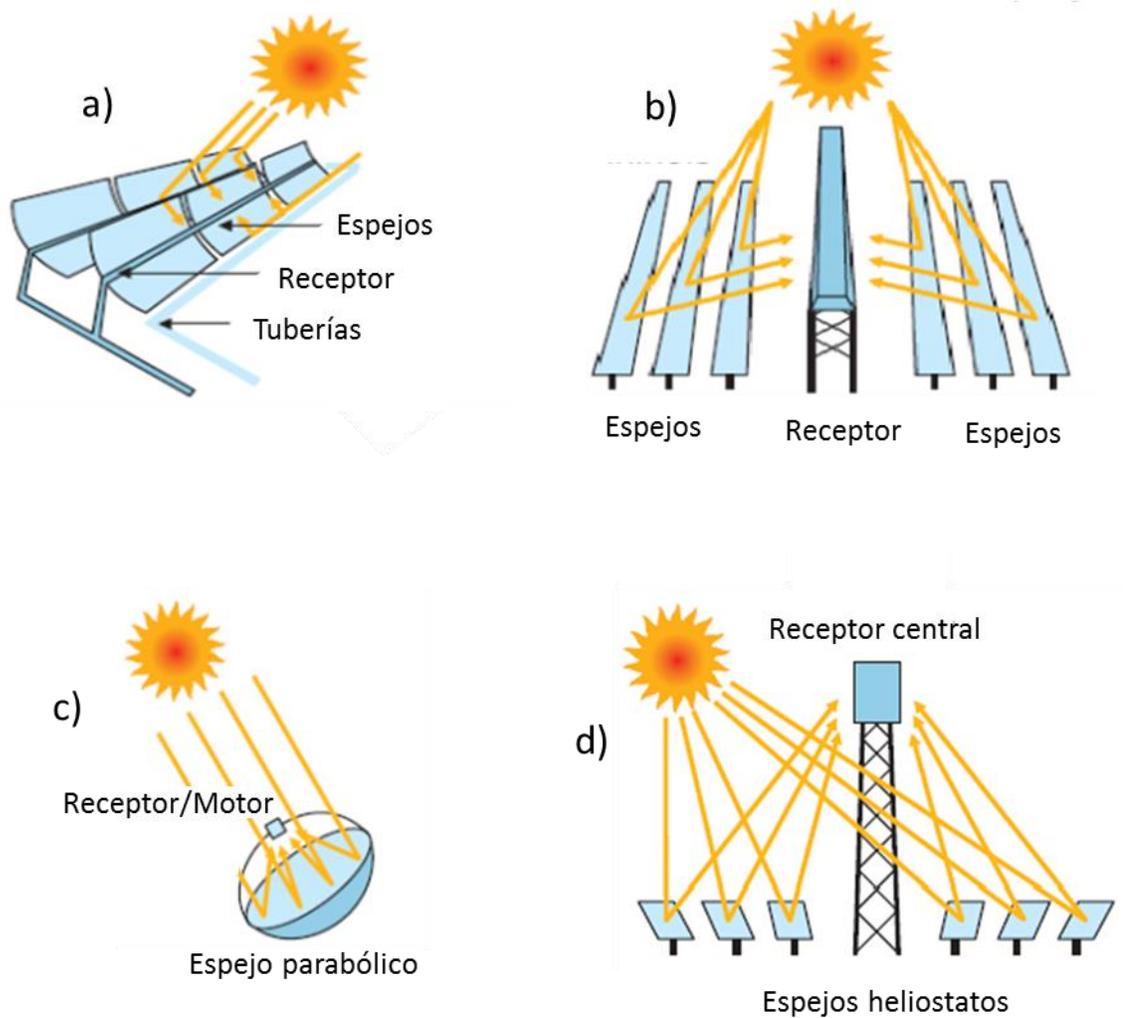


Figura 1.5. Sistemas de concentración solar. La figura a) corresponde a un concentrador solar tipo canal parabólico de enfoque lineal, la b) corresponde a un concentrador solar tipo fresnel lineal, la c) corresponde a un concentrador tipo plato parabólico de foco puntual y la d) corresponde a un concentrador tipo torre central.

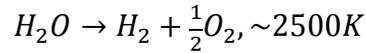
Producción de combustibles solares a través de concentración solar y procesos termoquímicos

La producción de combustibles solares tiene como objetivo el almacenamiento de energía, transformando la energía solar en energía química. Para lograr este objetivo, se requiere de procesos termoquímicos a alta temperatura (más de 700K). Para alcanzar estas altas temperaturas utilizando radiación solar, se requiere de dispositivos de concentración solar y de reactores químicos.

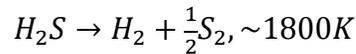
A continuación se presentan algunos de los procesos termoquímicos solares con los que se puede transformar la energía solar en energía química para su almacenamiento [Steinfeld, 2001]:

Hidrogeno solar:

- Disociación térmica directa del agua (termólisis del agua)

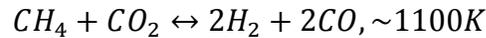
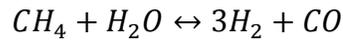


- Descomposición térmica del sulfuro de hidrógeno

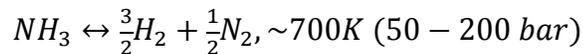


Química solar con tubos de calor, reacción reversible endotérmica:

- Reformado - Metanización:

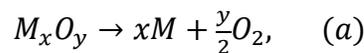


- Disociación - Síntesis:

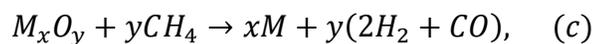
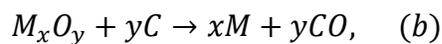


Reducción de óxidos metálicos, donde M es el metal y M_xO_y el correspondiente óxido metálico:

- Reducción térmica y electrotérmica



- Reducción carbotérmica

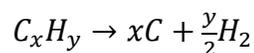


En la siguiente tabla se presentan las temperaturas de reducción de algunos óxidos metálicos estables, en función del cambio en la energía libre de Gibbs (ΔG) de las reacciones (a), (b) y (c).

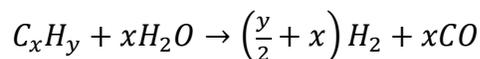
Óxido metálico	$\Delta G(a)=0$	$\Delta G(b)=0$	$\Delta G(c)=0$
Fe ₂ O ₃	3700 K	920 K	890 K
Al ₂ O ₃	> 4000 K	2320 K	1770 K
MgO	3700 K	2130 K	1770 K
ZnO	2335 K	1220 K	1110 K
TiO ₂	> 4000 K	2040 K	1570 K
SiO ₂	4500 K	1950 K	1520 K
CaO	4400 K	2440 K	1970 K

Descarbonización de combustibles fósiles (en un rango de 800 - 1500 K):

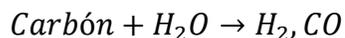
- Descomposición térmica



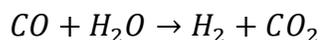
- Vapor – reformado de gas natural, petróleo y otros hidrocarburos



- Vapor – gasificación de carbón



- El CO contenido en el *syngas* combinado con vapor



Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar

Con el objetivo de impulsar el desarrollo de tecnologías de concentración solar en México, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) aprobó en 2007 el proyecto “Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar”. Este

proyecto, dirigido por el Profesor Claudio Estrada, ha sido financiado conjuntamente por el CONACyT, la UNAM y la UNISON y actualmente se encuentra en su segunda etapa. Uno de los objetivos del LACYQS ha sido el de desarrollar en México infraestructuras de nivel internacional para investigación y desarrollo tecnológico sobre tecnologías de concentración solar. Este laboratorio nacional consta de tres instalaciones, a saber:

- Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR), ubicada en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, en Temixco, Morelos.
- Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH), ubicado en los terrenos de la UNISON, en Hermosillo, Sonora.
- Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER), ubicado en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la UNAM, en Temixco, Morelos.

Cada una de estas instalaciones tiene objetivos estratégicos. En particular el HoSIER tiene como objetivo fundamental la investigación en la producción de combustibles solares por medio del desarrollo tecnológico de dispositivos que utilicen la radiación solar altamente concentrada para provocar las reacciones químicas necesarias en la obtención de estos combustibles. En las imágenes de las figuras 1.6, 1.7 y 1.8 se pueden apreciar estas instalaciones.

Se espera que LACYQS permita posicionar a México en el ámbito mundial en la investigación sobre las tecnologías de concentración solar e impulse el desarrollo de una industria nacional de estas tecnologías, así como la formación de recursos humanos de alto nivel.



Figura 1.6. Imagen de la planta PSTFAR.



Figura 1.7. Imagen de la planta de torre central CPH.



Figura 1.8. Imagen del Horno Solar del IER HoSIER.

Como ya se comentó, dentro de las tecnologías de sistemas termosolares se encuentran también los sistemas fotoquímicos. Los hornos solares son los instrumentos adecuados para hacer investigación y desarrollo de dispositivos como los reactores termoquímicos que permiten la producción de combustibles solares a escala laboratorio, para posteriormente hacer su escalamiento a sistemas de mayor capacidad como los de torre central.

1.3 Horno solar como instrumento de investigación

El desarrollo de las tecnologías de concentración requiere de ambientes de laboratorio adecuados para la realización de experimentación y pruebas de dispositivos. Las condiciones en que se realicen estos ensayos deben ser lo más parecidas a las condiciones de operación esperadas. Sin embargo, los sistemas de concentración generalmente requieren del seguimiento continuo del Sol, lo que representa un problema para la realización de pruebas debido a las continuas modificaciones y ajuste de los diseños que se requieran durante el desarrollo de las mismas. Es por lo anterior que se desarrolló el

concepto del horno solar, con el objetivo, desde su inicio, de ser un instrumento de investigación científica [Bliss, 1957]:

- Un horno solar permite obtener altas temperaturas en una atmósfera de trabajo excepcionalmente limpia, sin contaminantes de tipo químico o efectos eléctricos.
- La intensidad de la radiación de energía para calentamiento puede ser controlada con precisión y modificada con rapidez.

Sin embargo un horno solar tiene limitaciones inherentes a sus condiciones de operación como las siguientes [Bliss, 1957]:

- Deben colocarse en áreas con poca nubosidad.
- Los ensayos experimentales sólo pueden realizarse de manera intermitente.
- Sólo pueden tratarse muestras pequeñas y una a la vez.
- El costo de un horno solar es alto, debido a los requerimientos en su calidad óptica, para hornos de un tamaño moderado con tamaños del spot de radiación solar concentrada de aproximadamente 2.5 a 5 cm; y se incrementa rápidamente hasta ser extremadamente alto para hornos de gran capacidad con tamaños en su spot solar superiores a 10 cm.

Los hornos solares son sistemas ópticos compuestos por un helióstato con seguimiento automático del Sol que refleja la radiación solar a un espejo concentrador. El espejo concentrador puede ser un espejo paraboloide continuo o segmentado o un grupo de espejos esféricos. Debido a que la zona focal del espejo concentrador está fija, es sencillo instalar dispositivos o sistemas experimentales o de aplicación. El nivel de potencia del Horno se regula por medio de un sistema de control usando un atenuador, que trabaja como una persiana veneciana, y está localizado ente el helióstato y el concentrador. En la figura 1.9 se presenta el esquema general de un horno solar.

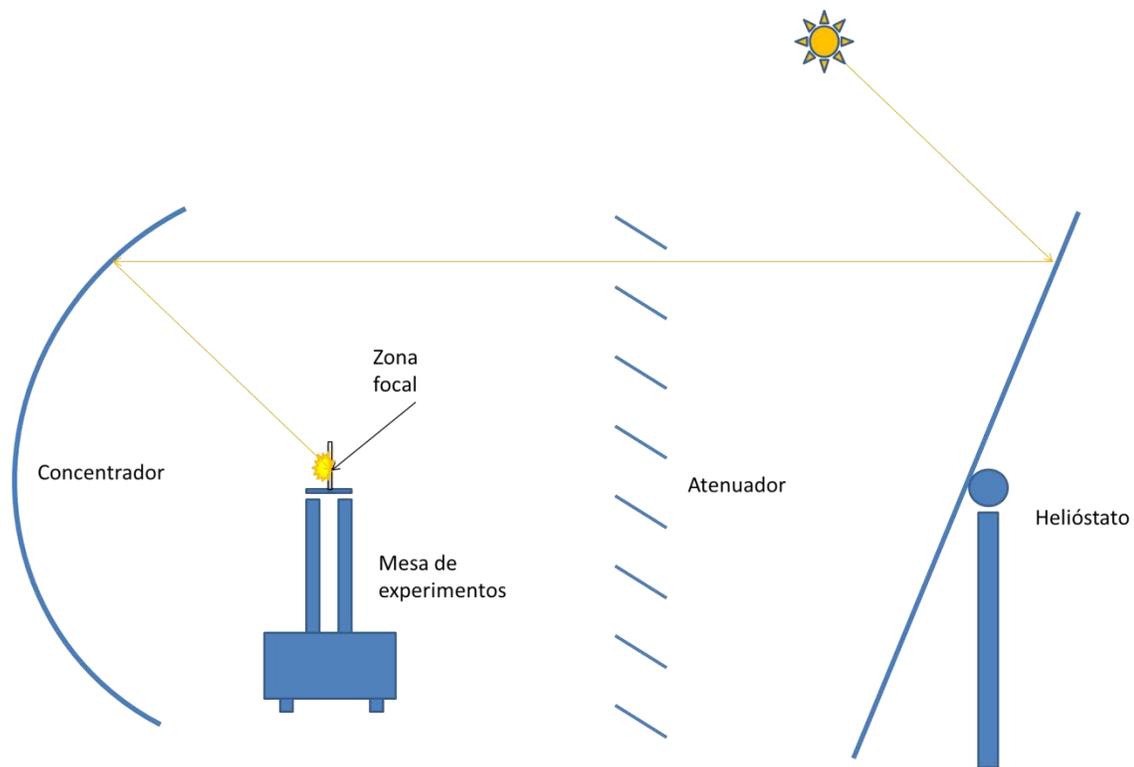


Figura 1.9. Esquema general de un horno solar

Un punto de interés entre los primeros trabajos realizados acerca de hornos solares fue la obtención de altas temperaturas. Las máximas temperaturas alcanzables se calculaban de manera teórica, usando la ley de radiación de Stefan-Boltzmann, a partir del valor de flujo radiativo absorbido por un cuerpo negro ideal colocado en el foco del concentrador [Bliss 1957 & Hisada 1957]. Lo anterior supone despreciar cualquier mecanismo de pérdida de energía excepto el radiativo, y que la energía absorbida no se transforma en trabajo o se extrae como calor útil. En la gráfica de la figura 1.10, se presenta la temperatura de estancamiento de cuerpo negro en función de la intensidad del flujo radiativo absorbido.

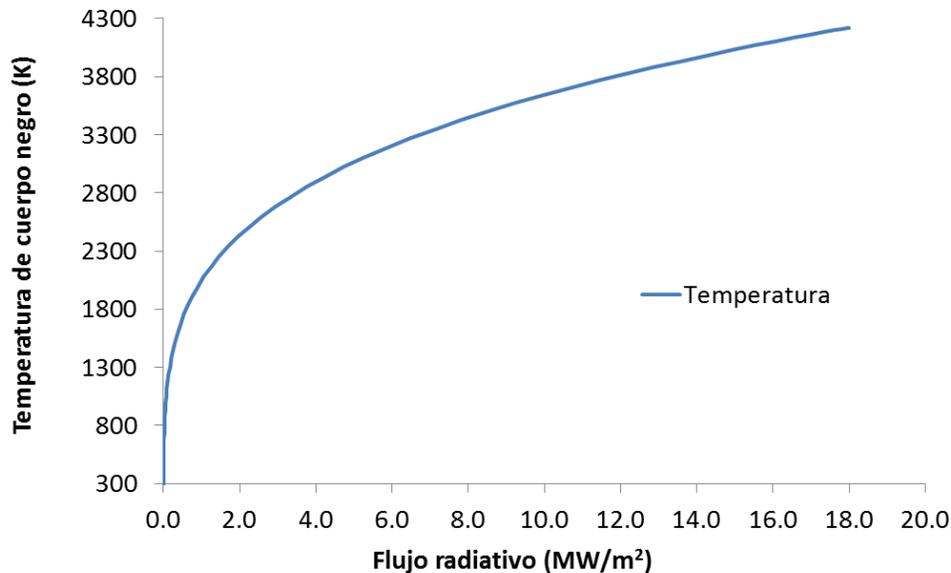


Figura 1.10 Grafica de la temperatura de cuerpo negro en función de la intensidad de flujo radiativo absorbido

En la actualidad los hornos solares cubren un amplio espectro de aplicaciones [Suresh, 1981], entre ellas se incluyen:

- Procesamiento y manufactura de materiales avanzados: cerámicas metalizadas para componentes electrónicas, fullerenos y nanotubos.
- Determinación de propiedades termofísicas bajo luz solar concentrada, incluyendo expansión térmica, conductividad y difusividad térmicas, calor específico, propiedades mecánicas, y emisividad y emitancia espectral.
- Determinación del funcionamiento y los límites de falla de materiales cerámicos y refractarios.
- Envejecimiento acelerado de materiales por UV.
- Desarrollo de receptores para la tecnología de plantas de generación de potencia termosolar.
- Procesos termoquímicos para la producción de combustibles solares, tanto hidrogeno como gases de síntesis.
- Simulación de efectos térmicos en presencia de flujo radiativo altamente concentrado.
- Destrucción de materiales tóxicos: industriales, orgánicos, desechos hospitalarios, etc.

Para tener una idea clara de los hornos solares que existen y sus principales características, se hizo una revisión bibliográfica que se presenta a continuación.

1.4 Revisión bibliográfica

Los hornos solares tienen sus inicios en la segunda mitad de la década de los 50's. Las primeras investigaciones sobre hornos solares tenían como finalidad conocer el efecto de las altas temperaturas (aprox 3500°C) sobre diversas propiedades de materiales expuestos a flujos radiativos altamente concentrados [Glaser 1957, 1958]; como son conductividad térmica, coeficientes de dilatación, emisividad de materiales, puntos de fusión de diversos compuestos [Hisada, 1957], estudio de materiales ultrarrefractarios, obtención de diagramas de fase, crecimiento de cristales y purificación de materiales. Simultáneamente se han desarrollado métodos para medir altas temperaturas [Brenden, 1958] y técnicas para medir la densidad de radiación concentrada [Loh, 1957], estas últimas han evolucionado y actualmente se utilizan técnicas de digitalización de imágenes usando cámaras CCD [Johnston, 1995] y técnicas calorimétricas como medida de referencia para las imágenes [Pérez-Rábago, 2006].

Entre los primeros hornos se pueden mencionar el de Arizona State Collage en Estados Unidos de Norteamérica construido en 1956 [Kevane, 1957] y el de Instituto Gubernamental de Investigación Industrial, en Japón [Hisada, 1957]. Los hornos solares han evolucionado y se han construido hornos de mayor superficie y con mayor capacidad de concentración, como el que se encuentra en el Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS) en Odeillo, Francia de 1000 kW térmicos [Trombe, 1973]; el horno solar de la Academia de Ciencias de la Republica de Uzbekistán de 1000 kW [Abdukhamaranov, 1998]; el horno solar de Instituto Paul Scherrer (PSI) de aproximadamente 25-40 kW [Schubnell, 1991]; el horno solar del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) en Colorado, USA de 10 kW; el horno del Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT) ubicado en la Plataforma Solar de Almería (PSA), España de 45 kW y el horno del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en Colonia, Alemania de 20 kW [Neumann, 1996].

Según la posición de sus elementos, los hornos solares se pueden clasificar en dos tipos: configuración óptica "en el eje" y "fuera del eje". En la configuración óptica "en el eje" o "sobre el eje", la posición relativa de los helióstatos con respecto al concentrador se encuentra en una alineación norte-sur con el punto focal ubicado sobre el eje óptico del sistema helióstato-concentrador, pudiendo estar el eje de forma horizontal o vertical como se muestra en el esquema de la figura 1.11 y en la figura 1.12 se presenta una imagen del horno solar de Odeillo, Francia.

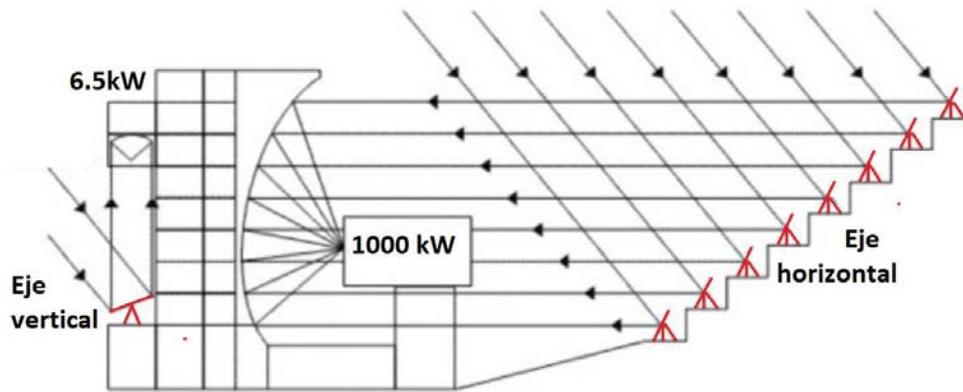


Fig. 1.11. Esquema de los hornos solares en Odeillo (Francia). En el costado izquierdo del edificio se encuentra el horno de 6.5 kW con eje óptico vertical; el costado derecho conforma el concentrador de 2160m² del horno de 1000kW.



Fig. 1.12. Imagen del Horno Solar de 1000kW en Odeillo (Francia).

Algunas instalaciones construidas recientemente utilizan el concepto "fuera del eje", en el cual no existe tal alineación. La ventaja de este sistema es que el área de trabajo no ocasiona sombreado en el concentrador y el punto focal al estar fuera del eje óptico puede ubicarse fácilmente dentro de otro edificio, como se puede observar en el esquema de la figura 1.13 y en la imagen de la figura 1.14. Por otra parte, los hornos solares que tienen su punto focal sobre el eje óptico del sistema a pesar de poseer sombreado durante la experimentación debido a los dispositivos y sistemas experimentales (reactores, receptores, etc.), tienen la ventaja de no tener errores ópticos causados por astigmatismo [Chong, 2010]. Cabe mencionar que un horno solar de dos etapas, usualmente requiere una inversión muy alta tanto de presupuesto como de tiempo, particularmente para la alineación óptica precisa que necesita lo que dificulta su construcción en masa [Chen et al., 2001].

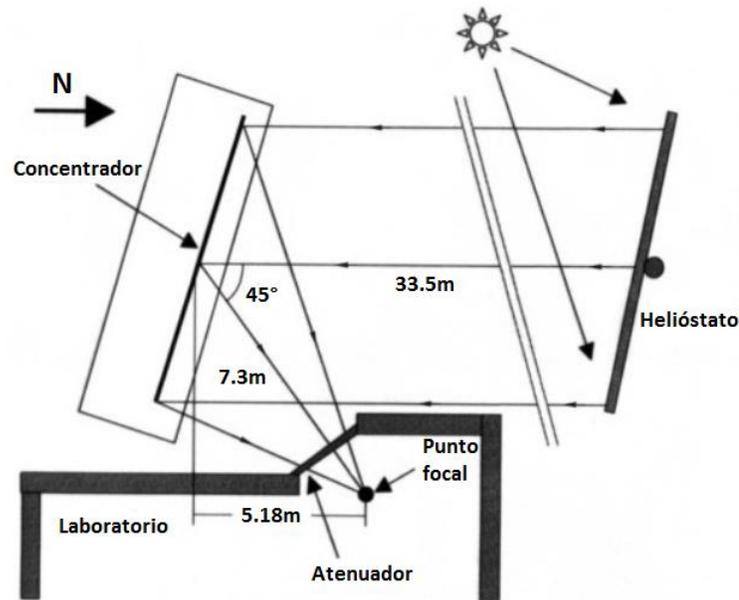


Fig. 1.13. Vista de planta del horno solar del DLR (Colonia, Alemania) con configuración óptica “fuera del eje”. El punto focal se encuentra fuera del eje del sistema heliostato-concentrador.



Fig. 1.14. Instalaciones del horno solar de Colonia, Alemania. De izquierda a derecha se observa: el concentrador, el laboratorio donde se encuentra el punto focal y el heliostato.

Los problemas de diseño más comunes en un horno solar se refieren al tamaño y montaje de los heliostatos, el sistema de seguimiento del Sol y las imperfecciones ópticas en las superficies de los espejos [Bliss, 1957 y Jose 1957]. El desempeño y utilidad de estos hornos depende de la potencia solar que sean capaces de captar y del factor de concentración que puedan alcanzar. La concentración esperada con la geometría de un plato parabólico de revolución es bien conocida, sin embargo, existen múltiples factores que pueden afectar directamente el factor de concentración que puede alcanzarse con un horno solar [Bliss, 1957].

La concentración teórica ($C_{teórica}$) de un sistema óptico de concentración solar en forma de disco parabólico, se calcula de la siguiente manera

$$C_{teórica} \approx \frac{4}{\theta^2} \text{sen } \varphi_{rim} \quad (1.1)$$

Donde θ es el ángulo del cono solar y φ_{rim} es el ángulo de borde del concentrador (ver figura 1.15).

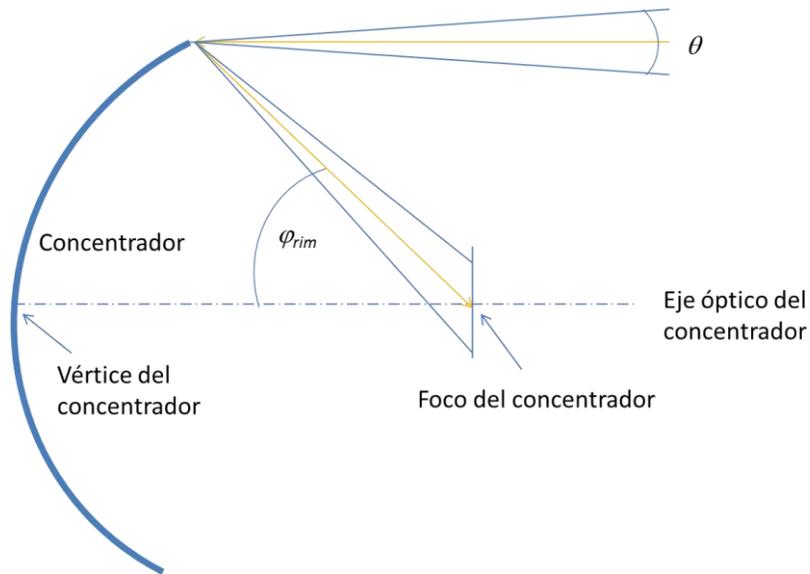


Figura 1.15. Esquema del ángulo de borde (φ_{rim}) de un concentrador solar en forma de disco parabólico y del ángulo del cono solar (θ).

A partir de la concentración teórica, la concentración de un horno solar puede calcularse en una primera aproximación de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C = FC_{teórica} \quad (1.2)$$

Donde F se le llama "Factor de horno" y está definido por el producto de los diversos coeficientes que afectan al horno solar (ecuación 1.3) y que se resumen en la tabla 1.1 [Bliss, 1957].

$$F = \eta_{t1}^2 \eta_{r1} \eta_{g1} \eta_{e1} \eta_s \eta_p \eta_a \eta_{t2}^2 \eta_{r2} \eta_{g2} \eta_{e2} \quad (1.3)$$

Tabla 1.1 Coeficientes típicos para un horno solar de doble reflexión

Símbolo	Coefficiente	Estimación baja	Estimación alta
η_t	Transmisividad del vidrio	0.94	0.98
η_r	Reflectividad de la superficie	0.91	0.95
η_g	Imperfecciones geométricas	0.9	0.96
η_e	Sombreamiento estructural del horno	0.94	0.98
η_s	Sombreamiento de mesa experimental	0.85	0.95
η_p	Sombreamiento por persianas del atenuador	0.95	0.99
η_a	Factor de alineación	0.95	0.99
	Factor general del horno (ec. 1.3)	0.35	0.69

En caso de que los espejos del heliostato y concentrador fueran de segunda superficie, el factor de transmisividad debe elevarse al cuadrado pues la radiación solar hace un recorrido de entrada y otro de salida por cada espejo.

El factor de horno resulta de utilidad para estimar la concentración que puede esperarse en un concentrador solar. Sin embargo, en la actualidad, esta estimación puede realizarse con mayor detalle si se cuenta con el modelo matemático y un programa de cómputo para simular la irradiancia esperada en el horno.

Otros trabajos que se han realizado en torno a la tecnología relacionada con los hornos solares se refieren al control de seguimiento del Sol el cuál es fundamental para los heliostatos [Abdukhamaranov, 1998] y ha ido mejorando junto con el desarrollo de los sistemas de cómputo y las tecnologías de control de señales. Por otro lado, el diseño de receptores en un horno solar es fundamental para optimizar la eficiencia de plantas de generación de potencia [Steinfeld, 1993]. También se ha estudiado el perfil de radiación solar y su efecto en concentradores solares [Schubnell, 1992 y Neumann, 1999].

En la tabla 1.2 se presentan las dos magnitudes características de algunos de los hornos solares antes mencionados, como son la potencia que son capaces de concentrar y el máximo nivel de concentración sobre una superficie plana ubicada en el “foco” del

concentrador. La relación entre estas dos magnitudes permite dar una idea de la calidad óptica del horno.

Tabla 1.2. Hornos solares en el mundo y sus principales características.

Institución	Ubicación	Potencia [kWth]	Niveles de primera concentración (soles)
Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS)	Francia	1000	10000
Academia de Ciencias de Uzbekistán (UAS)	Uzbekistán	1000	10000
Instituto Paul Scherrer (PSI)	Suiza	40	5000
Instituto Weizmann de ciencias (WIS)	Israel	16-40	5000
Laboratorio Nacional Sandia (SNL)	E.U.A.	16-40	5000
Plataforma Solar de Almería (PSA)	España	45	4000

Las características esperadas con el diseño del horno solar del IER suponen alcanzar una potencia máxima de 30 kW para una radiación solar directa de 1000 W/m² y niveles máximos de concentración solar de 10,500 a 15,000 soles [Riveros, 2008].

La aportación de este trabajo de tesis es conocer entre muchos otros parámetros, la potencia que es capaz de concentrar el HoSIER, el nivel máximo de concentración y la distribución de la radiación concentrada en su zona focal. A partir de conocer los parámetros de operación del HoSIER es posible determinar las temperaturas que se pueden alcanzar y el tipo de pruebas que se pueden realizar.

1.5 Objetivos

Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es llevar a cabo la caracterización óptica y térmica del HoSIER. En este proceso fue necesario desarrollar modelos matemáticos, diseñar dispositivos y desarrollar metodologías que se definen en los siguientes objetivos específicos.

Objetivos específicos

1. Determinación teórica de las distribuciones de flujo radiativo concentrado en la zona focal del HoSIER.
2. Diseño y construcción de un sistema óptico que tome imágenes y mida flujos radiativos para la determinación de la potencia del HoSIER.

3. Diseño y construcción de un calorímetro para la medición de la potencia concentrada por el HoSIER.
4. Campaña experimental para la caracterización óptica y térmica del HoSIER.

Breve descripción del resto de los capítulos de la tesis

En el capítulo 2, El HoSIER y los métodos generales de evaluación, se describe al Horno Solar del IER para conocer de manera general sus componentes y como se relacionan entre si. También los métodos que se utilizaron para determinar los parámetros característicos del HoSIER y los fundamentos teóricos que sustentan dichos métodos.

En el capítulo 3, Caracterización óptica del HoSIER, se presenta la caracterización óptica del HoSIER que consiste básicamente en conocer la distribución de la radiación solar concentrada en la zona focal del concentrador y a partir de esa distribución, encontrar el error óptico global y la relación de concentración del HoSIER.

En el capítulo 4, Caracterización térmica del HoSIER, se presentan las metodologías teóricas y experimentales con las que se determinó la potencia térmica del HoSIER.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios.

Capítulo 2

El Horno Solar del IER y los métodos generales de evaluación

En este capítulo se describe al HoSIER para conocer de manera general sus componentes y como se relacionan entre si. El HoSIER como cualquier otro instrumento requiere tener la información de sus parámetros de funcionamiento ya que son indispensables para determinar el tipo de pruebas que se pueden realizar. Las características principales que describen las capacidades de un horno solar son básicamente los niveles de concentración solar, la distribución fotónica concentrada en la zona focal y su potencia térmica. También se describen los métodos que se utilizaron para determinar los parámetros característicos y los fundamentos teóricos que sustentan dichos métodos.

2.1 Descripción del Horno solar del IER

El Horno Solar del IER está compuesto por un conjunto de sistemas con características específicas que le permiten funcionar de manera adecuada para los propósitos para los que fue diseñado. El diseño óptico del HoSIER fue un trabajo conjunto entre la Coordinación de Concentración Solar del IER y el Departamento de Óptica del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE). La fabricación de los espejos se realizó en el INAOE y el diseño mecánico y construcción de la estructura, por el departamento de Diseño Mecánico del INAOE. El montaje y puesta en operación, lo realizaron personal del INAOE y del IER. Los sistemas de control fueron diseñados por el CIMAT, IER-UNAM y CCADET.

Algunos de los sistemas del HoSIER son fijos como el concentrador, otros presentan partes móviles como el helióstato, el atenuador y la mesa de experimentos y otros están compuestos por equipos de cómputo, de adquisición de datos y software, como es el caso del sistema de control y el de monitoreo. A continuación se describen estos sistemas.

Helióstato

La función del helióstato (H81) es reflejar la radiación solar directa hacia el concentrador del horno, cubriendo toda el área de captación del concentrador y de manera paralela al eje óptico, ya que este horno es del tipo “en eje focal”.

El helióstato H81 está compuesto de 30 espejos rectangulares de segunda superficie de 6 mm de espesor, 20 de ellos de 1.3 m x 1.8 m y los otros 10 de 1.8 m x 1.9 m, ordenados en 6 filas y 5 columnas como se observa en la fotografía de la figura 2.1. Cada espejo está pegado a una estructura independiente compuesta por un marco y un conjunto de platinas triangulares (ver figura 2.2) con ajuste en cada uno de sus vértices, para el caso de los espejos chicos cada marco tiene 12 platinas y para el caso de los grandes 16 (ver figura 2.3). Los marcos de los espejos se soportan a otras 6 estructuras llamadas costillas, las cuales se sujetan de los brazos y estos a su vez de la corona de la transmisión del helióstato. La metodología de alineación de los espejos del H81 se explica en el apéndice A.



Figura 2.1. Fotografía del H81 mostrando el arreglo de los 30 espejos.

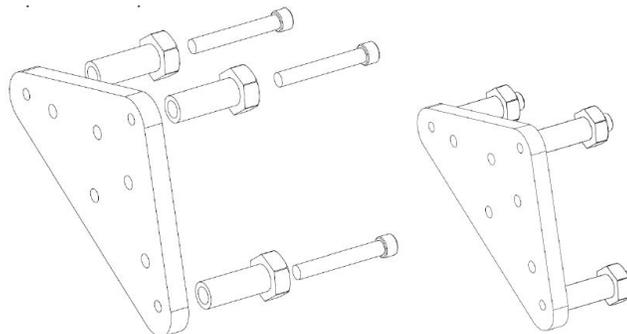


Figura 2.2. Esquema de una platina.

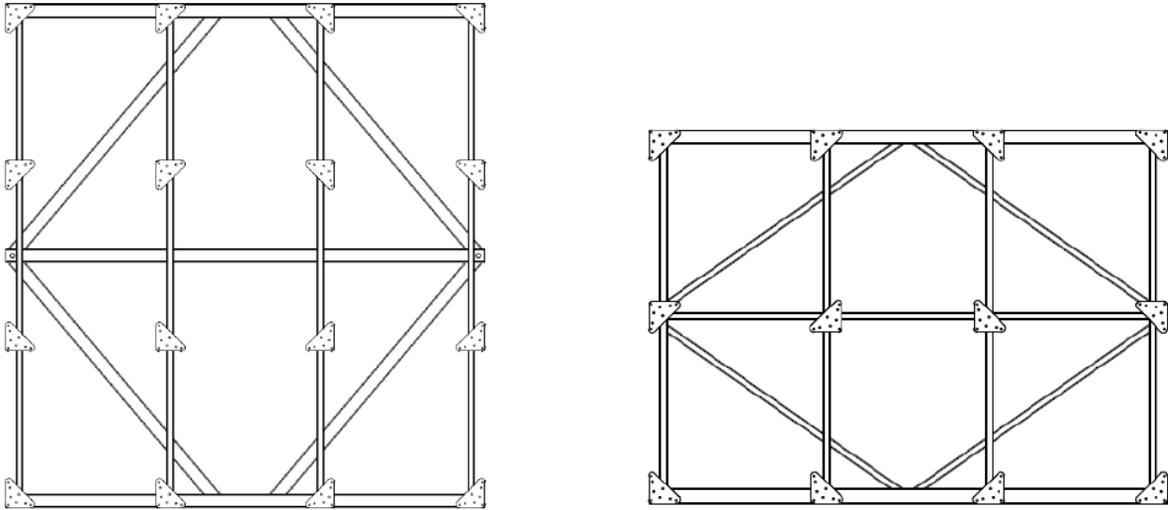


Figura 2.3. Esquema de los marcos de las facetas, a la izquierda está el marco grande que tiene 16 platinas y el de la derecha es el marco pequeño con 12 platinas.

Las características principales del H81 se presentan a continuación:

Los espejos son planos y coplanares entre si (sus normales son paralelas), esta característica es lo que permite reflejar la radiación solar directa sin perturbar su distribución uniforme (frente plano).

Tiene un sistema de seguimiento solar acimutal, esto quiere decir que le permite girar en dirección angular acimutal y de elevación. La posición del H81 se determina por medio del cálculo en tiempo real del vector solar, esto a través de un control de lazo abierto controlado desde el SCADA que permite integrar varios sistemas al control, uno de ellos es el del ajuste del seguimiento solar que consiste en un sistema de lazo cerrado por medio de una mirilla [Pérez-Enciso, 2015].

Su estructura es robusta lo que le permite gran rigidez y eso evita deformaciones causadas por los esfuerzos de carga derivados de la posición en el que se encuentre, siendo la máxima deformación cuando se encuentra en posición horizontal.

Las dimensiones del H81 se analizaron para garantizar un mínimo de horas de operación en verano que es cuando se presenta la menor proyección de la radiación solar hacia el concentrador [Riveros, 2008]. En la tabla 2.1 se presentan las horas de operación dependiendo de la temporada del año.

Tabla 2.1. Horas de operación del HoSIER en función de la temporada del año.

	Fecha	Horas de operación
Equinoccios de primavera y otoño	21 de marzo y 21 de septiembre	~ 6 - 6.5 horas
Solsticio de verano	21 de junio	~ 3 - 3.5 horas
Solsticio de invierno	21 de diciembre	~ 7 - 8 horas

Concentrador

El concentrador del HoSIER es el que se encarga de aumentar la densidad de flujo radiativo solar por medio de espejos de superficie cóncava esférica que reflejan la radiación solar hacia el foco del concentrador.

El sistema óptico de concentración solar del HoSIER está compuesto por un arreglo de 409 espejos de primera superficie con 40 cm de diámetro de forma hexagonal y superficie esférica, divididos en 5 grupos (ver figura 2.4) con distancias focales distintas, siendo la distancia focal de todo el conjunto de espejos de 3.68 m a partir del vértice. Cada espejo es de primera superficie, esto es, después de pulido el espejo, por técnica de evaporación se deposita una película de aluminio evaporado y después se aplica óxido de magnesio como protector, quedando con un índice de reflectancia de 0.91. Los espejos están pegados a un sistema tipo rótula que tiene tres opresores distribuidos alrededor de la rótula a cada 120 grados, permitiendo hacer ajustes en elevación y acimut; las rótulas se sujetan a una malla que esta soportada sobre una estructura de superficie esférica. La malla tiene cuatro grados de libertad lo que facilitó las maniobras de acomodo y posicionamiento de los espejos. En la figura 2.5 se presenta una fotografía del concentrador y en la figura 2.6 se pueden apreciar los elementos y estructuras sobre los cuales se sostiene el sistema óptico de concentración (ver apéndice B). La metodología de alineación de los espejos del concentrador también se explica en el apéndice A.

Una característica de los espejos del concentrador, es que al ser de primera superficie tienen mejor índice de reflexión que los de segunda superficie ya que no se tienen pérdidas por la transmitancia del vidrio. La desventaja es que son más delicados y no se pueden limpiar fácilmente, es por eso que se encuentran protegidos dentro de un cuarto especial.

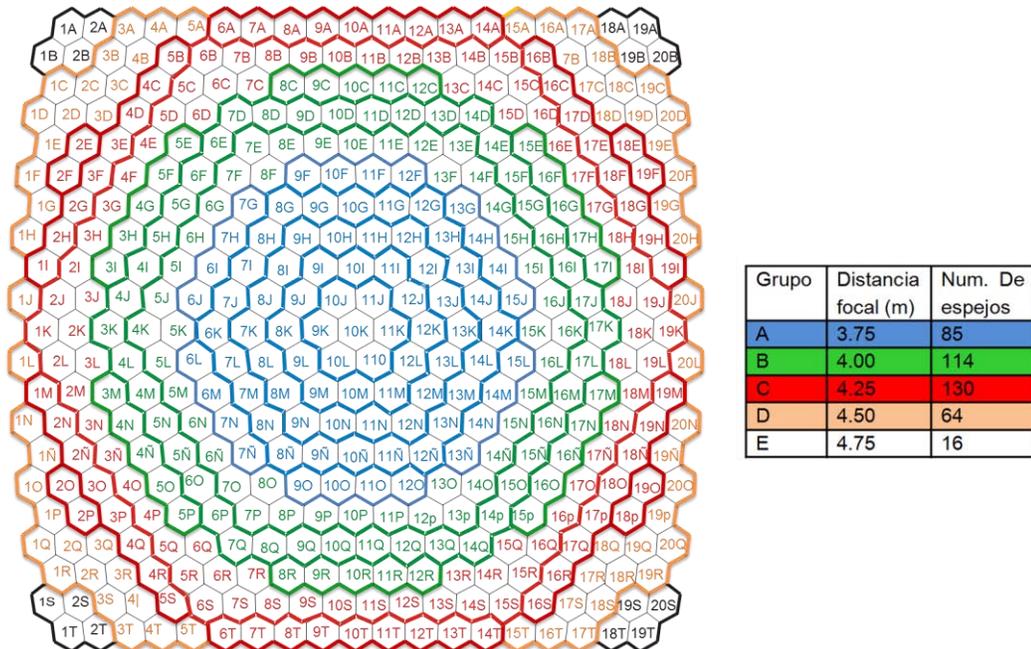


Figura 2.4. Esquema del arreglo óptico de concentración solar, en el que se identifican los 5 grupos.

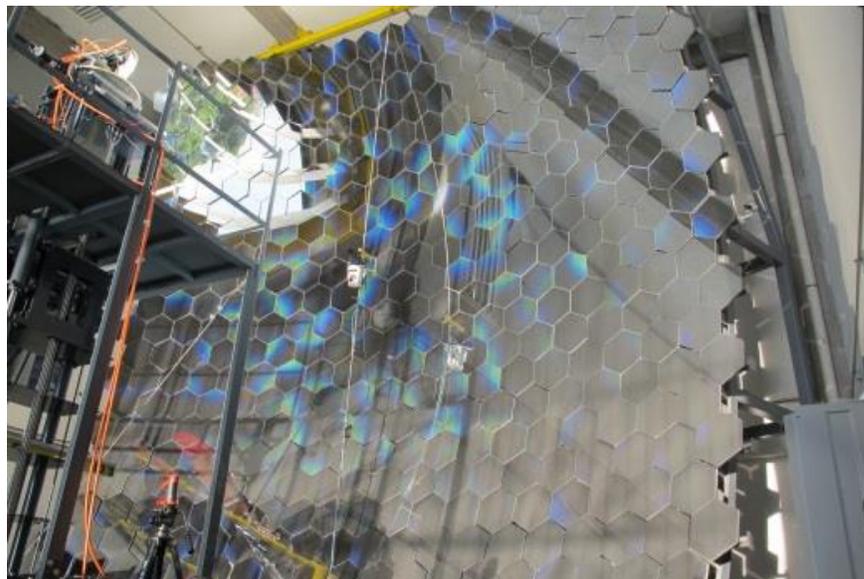


Figura 2.5. Arreglo de los 409 espejos del sistema óptico de concentración.

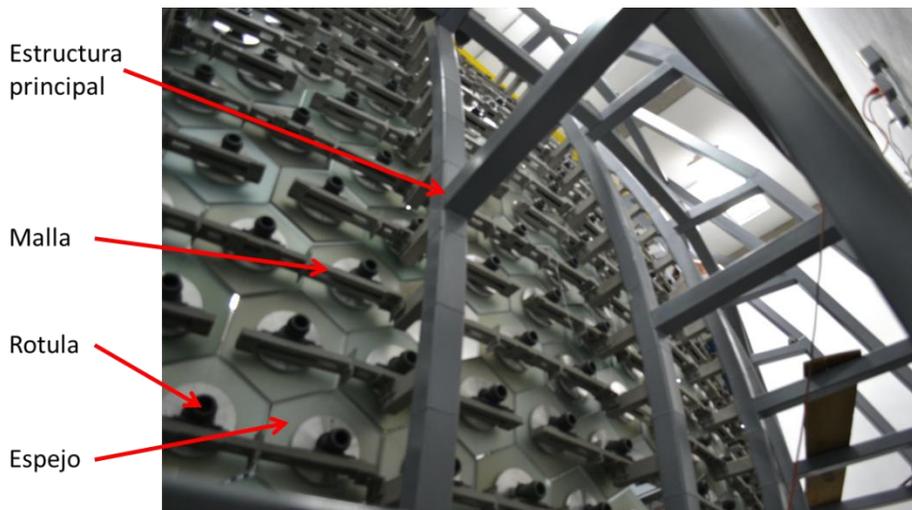


Figura 2.6. Elementos que soportan a los espejos del concentrador.

Atenuador

El atenuador está ubicado en la abertura de la edificación que contiene al concentrador y es el sistema de control que regula la entrada de la radiación solar proveniente del H81 hacia el concentrador, por lo que es de suma importancia tener un control confiable y seguro. La cantidad de energía solar que permite pasar va de 0 a 100 % con divisiones de 1%. La ecuación que relaciona la posición de las persianas con el porcentaje de apertura del atenuador se explica en el apéndice C.

El atenuador está compuesto por 45 persianas hechas de láminas de acero inoxidable con acabado sandblastado de 6.0 m de largo, 0.17 m de ancho y 0.002 m de espesor, separadas 150 mm entre ellas, las cuales, giran simultáneamente sobre un eje ubicado en el centro y a lo largo de cada persiana mediante un mecanismo de cuatro barras (ver figura 2.7), además se encuentran trabajando a tensión para evitar deformaciones y que el bloqueo de la radiación sea homogéneo en todo el claro de la abertura. Las persianas están colocadas de manera vertical en un marco de 6.29 m x 6.7 m. En la Figura 2.8 se muestra una fotografía del atenuador visto desde afuera del edificio del concentrador.

La posición vertical de las persianas les permite ser muy delgadas por lo que el área que sombrean cuando están abiertas al 100% es de apenas un 1.5% del área del concentrador.

El atenuador fue diseñado por personal del CCADET y del IER, y fabricado por la empresa Pirámide S.A de C.V.



Figura 2.7. Imagen del mecanismo de movimiento de las persianas del atenuador

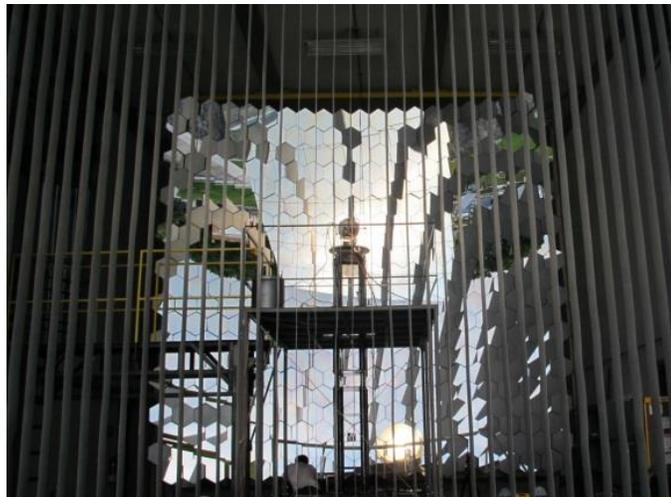


Figura. 2.8. Atenuador visto desde el exterior del HoSIER.

Mesa de coordenadas 3D

En la zona focal del HoSIER se tiene una mesa de trabajo para montar dispositivos que recibirán la radiación solar concentrada, esta mesa cuenta con desplazamientos en tres direcciones, (ejes, X, Y, Z). La mesa tiene la capacidad de proporcionar un movimiento con precisión milimétrica en cualquiera de las tres direcciones, y carreras de desplazamientos totales de 24 cm. Con estas características, se logra tener el control en el posicionamiento de los receptores/reactores en la zona focal del HoSIER. La Figura 2.9 presenta fotografías de la mesa con movimiento tridimensional con capacidad de carga de 250 Kg. Cabe mencionar que los mecanismos de posicionamiento de los ejes “Y” y “Z” se encuentran en la parte baja del HoSIER por debajo de la abertura del atenuador, donde no provocan

sombras. Por otra parte, la mesa de trabajo junto con el mecanismo de posicionamiento de “X” se encuentran soportados por cuatro columnas estilizadas que minimizan el sombreado. (0.45 m² aproximadamente)

El diseño con el que fue hecha esta mesa de trabajo es original ya que la parte más robusta de la estructura se encuentra en el piso del cuarto de experimentos y con esto se reduce el área de sombra que produce este dispositivo.

La mesa fue diseñada por personal del CCADET y del IER, y fabricado por la empresa Pirámide S.A de C.V.



Figura 2.9. Mesa de trabajo con movimiento en tres ejes.

Sistema de refrigeración

EL sistema de refrigeración tiene como función principal controlar la temperatura de los dispositivos que se utilicen para las pruebas y experimentos mediante la circulación forzada de agua.

El sistema de refrigeración del HoSIER, cuenta con varias de válvulas de paso, una electro válvula reguladora de caudal, un flujómetro de coriolis, terminales con conectores rápidos para manguera y dos depósitos de agua; 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 agua. Por medio de una bomba de $\frac{1}{2}$ HP se hace

recircular el agua hacia el primer depósito, en la figura 2.10 se presentan un esquema de algunos de estos elementos.

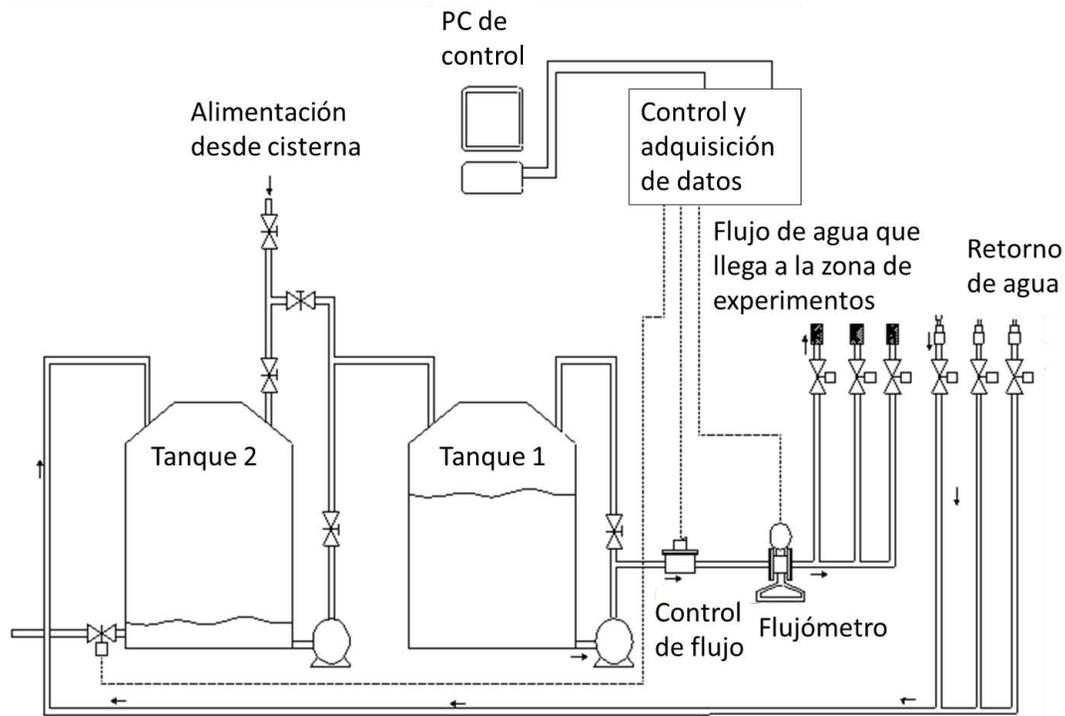


Figura 2.10. Esquema de los dispositivos del sistema de refrigeración.

Este sistema de refrigeración permite caudales de agua a temperatura ambiente de más de 25 LPM en la zona de la mesa de trabajo. Este caudal se puede ver afectado por el diámetro de la tubería del dispositivo en el que se utilice el agua.

Sistema de control y de adquisición de datos

El sistema de control es el cerebro del HoSIER ya que es el que permite que el H81 de manera automática ajuste su posición conforme el Sol cambia de posición aparente, también que el atenuador se pueda abrir y cerrar desde el cuarto de control o de forma automática dependiendo de las condiciones requeridas en las pruebas; permite el control de la mesa de trabajo y del sistema de refrigeración y conocer en tiempo real los parámetros que se estén midiendo en cada prueba.

El sistema de control utiliza una computadora y un software que consta de una programación tipo SCADA que muestra los distintos sistemas del HoSIER. SCADA es un acrónimo de Supervisory Control And Data Acquisition (control y adquisición de datos de supervisión). Los sistemas SCADA utilizan la computadora y tecnologías de comunicación para automatizar el monitoreo y el control de procesos industriales.

El software y el hardware de adquisición de datos del HoSIER, consiste en un sistema de adquisición de datos compacto FieldPoint, CompactRIO y varios controladores en tiempo real para cada subsistema. La computadora principal o central es un Controlador PXI robusto basado en Windows y se utiliza para el funcionamiento de todos los sistemas del horno. Todo el software de control y la operación se desarrolló usando Labview (National Instruments). Los datos experimentales se procesan y manejan en la unidad central y se publican simultáneamente en la Web. El sistema de control del HoSIER es un sistema paralelo capaz de operar las funciones principales de los subsistemas al mismo tiempo (posicionamiento del heliostato, apertura y cierre del atenuador, la ubicación de la mesa experimental, etc.). El sistema también tiene la capacidad de realizar un paro de emergencia en caso de evento inesperado. En la figura 2.11 se presenta una imagen de la pantalla principal del control del HoSIER. En esta pantalla se muestran los diferentes sistemas que conforman el HoSIER y con seleccionar por medio de dos clicks con el botón izquierdo del ratón de la computadora, se despliegan las pantallas que controlan cada sistema.



Figura 2.11. Pantalla principal del sistema de control del HoSIER.

Ya que se han presentado los componentes del HoSIER, se describen ahora las metodologías empleadas para conocer los parámetros característicos de los sistemas ópticos (el heliostato y el concentrador) del HoSIER. Algunos métodos son teóricos y otros son para aplicación experimental.

Para la evaluación óptica del HoSIER se emplearon métodos teóricos como el trazado de rayos y métodos experimentales de toma de imágenes de la distribución fotónica en la zona focal por medio de cámaras digitales CCD. Para la evaluación térmica se hicieron cálculos teóricos a partir de las características físicas y geométricas del HoSIER y mediciones experimentales por medio de dispositivos calorimétricos.

2.2 Método teórico de trazado de rayos

El método de trazado de rayos, consiste básicamente en considerar que la luz se desplaza desde una fuente luminosa describiendo una trayectoria en forma de línea recta (rayo de luz) hasta impactar sobre una superficie en la que dependiendo de las propiedades físicas que se le asignen, pueden modificar su dirección por efecto de reflexión o de refracción. En el caso de que la fuente de luz cubra una superficie, se asignan varios rayos de luz distribuidos de tal forma que permitan cubrir dicha superficie de manera uniforme. Se debe definir la densidad de flujo luminoso (que puede ser expresada en W/m^2) que irradia la fuente para que al interactuar con una superficie de área conocida, se pueda calcular la potencia que recibe esa superficie. A cada rayo de luz que incide sobre la superficie se le asigna una cantidad de energía que puede ir disminuyendo en cada interacción con las diversas superficies en las que impacta, debido a los índices de reflexión o de transmitancia asignados a las superficies o materiales con los que interactúa (ver figura 2.12).

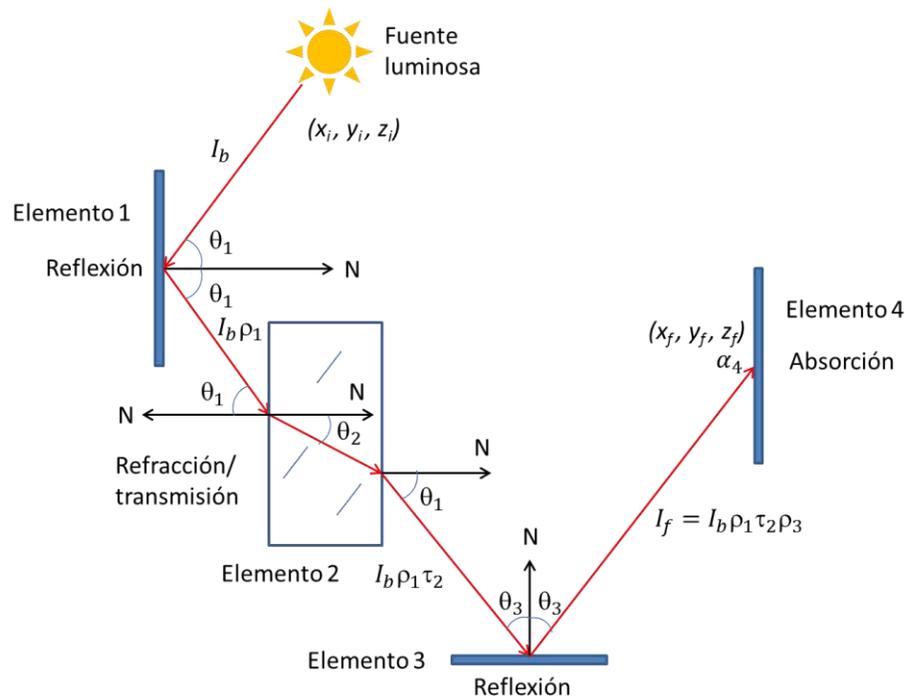


Figura 2.12. Figura esquemática de la trayectoria de un rayo de luz con el método de trazado de rayos

En la figura 2.12 se presenta un ejemplo de un trazado de rayos donde se muestra un rayo de luz proveniente del Sol con una densidad de flujo radiativo I_b que es interceptado por el elemento 1 que tiene una superficie reflectiva con índice de reflexión ρ_1 . El rayo reflejado por el elemento 1 atraviesa el elemento 2 que es un material translucido con un índice de transmitancia τ_2 , ese rayo de luz es reflejado posteriormente por el elemento 3 que tiene una superficie reflectiva con índice de reflexión ρ_3 y finalmente es absorbido por el elemento 4 que tiene un índice de absorptancia α_4 .

A lo largo de la trayectoria del rayo de luz emitido por la fuente luminosa (Sol) con coordenadas iniciales (x_i, y_i, z_i) fue cambiando tanto su dirección por efectos reflectivos y refractivos hasta llegar a las coordenadas finales (x_f, y_f, z_f) , y su intensidad final I_f por los coeficientes de reflexión y de transmitancia de los diferentes elementos, quedando como sigue:

$$I_f = I_b \rho_1 \tau_2 \rho_3 \quad (2.1)$$

En el caso específico del Sol como fuente luminosa extendida (no es puntual) se define una distribución de intensidades de flujo radiativo conocida como la forma solar. Esta distribución se asigna a cada rayo de luz. Entre mayor sea la cantidad de rayos es posible tener una mejor aproximación a la distribución de intensidades que se da en cada superficie en la que impactan los rayos.

Para el estudio teórico de un sistema óptico de concentración solar empleando el método de trazado de rayos, se requieren definir algunas características de la fuente (el Sol) y de los elementos ópticos como son las propiedades de superficie la posición espacial de los elementos y los errores ópticos.

La forma solar

La forma solar la definen las relaciones geométricas del tamaño y forma del Sol y su distancia hacia la tierra. El Sol tiene forma esférica con un radio de 6.95×10^5 Km y una distancia media a la tierra de 1.495×10^8 Km. Con estas dimensiones se puede calcular el ángulo del cono solar formado a partir del vértice ubicado en la faz de la tierra, de la siguiente manera y como se muestra en la figura 2.13.

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{r_s}{d_m} \right) = 2 \tan^{-1} \left(\frac{6.95 \times 10^5}{1.495 \times 10^8} \right) \approx 9.3 \text{ mrad}$$

Donde θ es el ángulo del cono solar, r_s el radio de la esfera solar y d_m la distancia media del sol a la tierra.

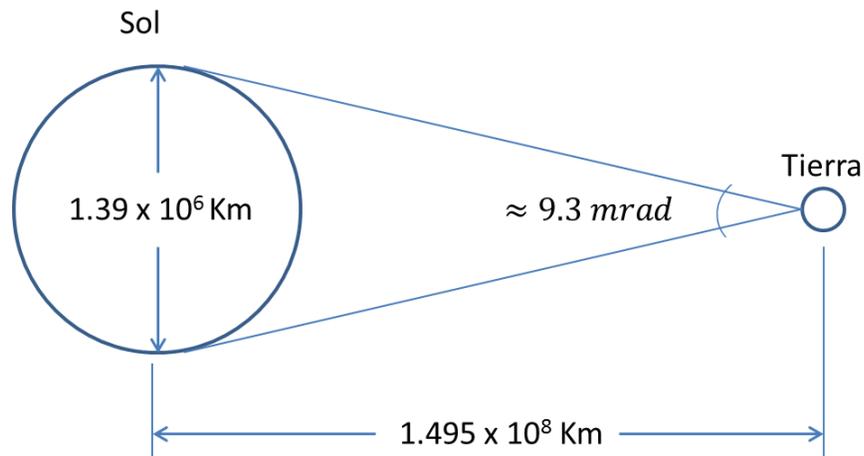


Figura 2.13. Esquema del ángulo del cono solar.

La forma solar comúnmente se representa con cuatro perfiles distintos que van desde una simplificación hasta la distribución real, estas cuatro formas solares son: el Sol uniforme, el Sol gaussiano, el Sol estándar y el Sol real.

El Sol uniforme

El Sol uniforme consiste en considerar al Sol como un círculo de intensidad de radiación uniforme y radio angular de 4.65 mrad , a esta distribución se le conoce como pillbox y se presenta en la gráfica de la figura 2.14.

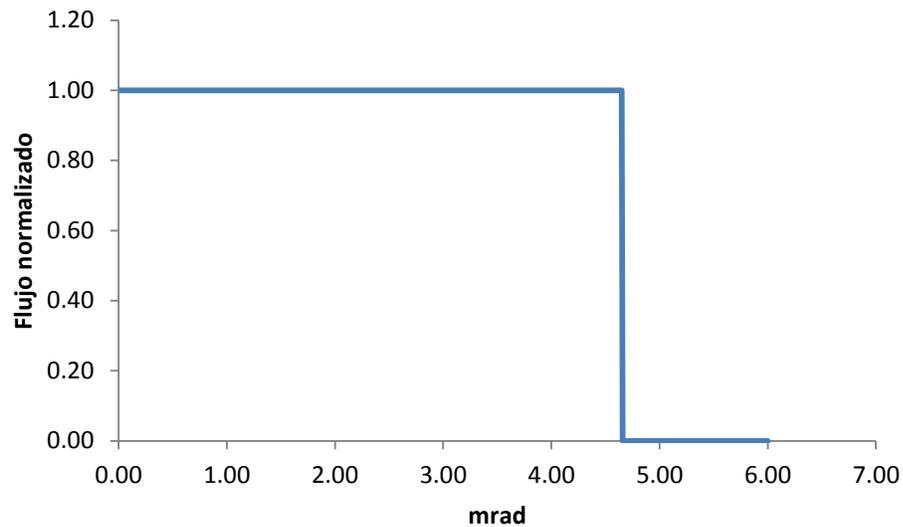


Figura 2.14. Perfil del Sol uniforme

El Sol gaussiano

El Sol gaussiano o Sol normal, consiste en aproximar el cono solar con una distribución normal, como si se tratara de una distribución aleatoria de tendencia central. La desviación estándar se ajusta al radio angular solar. La ecuación que describe este perfil es la siguiente:

$$S_g(\theta) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.2)$$

Donde S_g es el perfil del Sol gaussiano, σ es la desviación estándar y θ es el radio angular del cono solar.

El Sol estándar

El perfil de distribución del Sol estándar corresponde a un promedio cuadrático de observaciones realizadas con el telescopio circunsolar LBL (Lawrence Berkeley Laboratories). Este estudio fue realizado entre finales de los 70 y principio de los 80, en 11 sitios a lo largo de los Estados Unidos [Buie D. et al, 2003]. Este perfil se presenta en la gráfica de la figura 2.15.

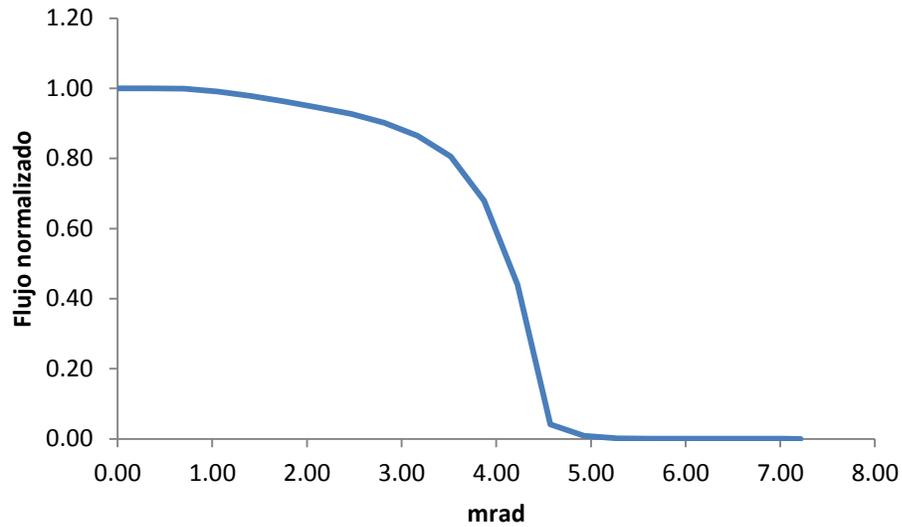


Figura 2.15. Perfil de distribución del Sol estándar.

El Sol real

Consiste en definir al cono solar a partir de una tabla con medidas experimentales de la irradiancia angular solar. En algunos casos es posible tomar una fotografía del disco solar y obtener la distribución de intensidad a partir de la digitalización de la imagen. Esta técnica nos aporta una distribución en un plano, cuya integral se normaliza y posteriormente se multiplica por la irradiancia directa que se recibe del Sol. Debe considerarse que esta forma puede variar significativamente según las condiciones atmosféricas de cada región en particular. El efecto de la atmósfera se traduce en lo que se le ha llamado la radiación circunsolar. Esta radiación tiene su origen en la radiación directa, pero a causa de la presencia de partículas en la atmósfera, una parte de la radiación es dispersada y ahora incide desde regiones alrededor del disco solar a manera de una aureola. La radiación circunsolar se mide a través de una magnitud llamada razón circunsolar, y representa la proporción de radiación que incide de manera circunsolar respecto al total de irradiancia directa. La razón circunsolar puede calcularse con la siguiente fórmula.

$$CSR = \frac{I_{CS}}{I_{CS} + I_{Sol}} \quad (2.3)$$

Donde CSR es la razón circunsolar (siglas en ingles de CircumSolar Ratio), I_{CS} es la irradiancia en la región circunsolar e I_{Sol} es la irradiancia en la región del disco solar.

La magnitud de la razón circunsolar es importante por dos razones. La primera está relacionada al diseño de los sistemas de concentración solar que consideran un ángulo de aceptación a partir de un cono solar considerado. Si no se toma en cuenta que parte de la radiación directa incide en forma circunsolar, los rendimientos esperados en los sistemas de concentración podrían ser sobrestimados, lo que afectaría la rentabilidad de las inversiones. La segunda razón se relaciona con el diseño del horno solar. La forma del cono solar afecta a las curvas de distribución de irradiancia que se obtienen en la zona focal, así como los valores de concentración promedio y pico que se pueden esperar del foco del sistema. Por ejemplo en el horno solar del PSI, si la magnitud CSR es inferior al 1%, el diámetro de la mancha solar en la zona focal es de 13 cm, sin embargo cuando la magnitud CSR llega a un 40% el diámetro de la mancha solar es mayor a 16 cm, esto además afecta el pico de concentración que se obtiene en la zona focal. Cabe mencionar que existe una relación lineal entre el diámetro de la mancha y la magnitud CSR [Neuman and Witzke, 1999]. En la gráfica de la figura 2.16 se presenta la comparativa de las diferentes formas solares.

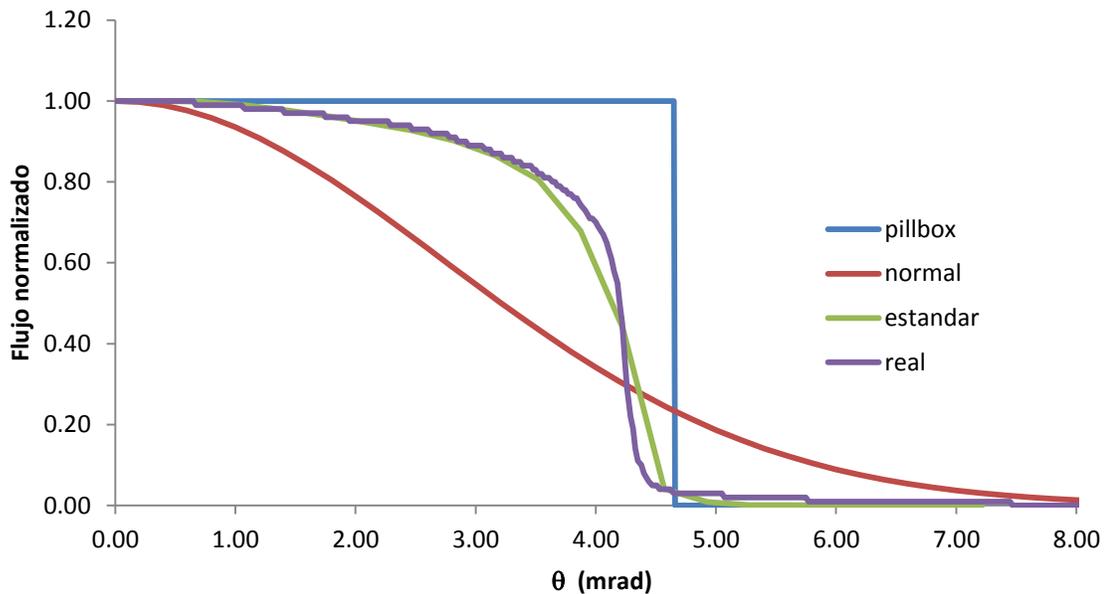


Figura 2.16. Comparativa de los perfiles de las distintas formas solares

Como se mencionó anteriormente (antes de definir la forma solar), además de las características de la fuente de radiación, se deben considerar las propiedades de superficie y los errores de los elementos ópticos.

Errores ópticos

Los errores ópticos se refieren a las características de superficie de los elementos ópticos que provocan una alteración en la dirección del rayo de luz. En superficies especulares sin errores, la dirección de un rayo reflejado se evalúa de acuerdo con la ecuación:

$$\hat{r} = \hat{i} + 2(\hat{n} \cdot \hat{i})\hat{n} \quad (2.4)$$

Donde \hat{r} corresponde al vector unitario del rayo reflejado, \hat{i} es el vector unitario incidente en el punto de reflexión y \hat{n} es el vector unitario normal a la superficie del espejo (figura 2.17). Cuando la totalidad de rayos reflejados se obtiene de acuerdo a esta ecuación decimos que la superficie de reflexión es perfectamente especular.

En el caso de una fuente como el Sol, el vector incidente coincide con la línea que proviene del centro del disco solar y la irradiancia dentro del cono solar se distribuye simétricamente alrededor de esta línea. En una superficie ideal, el cono reflejado tiene la misma forma del cono solar incidente.

El caso opuesto a la reflexión especular es la reflexión difusa. En este caso, la radiación puede ser reflejada en cualquier dirección de manera aleatoria, sin importar la dirección de los rayos incidentes. Un ejemplo de este tipo de reflexión se encuentra en una superficie totalmente mate, en la cual no puede observarse ningún reflejo. Sin embargo, no existen en la naturaleza tanto la reflexión especular ideal como la difusa ideal. En el caso de una reflexión especular real siempre estará presente una componente difusa alrededor de la dirección del rayo reflejado.

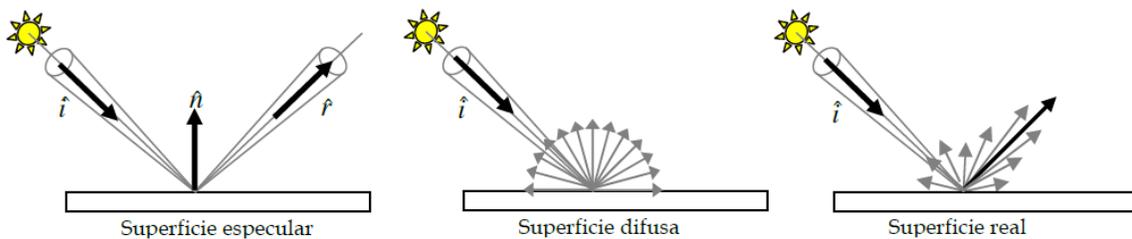


Figura 2.17. Esquema de la reflexión de un rayo de luz.

Por lo regular en una superficie especular no se desea que los rayos reflejados se dispersen respecto a la reflexión ideal. Cualquier característica de la superficie que pueda provocar reflexión difusa o que desvíe a los rayos reflejados de la dirección esperada, se les

considera errores ópticos de la superficie. Entre estos, podemos considerar dos tipos: microscópicos o de rugosidad y macroscópicos o de ondulación. En el caso de los errores de rugosidad producen un ensanchamiento del cono solar y la modificación de la forma solar tendiendo a convertirse en una distribución gaussiana (ver figura 2.18), mientras que los de ondulación producen una desviación de la dirección del cono reflejado debido al error en la pendiente de la superficie, es por ello que en este caso el ángulo de error se duplica (ver figura 2.19).

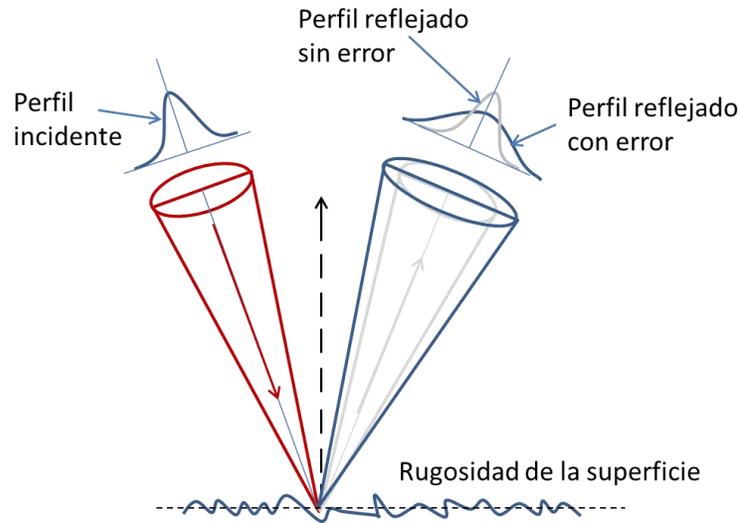


Figura 2.18. Error por rugosidad.

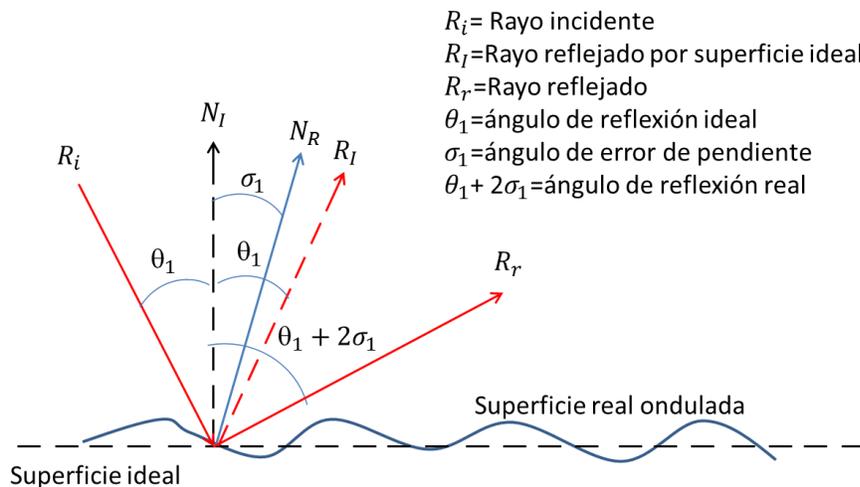


Figura 2.19. Error de ondulación o de pendiente.

Todos los errores de superficie están relacionados con los procesos ya sean de obtención del material como de fabricación de los espejos. Los errores de ondulamiento y de curvatura pueden asociarse a la maquinaria que da la curvatura a los espejos, mientras que los errores de rugosidad están asociados con la estructura cristalina o granular del sustrato y del metal depositado así como del pulido de la superficie una vez maquinada.

Además de los errores propios de la superficie de los espejos, debe considerarse en concentradores de facetas múltiples que la alineación de los espejos es otra fuente de error que puede representarse también por una función aleatoria de distribución. La alineación de las facetas de un helióstato, así como de su pedestal, y la precisión del seguimiento pueden producir errores tanto en la reflexión, como de deriva de la mancha de concentración en la zona focal. Los errores de deriva no suelen modificar la forma de la distribución de irradiancia concentrada pero sí afectan la irradiancia recibida en un mismo punto de la zona focal.

A fin de proporcionar un modelo general para representar al conjunto de errores de superficie, suele considerarse que las desviaciones de los rayos reflejados, en su conjunto, se distribuyen aleatoriamente alrededor de las direcciones ideales de reflexión. Cada tipo de error, puede representarse mediante una distribución normal. Al conjunto de errores de superficie se le conoce como el error óptico global y se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_g^2 = \sigma_{\text{rugosidad}}^2 + 4\sigma_{\text{ondulación}}^2 \quad (2.5)$$

Códigos numéricos para la solución del trazado de rayos

Para modelar un sistema óptico complejo, compuesto por una gran cantidad de elementos, se requiere considerar una gran cantidad de rayos para que el resultado dé información lo más cercana a la realidad. Para hacer este tipo de modelaciones existen dos metodologías para resolver el trazado de rayos, una es mediante la convolución de funciones y la otra por el método de Monte Carlo.

Convolución de funciones

Este método consiste en que a cada rayo incidente en el sistema óptico, se le asocia el cono de distribución de irradiancia solar. Una vez que el cono solar es reflejado, la distribución se ve modificada por los errores aleatorios en la superficie de los espejos. La nueva forma del cono solar puede conocerse a través de una técnica matemática llamada convolución de funciones. La función que es resultado de aplicar esta técnica, representa el “traslape” de una función g al ser “subida” en el dominio otra función f . En el siguiente ejemplo (ver figura 2.20) el dominio de la función g es “subido” en tres puntos del dominio de la función f . En el primer punto, vemos que, si no hay traslape de las funciones entonces el valor de la

convolución es cero. Si ambas funciones traslapan totalmente el valor de la convolución es igual al área de traslape

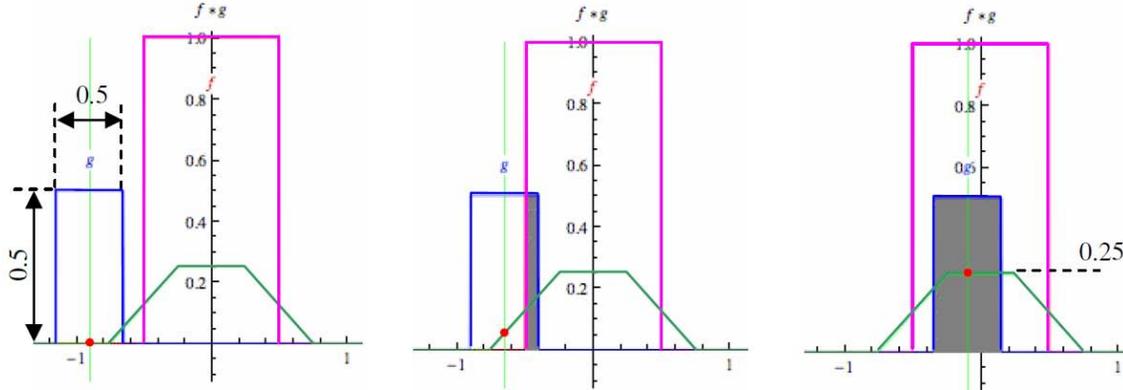


Figura 2.20. Ejemplo de la convolución de dos funciones.

Matemáticamente podemos definir la convolución de dos funciones mediante la siguiente integral.

$$(f * g)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t - \tau) d\tau \quad (2.6)$$

El significado físico de la convolución, en el problema de la reflexión del cono solar, está en términos de que la distribución de error que representa una probabilidad de que un rayo perteneciente al cono solar sea reflejado en una cierta dirección.

De manera similar al procedimiento seguido para realizar la convolución del cono solar con una función de error óptico global. Los diversos errores ópticos pueden convolucionarse para obtener la función de error global y que es resultado del efecto combinado de los errores ópticos individuales. La convolución es una operación que se realiza entre dos funciones. Así que en caso de tener 3 o más distribuciones de error, la tercera distribución puede convolucionarse con el resultado de las primeras dos, y así sucesivamente hasta convolucionar todas las distribuciones de error.

Los códigos numéricos que emplean el método de convolución de funciones para modelar sistemas ópticos de concentración solar, son el CIRCE2 [Romero, 1984] y el TONALLI [Riveros, 2011].

Método de Monte Carlo

El método Monte Carlo es un método numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias. El método Monte Carlo está basado en las características estocásticas de los procesos físicos [Howell, 1998], y fue bautizado así por su clara analogía con los juegos de ruleta de los casinos, el más célebre de los cuales es el de Monte Carlo, casino cuya construcción fue propuesta en 1856 por el príncipe Carlos III de Mónaco, siendo inaugurado en 1861.

La importancia actual del método Monte Carlo se basa en la existencia de problemas que tienen difícil solución por métodos exclusivamente analíticos o numéricos, pero que dependen de factores aleatorios o se pueden asociar a un modelo probabilística artificial (resolución de integrales de muchas variables, trazado de rayos, etc.). A diferencia de los métodos numéricos que se basan en evaluaciones en N puntos en un espacio M -dimensional para producir una solución aproximada, el método de Monte Carlo tiene un error absoluto de la estimación que decrece como $1/\sqrt{N}$ en virtud del teorema de límite central, donde N es el número de pruebas y, por tanto, ganar una cifra decimal en la precisión implica aumentar N en 100 veces.

En matemáticas, y más concretamente en análisis numérico, se conocen como métodos de Monte Carlo a una serie de métodos de integración numérica que se basan en la utilización de números pseudoaleatorios. Es decir, los métodos de integración de Monte Carlo son algoritmos para encontrar una evaluación aproximada de una integral definida, normalmente de integrales múltiples. Los algoritmos deterministas de integración numérica, para aproximar la integral, evalúan la función en un conjunto de puntos correspondientes a una parrilla regular o en un conjunto de puntos predefinidos. En cambio, los métodos de Monte Carlo eligen de forma aleatoria los puntos en los que se evaluará la función.

Los códigos numéricos para la modelación de sistemas ópticos de concentración solar que utilizan el método Monte Carlo son el SolTrace desarrollado por NREL, Estados Unidos (National Renewable Energy Laboratory, autores: Tim Wendelin, Allan Lewandowski, Aron Dobos) y el TONATIUH desarrollado por el CENER, España (Centro Nacional de Energías Renovables)

En este trabajo de investigación se utilizó el código SolTrace para la modelación del HoSIER.

Las metodologías para calcular la distribución del flujo radiativo que se concentra en la zona focal dan resultados teóricos, los cuales sirven para el diseño de sistemas ópticos de concentración solar. Para poder evaluar un sistema óptico real, es necesario aplicar metodologías experimentales que permitan conocer sus características.

2.3 Método experimental. Cámara CCD y superficie lambertiana

Para conocer la distribución real de la radiación solar concentrada en la zona focal del sistema de concentración del HoSIER, se aplicó una metodología experimental basada en la toma de imágenes de la radiación solar concentrada que incide sobre una superficie plana ubicada en la zona focal. Las imágenes se obtienen mediante una cámara digital CCD (Charge-Coupled Device, en español: dispositivo de carga acoplada) que se alinea y enfoca con la normal de la superficie plana ubicada de manera perpendicular al eje focal del sistema óptico de concentración del HoSIER y en su foco (3.68 m).

Cámara digital CCD

Una cámara digital es una cámara fotográfica que, en vez de captar y almacenar fotografías en película química como las cámaras fotográficas de película fotográfica, recurre a la fotografía digital por medio de sensores CCD. El CCD es un sensor con diminutas células fotoeléctricas que registran la imagen en la tarjeta de memoria.

Un CCD es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados. Bajo el control de un circuito interno, cada condensador puede transferir su carga eléctrica a uno o a varios de los condensadores que estén a su lado en el circuito impreso.

La capacidad de resolución o detalle de la imagen depende del número de células fotoeléctricas del CCD. Este número se expresa en píxeles. A mayor número de píxeles, mayor nitidez en relación con el tamaño.

Los píxeles del CCD registran gradaciones de los tres colores básicos: rojo, verde y azul (abreviado "RGB", del inglés red, green, blue). Para conseguir esta separación de colores, la mayoría de cámaras CCD utilizan un filtro de Bayer (ver figura 2.21) que proporciona una trama para cada conjunto de cuatro píxeles de forma que un pixel registra luz roja, otro luz azul y dos píxeles se reservan para la luz verde (el ojo humano es más sensible a la luz verde que a los colores rojo o azul). El resultado final incluye información sobre la luminosidad en cada píxel pero con una resolución en color menor que la resolución de iluminación.

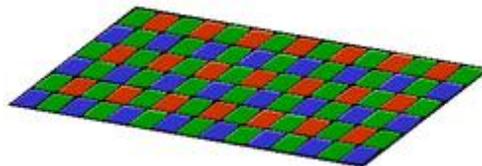


Figura 2.21. Filtro de Bayer utilizado en numerosas cámaras digitales

Los detectores CCD, al igual que las células fotovoltaicas, se basan en el efecto fotoeléctrico, la conversión espontánea de luz recibida en corriente eléctrica que ocurre en algunos materiales. La sensibilidad del detector CCD depende de la eficiencia cuántica del chip, la cantidad de fotones que deben incidir sobre cada detector para producir una corriente eléctrica. El número de electrones producido es proporcional a la cantidad de luz recibida (a diferencia de la fotografía convencional sobre negativo fotoquímico). Al final de la exposición los electrones producidos son transferidos de cada detector individual por una variación cíclica de un potencial eléctrico aplicada sobre bandas de semiconductores horizontales y aisladas entre sí por una capa de SiO_2 . De este modo, el CCD se lee línea a línea, aunque existen numerosos diseños diferentes de detectores.

En todos los CCD el ruido electrónico aumenta fuertemente con la temperatura y suele doblarse cada 6 u 8 °C. En aplicaciones astronómicas de la fotografía CCD es necesario refrigerar los detectores para poder utilizarlos durante largos tiempos de exposición.

Las imágenes obtenidas por una cámara CCD son sometidas a un proceso de corrección que consiste en restar de la imagen obtenida la señal producida espontáneamente por el chip por excitación térmica (campo oscuro) y dividir por una imagen de un campo homogéneo (campo plano o flat field) que permite corregir las diferencias de sensibilidad en diferentes regiones del CCD y corregir parcialmente defectos ópticos en la cámara o las lentes del instrumento utilizado.

Para que la imagen de la distribución fotonica de la radiación solar concentrada tomada con la cámara CCD sobre una superficie plana ubicada en el foco del HoSIER, registre correctamente esa distribución, se requiere que la superficie sea completamente difusa, esto quiere decir que sea una superficie lambertiana.

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 2.22.

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.

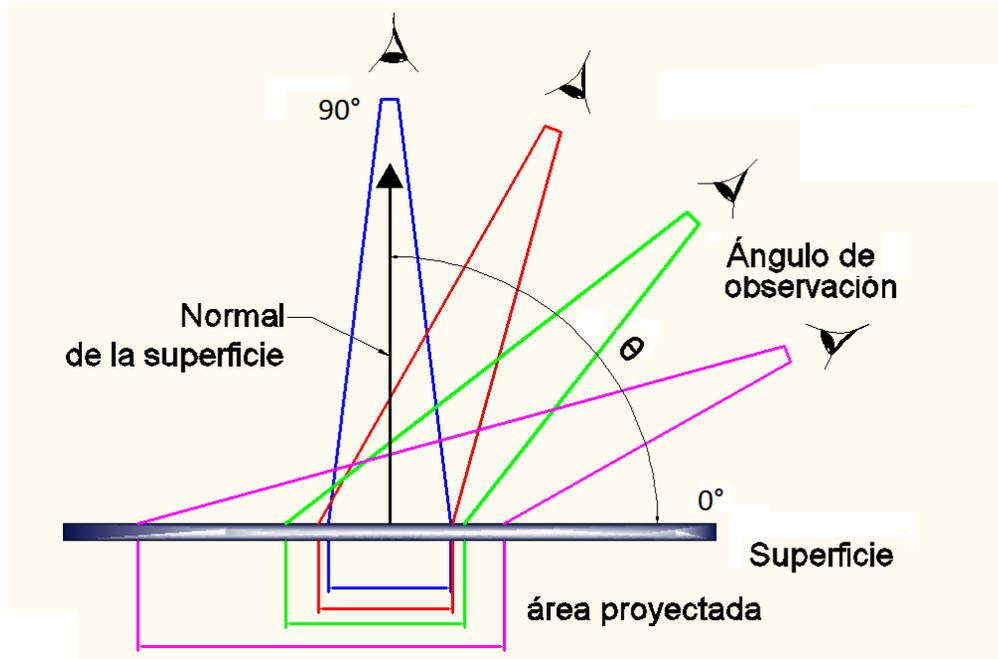


Fig.2.22 Efecto de la variación del área proyectada en una superficie respecto al ángulo de observación.

Se denomina emisor o reflector lambertiano, a cualquier superficie cuya radiancia varía en una función coseno respecto al ángulo de incidencia 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 θ entre la dirección considerada y la dirección normal a la superficie [Gómez, 2006].

$$E(\theta) = E_o \cos \theta \quad (2.7)$$

Considerando un flujo luminoso uniforme y colimado, que incide sobre una superficie plana y se distribuye sobre ésta, según el ángulo de incidencia θ como se muestra en la figura 2.23; el rectángulo de longitud L y ancho W recibe el flujo radiante E_o , cuya dirección de incidencia forma un ángulo θ con la normal de la superficie.

Si se considera al área proyectada A_o que tiene un ángulo θ 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:

$$E A = E_o A_o \quad (2.8)$$

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

$$A_o = A \cos \theta \quad (2.9)$$

De las ecuaciones 2.8 y 2.9, se tiene la ecuación 2.10 de la ley de Lambert o del coseno.

$$E = E_o \cos \theta \quad (2.10)$$

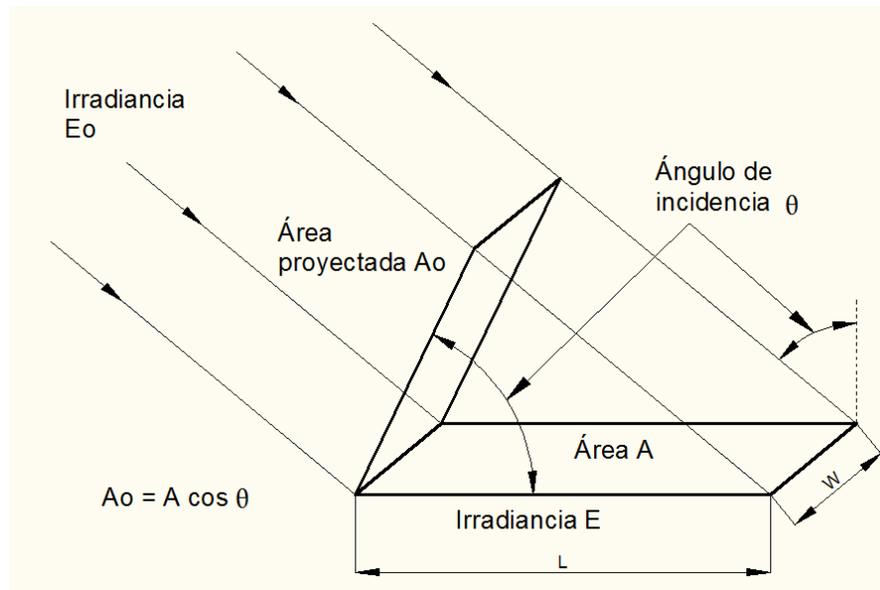


Fig. 2.23 Geometría involucrada en un emisor lambertiano.

Resumiendo, en el comportamiento de una superficie lambertiana, se involucran 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 el ángulo de incidencia de la radiación respecto a la normal de la superficie varía, 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 2.24, para un ángulo de incidencia θ_1 de la radiación, la intensidad que ve el observador es la misma para cualquier ángulo de observación β_1 ; para el caso del ángulo de incidencia θ_2 , el observador ve la misma intensidad en cualquier ángulo de observación β_1 . Sin embargo la intensidad que aprecia con una incidencia θ_2 es menor que la intensidad apreciada con una incidencia θ_1 .

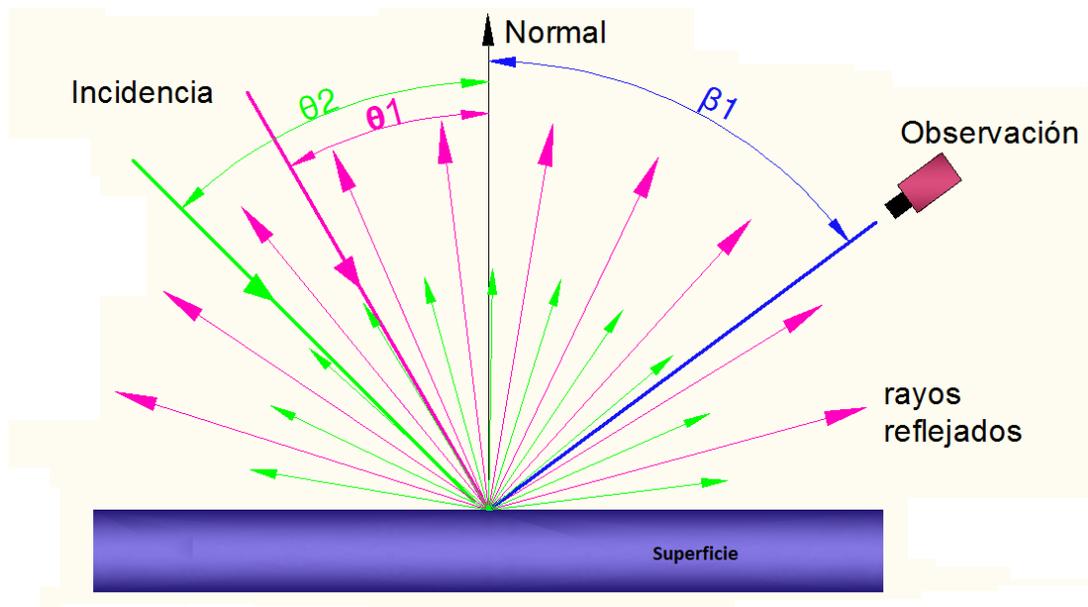


Fig.2.24 Efectos de la reflexión e intensidad en una superficie lambertiana

Con las metodologías descritas hasta ahora, es posible conocer las propiedades ópticas de los sistemas ópticos del HoSIER. Para conocer las propiedades térmicas es necesaria la implementación de otro tipo de metodologías que se describen a continuación.

2.4 Métodos para determinar la potencia térmica

Para conocer la potencia térmica (Q_e , [W]) del HoSIER, se pueden emplear varios métodos, uno de ellos es conociendo las características geométricas y físicas de los elementos ópticos

del sistema de concentración como lo es el área efectiva de captación (A_e , [m²]), la reflectividad del helióstato (ρ_h) y la reflectividad del concentrador (ρ_c). Estas reflectividades se ven afectadas por la suciedad que se deposite sobre los espejos, además de la medición de la radiación solar directa (I_b , [W/m²]) por medio de un pirheliómetro, como se presenta en la siguiente ecuación.

$$Q_e = I_b A_e \rho_h \rho_c \quad (2.11)$$

Otra forma de conocer la potencia térmica es por medio de un dispositivo que permita englobar todos los parámetros que se consideran en el método anterior (características geométricas y físicas) y sin necesidad de medir la radiación solar directa, el principio de este dispositivo es que por medio de un receptor se logre captar toda la radiación solar concentrada y transferir esa potencia térmica a un fluido que se monitorea para conocer su caudal (\dot{m}) y su diferencia de temperaturas entre la entrada (T_{in}) y la salida (T_{out}), lo que permite calcular la potencia absorbida (Q_c) por medio de la ecuación siguiente:

$$Q_c = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2.12)$$

Dependiendo de la capacidad que tenga el receptor para absorber la radiación solar concentrada que incide sobre su superficie o la que pasa a través de la abertura de su cavidad, será la exactitud con la que se logre medir la potencia térmica (Q_e) del sistema de concentración solar. Las propiedades físicas y geométricas del receptor definen la absorptancia (α) del dispositivo y puede ser real (α_r , de la superficie del receptor) si se considera un receptor plano, o aparente (α_a , de la abertura) si se trata de una cavidad. Tomando en cuenta esta consideración, la potencia absorbida (Q_c) se puede también calcular a partir de la potencia de entrada (Q_e) y la absorptancia (α) del dispositivo.

$$Q_c = \alpha \cdot Q_e \quad (2.13)$$

Otra forma de estimar la potencia solar concentrada (Q_e) es analizando la distribución de flujo radiativo que incide sobre un receptor plano ubicado en la zona focal, la cual se puede aproximar mediante una distribución normal como:

$$Q_e(r) = F_{max} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\mu^2}\right) \quad (2.14)$$

Donde r es la distancia del radio del spot, F_{\max} es el valor máximo de flujo radiativo en $r = 0$ y μ es la desviación estándar de la distribución. Para conocer el valor de F_{\max} se puede usar un sensor de flujo radiativo como el gardon.

En los dispositivos receptores del tipo cavidad se logra tener una absortancia mayor que en los de superficie plana, debido a que los de cavidad se aproximan al concepto de cuerpo negro.

Concepto de cuerpo negro

Un cuerpo negro es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. A pesar de su nombre, el cuerpo negro emite luz y constituye un sistema físico idealizado para el estudio de la emisión de radiación electromagnética. El nombre Cuerpo negro fue introducido por Gustav Kirchhoff en 1862. La luz emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro.

Todo cuerpo emite energía en forma de ondas electromagnéticas, siendo esta radiación, que se emite incluso en el vacío, tanto más intensa cuando más elevada es la temperatura del emisor. La energía radiante emitida por un cuerpo a temperatura ambiente es escasa y corresponde a longitudes de onda superiores a las de la luz visible (es decir, de menor frecuencia). Al elevar la temperatura no sólo aumenta la energía emitida sino que lo hace a longitudes de onda más cortas; a esto se debe el cambio de color de un cuerpo cuando se calienta. Los cuerpos no emiten con igual intensidad a todas las frecuencias o longitudes de onda, sino que siguen la ley de Planck.

A igualdad de temperatura, la energía emitida depende también de la naturaleza de la superficie; así, una superficie mate o negra tiene un poder emisor mayor que una superficie brillante. Por ello, la energía emitida por un filamento de carbón incandescente es mayor que la de un filamento de platino a la misma temperatura. La ley de Kirchhoff establece que un cuerpo que es buen emisor de energía es también buen absorbente de dicha energía. Así, los cuerpos de color negro son buenos absorbentes.

Ley de Stefan Boltzman

La ley de Stefan-Boltzmann establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura:

$$E = \sigma T_e^4 \quad (2.15)$$

Donde T_e es la temperatura efectiva, es decir, la temperatura absoluta de la superficie y σ es la constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$). Esta potencia emisiva de un cuerpo negro (o radiador ideal) supone un límite superior para la potencia emitida por los cuerpos reales. La potencia emisiva superficial de una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$E = \varepsilon\sigma T_e^4 \quad (2.16)$$

Donde epsilon (ε) es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad, con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende marcadamente del material de la superficie y de su acabado, de la longitud de onda, y de la temperatura de la superficie.

Capítulo 3

Caracterización Óptica del Horno Solar del IER

Como ya se mencionó anteriormente, la caracterización óptica del HoSIER consiste básicamente en conocer la distribución de la radiación solar concentrada en la zona focal del concentrador y a partir de esa distribución, encontrar el error óptico global y la relación de concentración del HoSIER. Para conocer el error óptico global se hizo la comparativa entre el perfil de distribución real de la radiación solar concentrada en el foco del concentrador y el obtenido a partir de la modelación teórica con el método de trazado de rayos. El perfil real se obtuvo de imágenes de la radiación solar concentrada incidente sobre una superficie plana ubicada en el foco del concentrador, tomadas por medio de una cámara CCD. En cuanto a los niveles de concentración solar que se alcanzan en el HoSIER, se estimaron primero a partir de la ecuación 1.2 presentada en el capítulo 1 y posteriormente se hicieron mediciones directas del flujo radiativo por medio de un Gardon (sensor para la medición de flujos radiativos concentrados). Para fines prácticos llamaremos “spot” a la radiación solar concentrada que incide sobre una superficie plana ubicada en la zona focal del concentrador.

3.1. Error óptico global del HoSIER

Por medio del código SolTrace, se hicieron varias modelaciones de la radiación solar concentrada incidente en una superficie plana ubicada de forma perpendicular al eje óptico del concentrador del HoSIER y en el foco, variando el error óptico desde 0 hasta 4 mrad (4 mrad era el máximo valor esperado en el diseño del HoSIER) [Riveros, 2008] con incrementos de 1 mrad. Para hacer la modelación en SolTrace, se requiere definir la forma solar, que en este caso se utilizó la del Sol estándar. Posteriormente se debe introducir en el programa las coordenadas de ubicación del vértice de cada elemento óptico, la dirección hacia la que está orientada su normal (dentro de un sistema de coordenadas globales), la abertura (forma geométrica y dimensiones), la superficie (para el caso de los espejos del heliostato, superficie plana y para los del concentrador superficie esférica) y los índices de reflexión, refracción y transmitancia de cada elemento según aplique.

La cantidad de rayos con la que se hicieron las modelaciones fue de 5×10^6 , y se definió un tamaño de celda de la malla de 2 mm x 2 mm. En la imagen de la figura 3.1 se presenta el resultado de la modelación con un error de 2 mrad. Y en la gráfica de la figura 3.2 se presentan los diversos perfiles normalizados correspondientes a cada error óptico modelado. Las líneas verticales de color negro corresponden a las posiciones -0.024, -0.20, 0.020 y 0.024, en esos intervalos se encuentran las máximas diferencias absolutas en la intensidad de flujo entre los perfiles con errores de 1 a 4 mrad y el perfil sin error (0 mrad). En la gráfica de la figura 3.3 se presentan las diferencias absolutas punto por punto entre los perfiles con errores de 1 a 4 mrad y el perfil sin error. Las diferencias absolutas punto por punto se calcularon con la siguiente ecuación:

$$da_{(n-0)}(r) = |In_r - I0_r| \quad (3.1)$$

Donde n corresponde al error en miliradianes (1, 2, 3 y 4 mrad), $da_{(n-0)}$ es la diferencia absoluta en la posición r , In_r es la intensidad normalizada de flujo radiativo que correspondiente a la posición r del perfil con error n e $I0_r$ corresponde a la intensidad normalizada de flujo radiativo correspondiente a la posición r del perfil con error 0.

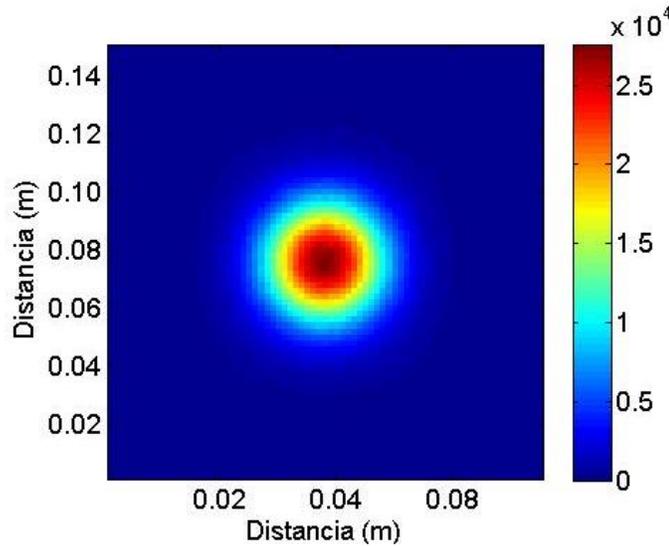


Figura 3.1. Imagen del spot de la modelación en SolTrace con un error óptico de 2 mrad y con una escala de intensidades de flujo en kW/m^2 .

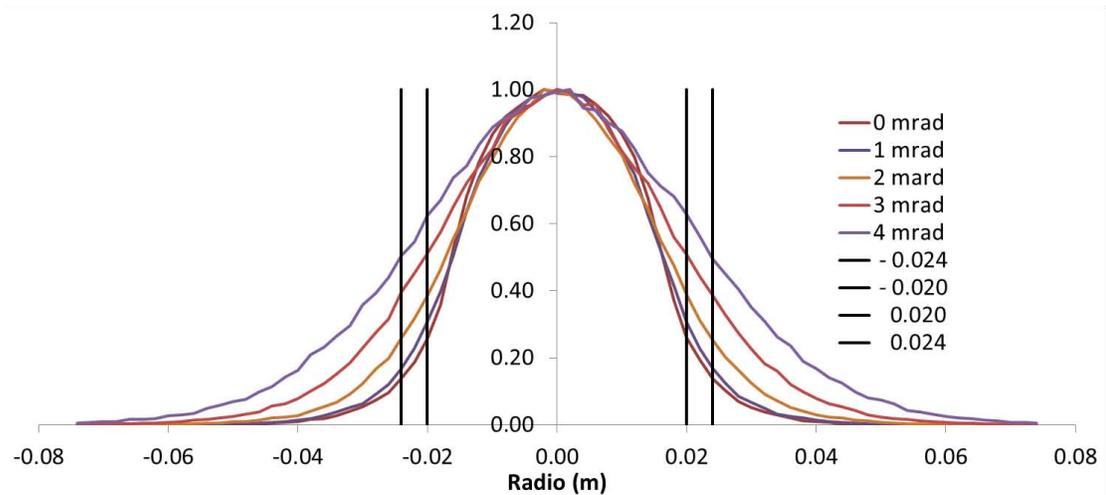


Figura 3.2. Comparativa de los perfiles de distribución de la radiación solar concentrada en el foco del concentrador con errores ópticos de 0 a 4 mrad modelados en SolTrace y las regiones que presentan las máximas diferencias absolutas comparadas con el perfil sin errores.

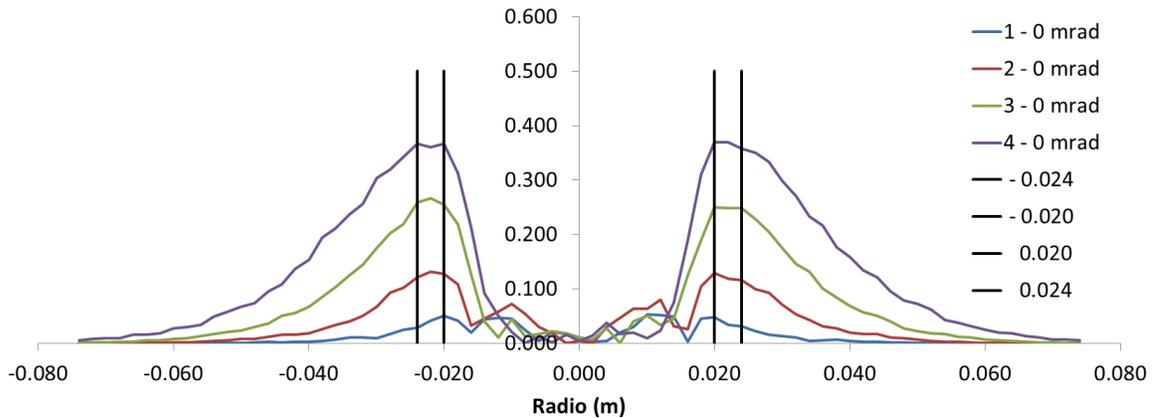


Figura 3.3. Diferencias punto por punto entre los perfiles con errores de 1 a 4 mrad y el perfil sin error.

Como se puede apreciar en la gráfica de la figura 3.2, conforme el error óptico aumenta, la distribución es más extendida, lo cual es de esperarse. Ahora, para conocer el error óptico global del HoSIER es necesario comparar el perfil de la distribución real de la radiación solar concentrada en el foco del concentrador, contra los perfiles obtenidos en la modelación con los diversos errores ópticos.

El comparativo de perfiles teórico es posible hacerlo mediante la simulación del HoSIER con trazado de rayos, sin embargo, para obtener el perfil de la distribución de radiación solar real, es necesario desarrollar un arreglo experimental que permita la toma de imágenes del spot solar en la zona focal del concentrador del HoSIER.

3.2. Dispositivo para la toma de imágenes del spot solar. Placa Plana Lambertiana Refrigerada.

La Placa Plana Lambertiana Refrigerada (PPLR), es un dispositivo consistente en dos placas de aluminio rectangulares y paralelas. El PPLR tiene la función de recibir el spot de la radiación solar concentrada en la zona focal del HoSIER. Para que el spot pueda proyectarse sobre la superficie del PPLR, es necesario que se haga pasar agua entre sus placas, con la finalidad de remover el calor absorbido por la superficie y no sufra daños por altas temperaturas. Además, la superficie sobre la que se proyecte el spot debe ser lambertiana. A continuación se presenta el diseño y construcción del PPLR.

Para definir las dimensiones de la superficie de la placa del PPLR se tomó en cuenta el tamaño del spot ubicado en el foco del concentrador. El diámetro del spot modelado en SolTrace con un error óptico de 4 mrad es de aproximadamente 15 cm. En el esquema de la figura 3.4 se presentan las dimensiones de la placa.

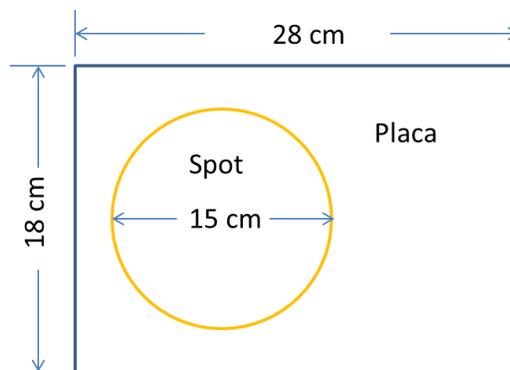


Figura 3.4. Esquema de las dimensiones de la placa del PPLR.

Para definir la forma en que se refrigeraría la placa, se modelaron varias configuraciones por medio de un CFD (Computational Fluid Dynamic) y se determinó que la configuración más adecuada para remover el calor que absorbería la placa fue la de dos colectores tipo manifolds (es un elemento que permite distribuir en varios canales u orificios un fluido proveniente de una sola entrada) ubicados a los extremos de la placa, uno para la entrada de agua y el otro para la salida. En el esquema de la figura 3.5 se puede apreciar la configuración.

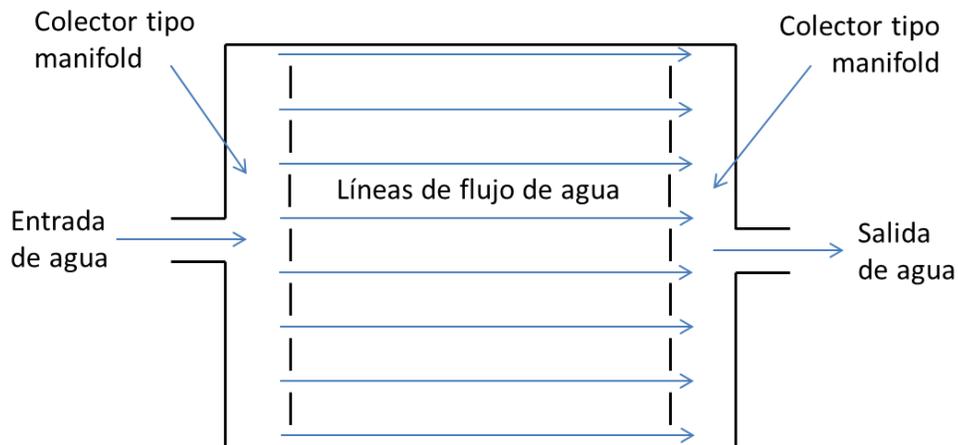


Figura 3.5. Esquema de la configuración del sistema de refrigeración de la placa del PPLR

A la placa se le hizo una perforación de 25.4 mm para que se le pudiera instalar un medidor de flujo radiativo tipo Gardon (ver figura 3.6). Para poder emplear este tipo de sensores de flujo, es necesario que la radiación solar incida únicamente en la superficie de medición por lo que es necesario aislar los costados del sensor.

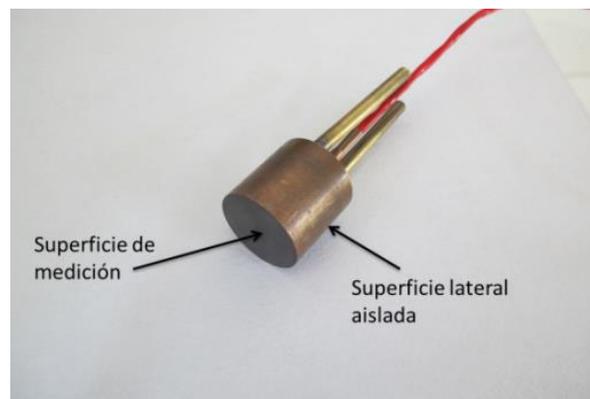


Figura 3.6. Imagen del sensor de flujo radiativo tipo Gardon

En la imagen de la figura 3.7 se presenta el resultado de la modelación de la mecánica del fluido en el que se puede apreciar que el agua fluye como se esperaba debido a la configuración propuesta. El PPLR consiste de dos placas de aluminio de 6.35 mm de espesor, acopladas con sus superficies paralelas, de tal forma que mantienen una separación de 3 mm entre ellas por medio de un empaque, y un barril que atraviesa ambas placas en el

que se introduce el Gardon. En la imagen de la figura 3.8 se presenta un esquema del PPLR y en la figura 3.9 se muestran imágenes reales del PPLR.

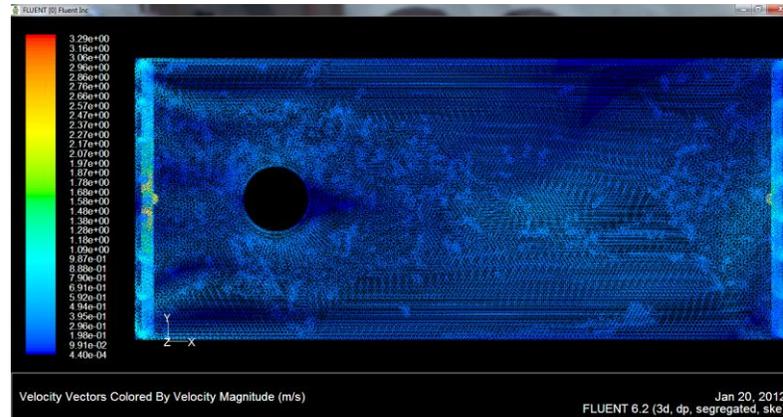


Figura 3.7. Resultado de la modelación CFD del sistema de refrigeración del PPLR. la flecha en azul representan la dirección del flujo de entrada de 4 lpm y la naranja de salida

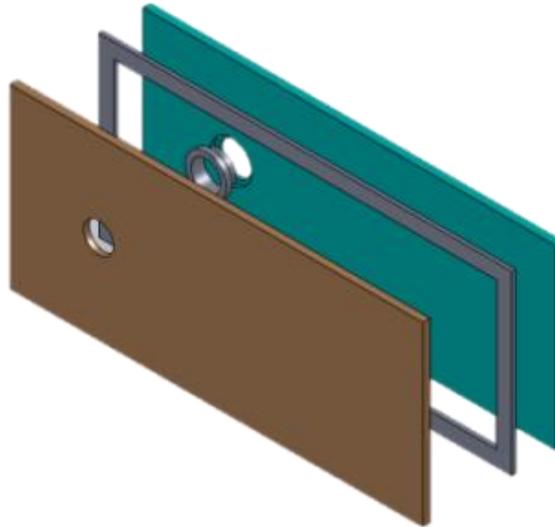


Figura 3.8. Esquema de los componentes del PPLR



Figura 3.9. Imágenes del PPLR.

Para lograr que la superficie del PPLR fuera difusa, 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.

Para probar el funcionamiento del PPLR, se realizaron varias pruebas en las que se incluyen las siguientes:

Prueba de fugas: Esta prueba consistió en inyectar agua dentro del PPLR aumentando gradualmente el flujo másico de 0 lpm hasta 4 lpm verificando si se presentaban fugas en las juntas de unión de las placas. En esta prueba no se detectaron fugas, por lo que se prosiguió con la siguiente prueba.

Prueba de temperatura: En esta prueba se ubicó al PPLR en el foco de concentrador y perpendicular al eje óptico y se hizo incidir sobre su superficie lambertiana la radiación solar concentrada, controlando la apertura del atenuador del HoSIER desde 0 hasta 100% con incrementos del 5%. Con esta prueba se pudo demostrar que el dispositivo es capaz de recibir el 100% de la radiación solar concentrada por el HoSIER sin que sufra daños por altas temperaturas.

Ya que se tuvo construido y probado al PPLR, se instaló una cámara CCD de 8 bits (ver figura 3.10) cerca del vértice del concentrador y sobre el eje óptico. Los datos de la cámara se describen a continuación:

- Marca: ALLIED

- Modelo: Pike F-032
- Resolución: 640 x 480
- Sensor: Kodak KAI-0340



Figura 3.10. Imagen de la cámara CCD utilizada para tomar imágenes del spot.

Para evitar la saturación de la imagen debido a la intensidad luminosa reflejada por la superficie del PPLR al momento de proyectarse el spot sobre ella, fue necesario instalarle filtros neutros a la lente de la cámara CCD.

Una vez instalado el PPLR y la cámara CCD, se tomaron imágenes del spot y se obtuvo el perfil de la distribución real de la radiación solar concentrada al 100% de la apertura del atenuador. En la figura 3.11 se muestra el spot real del HoSIER. Y en la figura 3.12 se presenta el perfil normalizado del spot real del HoSIER.

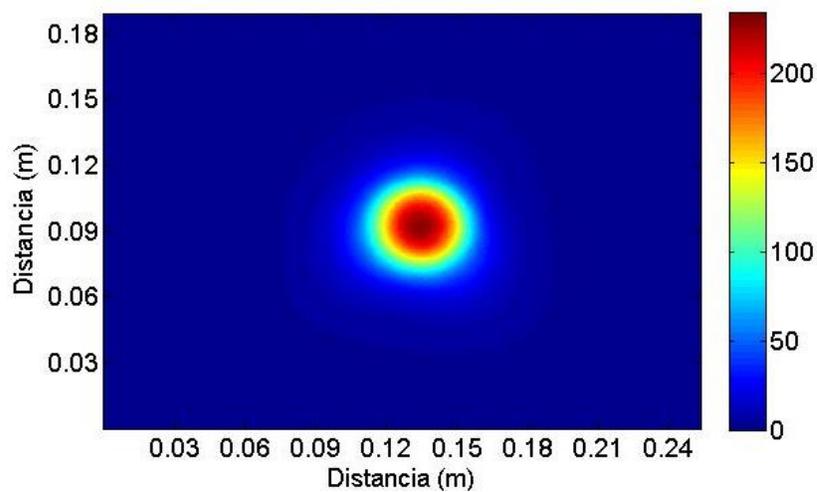


Figura 3.11. Imagen del spot real del HoSIER en escala de grises (0 – 255).

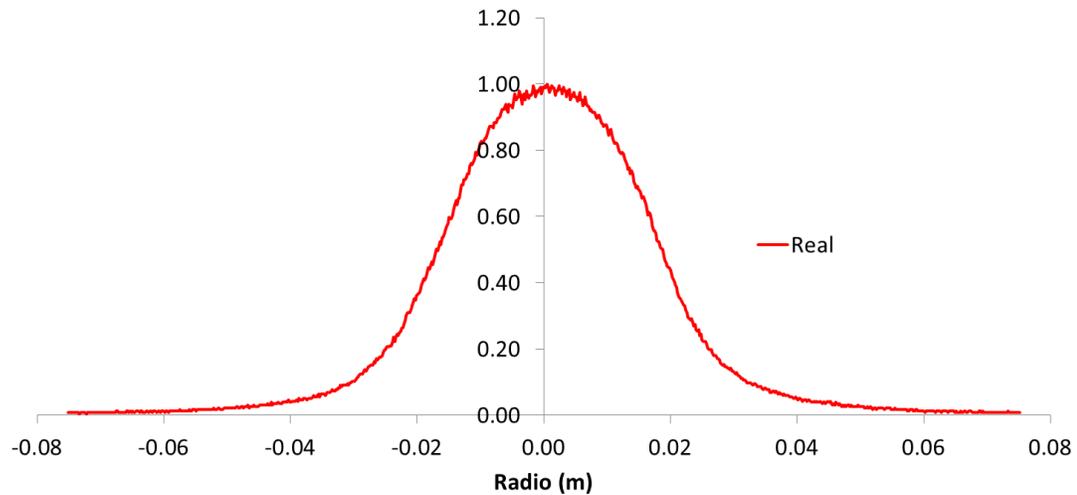


Figura 3.12. Perfil real de la distribución de la radiación solar concentrada por el HoSIER en el foco del concentrador.

Este perfil se compara cualitativamente contra los perfiles obtenidos en la modelación a diferentes errores ópticos y se define como primera aproximación visual, el error óptico global del HoSIER. En la gráfica de la figura 3.13 se presenta la comparativa entre los perfiles modelados en SolTrace y el real obtenido de la imagen del spot real del HoSIER.

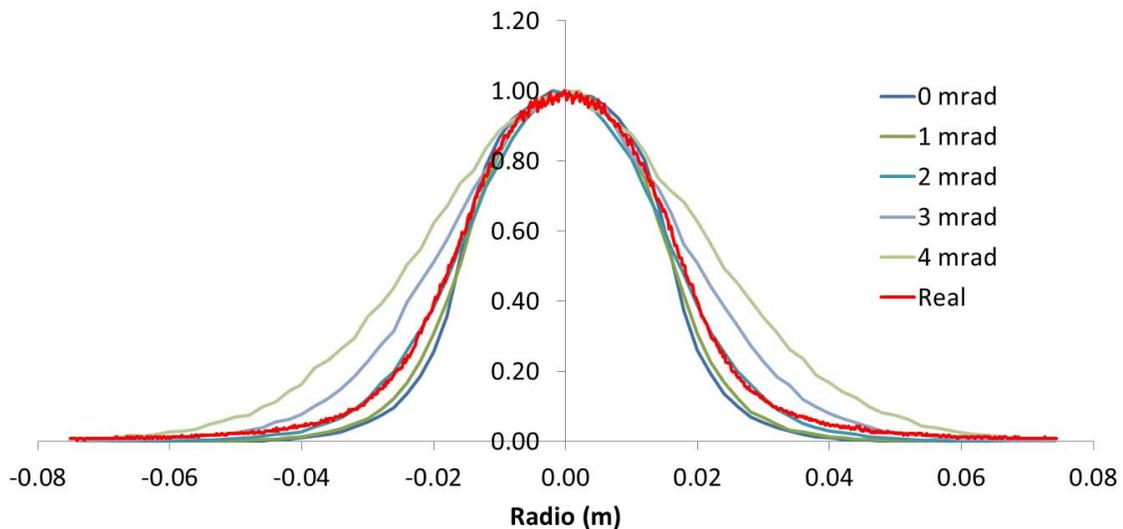


Figura 3.13. Comparativa entre los perfiles modelados en SolTrace y el real.

Como se puede apreciar en la gráfica de la figura 3.13, el perfil real tiene una distribución similar a la distribución modelada con un error óptico de 2 mrad. Ahora, para determinar de forma cuantitativa la distribución obtenida por medio de la modelación que más se aproxima a la real, se hacen modelaciones con errores ópticos desde 1.5 mrad hasta 2.5 mrad con incrementos de 0.1 mrad y se calculan las diferencias absolutas punto por punto entre cada uno de los perfiles modelados y el real, y se analizan los resultados en los intervalos que corresponden a las posiciones de -0.024 a -0.20 y de 0.020 a 0.024. Como se mostró en la gráfica de la figura 3.3. A partir de este análisis se encontró que el perfil de distribución de radiación solar modelado en SolTrace que tiene las menores diferencias absolutas es el que corresponde al del error óptico global de 2.0 mrad. Los resultados de estas diferencias se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Diferencias absolutas promedio entre los perfiles modelados y el real, en los intervalos de -0.024 a -0.020 y de 0.020 a 0.024

Diferencia	Promedio	Desviación estándar
1.5 - real	0.046	0.008
1.6 - real	0.036	0.009
1.7 - real	0.024	0.009
1.8 - real	0.017	0.010
1.9 - real	0.039	0.008
2.0 - real	0.010	0.005
2.1 - real	0.017	0.010
2.2 - real	0.022	0.012
2.3 - real	0.037	0.010
2.4 - real	0.047	0.015
2.5 - real	0.070	0.011

Ya que se definió el error óptico global del HoSIER, ahora se determinará la relación de concentración solar que es capaz de alcanzar en el spot.

3.3. Niveles de concentración solar del HoSIER a partir del “Factor de Horno”

Como se presentó en el capítulo introductorio, la concentración solar de un horno puede expresarse en una primera aproximación de acuerdo a la siguiente expresión:

$$C = FC_{teórica} \quad (3.1)$$

Donde $C_{teórica}$ se determinó a partir de modelar el HoSIER en SolTrace con un error óptico de 2 mrad y F es el “Factor de horno” que está definido por el producto de los diversos coeficientes que afectan al horno.

$$F = \eta_{t1}^2 \eta_{r1} \eta_{d1} \eta_{e1} \eta_s \eta_p \eta_{r2} \eta_{d2} \quad (3.2)$$

Los coeficientes del HoSIER se presentan en la tabla 3.2 y corresponden a tres casos distintos; el primer caso es el ideal, en el que todos los índices son igual a 1, el segundo caso es el óptimo que pudiera lograrse siempre y cuando las persianas del atenuador abrieran exactamente al 100% de su apertura y que los espejos del H81 y del concentrador se encontraran perfectamente limpios, y el tercer caso es un caso más realista de las condiciones en las que se opera el HoSIER.

Tabla 3.2. Coeficientes del HoSIER para tres distintos casos

Símbolo	Descripción	Ideal	Óptimo	Medido
η_{t1}	Transmisividad del vidrio del H81	1.00	0.94	0.94
η_{r1}	Reflectividad de los espejos del H81	1.00	0.91	0.91
η_{r2}	Reflectividad de los espejos del concentrador	1.00	0.91	0.91
η_{e1}	Sombreamiento estructural del horno	1.00	0.98	0.96
η_s	Sombreamiento de mesa experimental	1.00	0.95	0.95
η_p	Sombreamiento por persianas del atenuador	1.00	1.00	0.99
η_{d1}	Factor de suciedad del H81	1.00	1.00	0.90
η_{d2}	Factor de suciedad del concentrador	1.00	1.00	0.95
F	Factor de Horno	1.00	0.68	0.56
C	Relación de concentración solar máxima (soles)	27500	18734	15533

Para comprobar si los niveles de concentración solar calculados mediante el factor de horno corresponden a los que se alcanzan realmente en el HoSIER, se hicieron mediciones de forma directa del flujo de radiación solar que es capaz de concentrar el sistema óptico de concentración en la zona focal, mediante un sensor de flujo como el Gardon.

3.4. Niveles de concentración solar del HoSIER a partir de la medición directa del flujo radiativo

Para poder realizar la medición del flujo radiativo que llega a la zona focal del HoSIER de forma directa se utilizó el PPLR. Este dispositivo permite medir el flujo radiativo de manera simultánea a la toma de imagen del spot, con lo cual se puede ubicar la posición del sensor dentro del spot y así calibrar el perfil de distribución de intensidades de flujo

radiativo. En la figura 3.14 se muestra una imagen del spot, el Gardon y el centroide de la imagen. Se consideró que el Gardon se ubicara en el centro del spot para que registrara el flujo máximo y de esta manera conocer la máxima relación de concentración que es capaz de alcanzar el sistema de concentración solar del HoSIER.

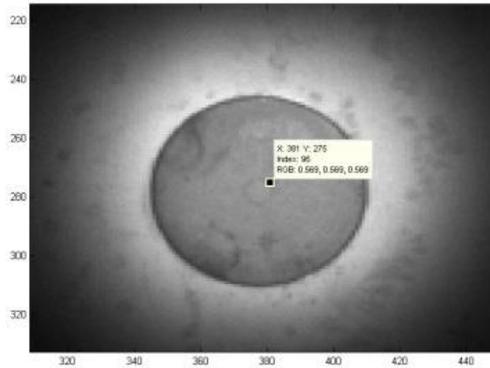


Figura 3.14. Imagen del spot, el Gardon y el centroide del spot

La medición de flujo registrada por el Gardon fue de 15.88 MW/m^2 , con una radiación solar directa en ese momento de 908 W/m^2 . Para obtener la relación de concentración, se dividió el flujo medido por el Gardon entre la radiación solar directa al momento de la medición. Este cociente dio como resultado una relación de concentración máxima de 17489 soles.

La relación de concentración solar calculada a partir de la medición directa del flujo radiativo que se concentra en el spot, corresponde a un Factor de Horno de 0.64, que se aproxima al caso óptimo, lo cual es consistente ya que las condiciones de operación del HoSIER al momento de la medición del flujo radiativo eran que los espejos del H81 y del concentrador se encontraban limpios.

Para tener más información de la distribución de la radiación solar que se concentra en la zona focal del HoSIER, se hizo un análisis teórico y una campaña experimental para determinar la forma volumétrica a partir de protosuperficies de intensidad de flujo radiativo.

3.5. Generación de Protosuperficies de intensidad radiativa en la zona focal

El concepto de protosuperficies se refiere a la superficie creada a partir de intensidades iguales de flujo radiativo obtenidas de las distribuciones de flujo radiativo que se presentan sobre superficies planas paralelas y a lo largo de un mismo eje. Este concepto se describe con mayor claridad a lo largo de este subtema.

Para obtener de manera teórica las protosuperficies de radiación solar concentrada en la zona focal del HoSIER [Pérez-Enciso, 2014] a lo largo del eje óptico del concentrador, se modelaron en SolTrace las distribuciones de radiación solar concentrada sobre un conjunto de planos paralelos y a lo largo del eje óptico a cada 5 mm a partir de una distancia 3.58 m del vértice y hasta 3.78 m, como se pueden apreciar en la figura 3.15.

Con estas distribuciones de radiación solar concentrada obtenidas en los planos modelados, se construyeron las protosuperficies teóricas mediante un código escrito en MatLab®. Estas protosuperficies teóricas se pueden apreciar en las imágenes de la figura 3.16.

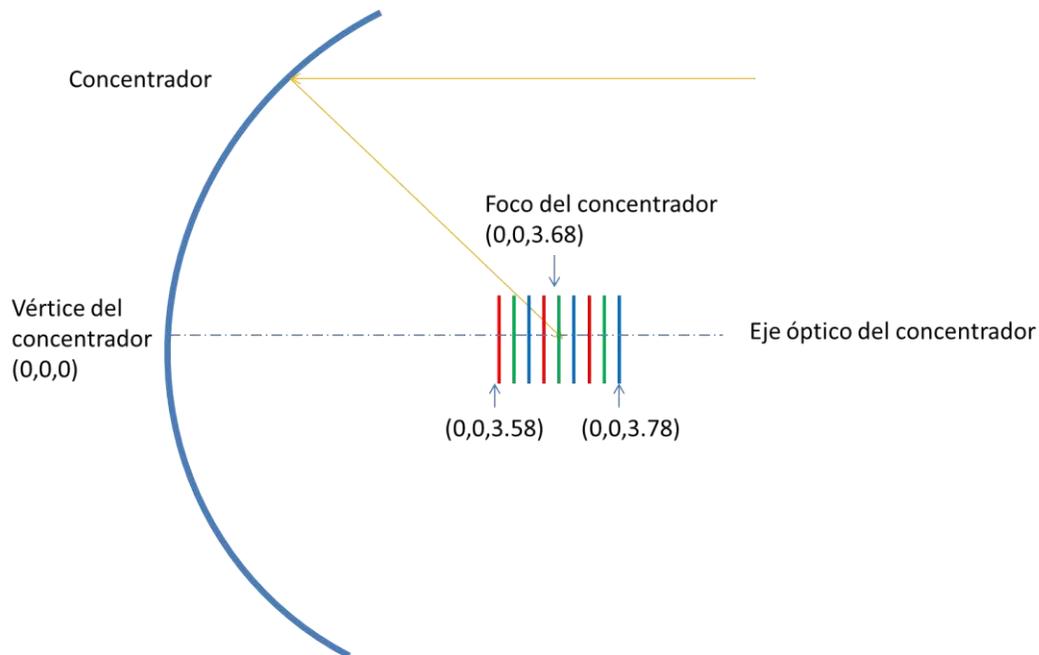


Figura 3.15. Planos paralelos a lo largo del eje óptico del concentrador modelados en SolTrace.

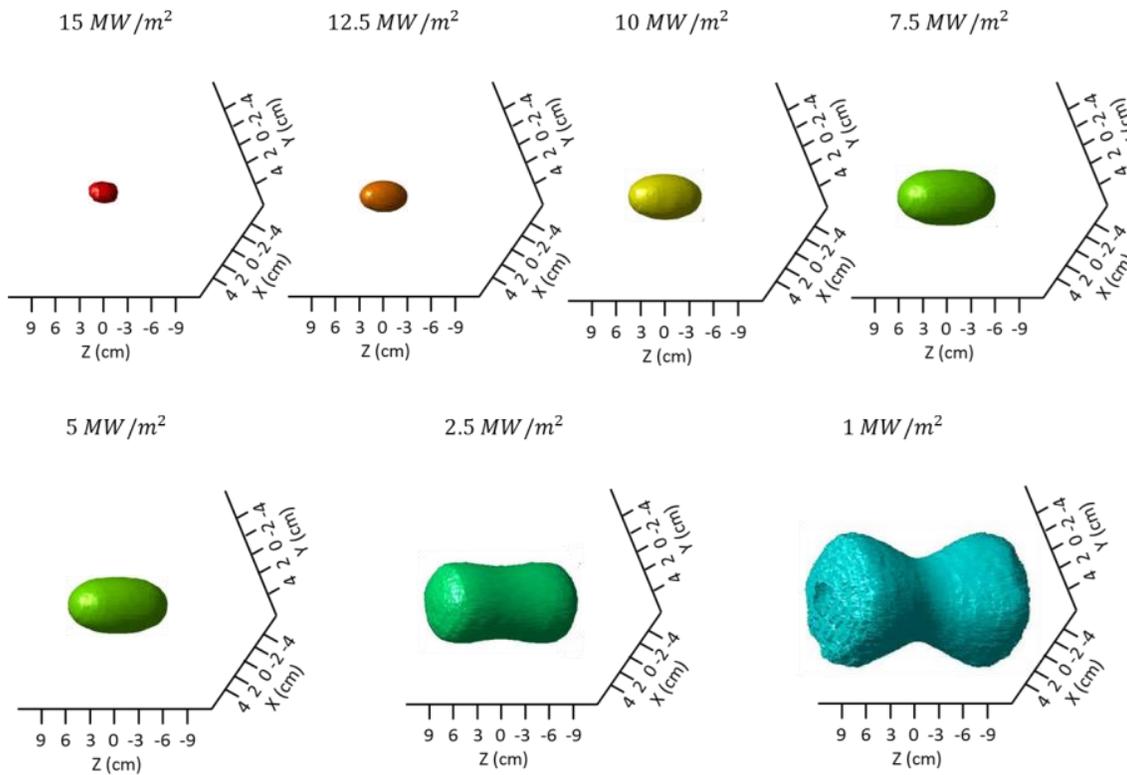


Figura 3.16. Protosuperficies teóricas de radiación solar concentrada en la zona focal del HoSIER, a lo largo del eje óptico del concentrador.

Para verificar si los resultados obtenidos de forma teórica corresponden a la realidad, se desarrolló una campaña experimental que se describe a continuación:

- Se ubicó en la mesa de experimentos el PPLR sobre el que se reflejó la radiación solar concentrada, también se fijó a la misma mesa una cámara CCD para la toma de imágenes, de tal forma que tanto la cámara como el PPLR se movieran de forma simultánea a la mesa. En la figura 3.17 se presenta un esquema de estos componentes.

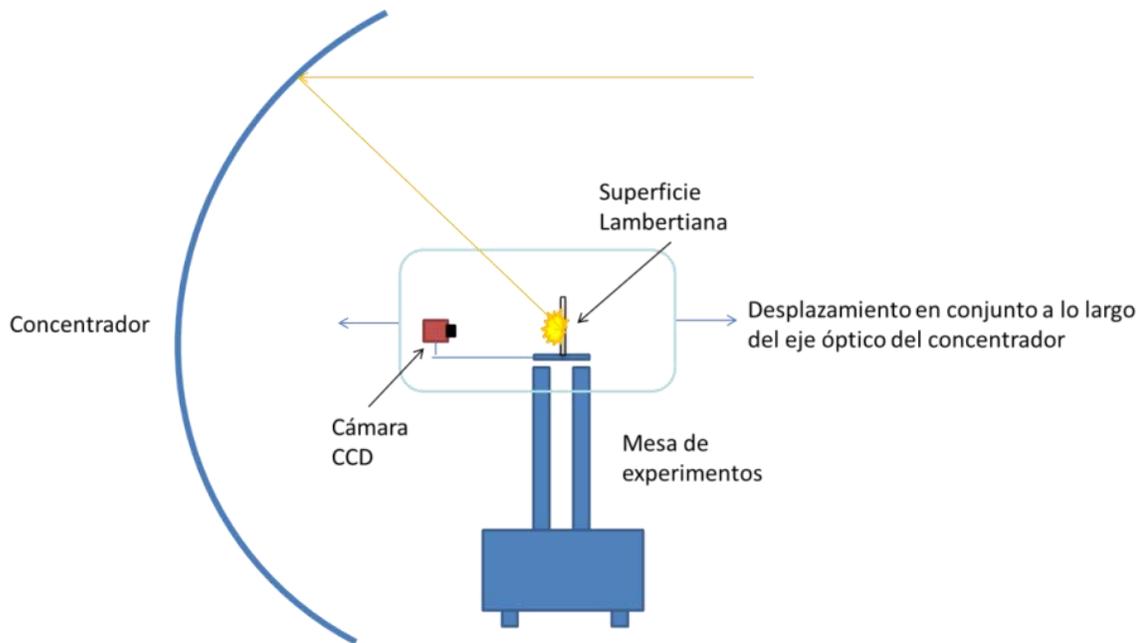


Figura 3.17. Esquema del arreglo experimental para la toma de imágenes de la radiación solar concentrada sobre una superficie lambertiana.

- Una vez que quedó instalado el arreglo experimental, se inició con la toma de imágenes con la cámara CCD, ubicando al PPLR en diversas posiciones a lo largo del eje óptico del concentrador a partir de una distancia de 3.58 m del vértice y hasta 3.78 m, con espaciamentos de 5 mm entre cada posición, tal como se modeló en SolTrace.

A las imágenes tomadas con la cámara CCD fue necesario aplicarles una corrección de posición ya que a lo largo de la prueba el spot de radiación solar concentrada presentó ligeros desplazamientos debidos a errores de seguimiento (deriva, cargas de viento y oscilaciones producidas por los mecanismos), esta corrección se hizo identificando el centriode de cada imagen y compararlos contra el de la imagen central ubicada a 3.68 m del vértice, las imágenes que presentaron centriodes distintos al de la imagen central, se reubicaron para que coincidieran con el de la imagen central de tal forma que todos los centriodes estén sobre un mismo eje.

Una vez que las imágenes fueron corregidas, se utilizó el mismo código con el que se crearon las protosuperficies teóricas. En la figura 3.18 se presentan las protosuperficies experimentales de la radiación solar concentrada en la zona focal del HoSIER.

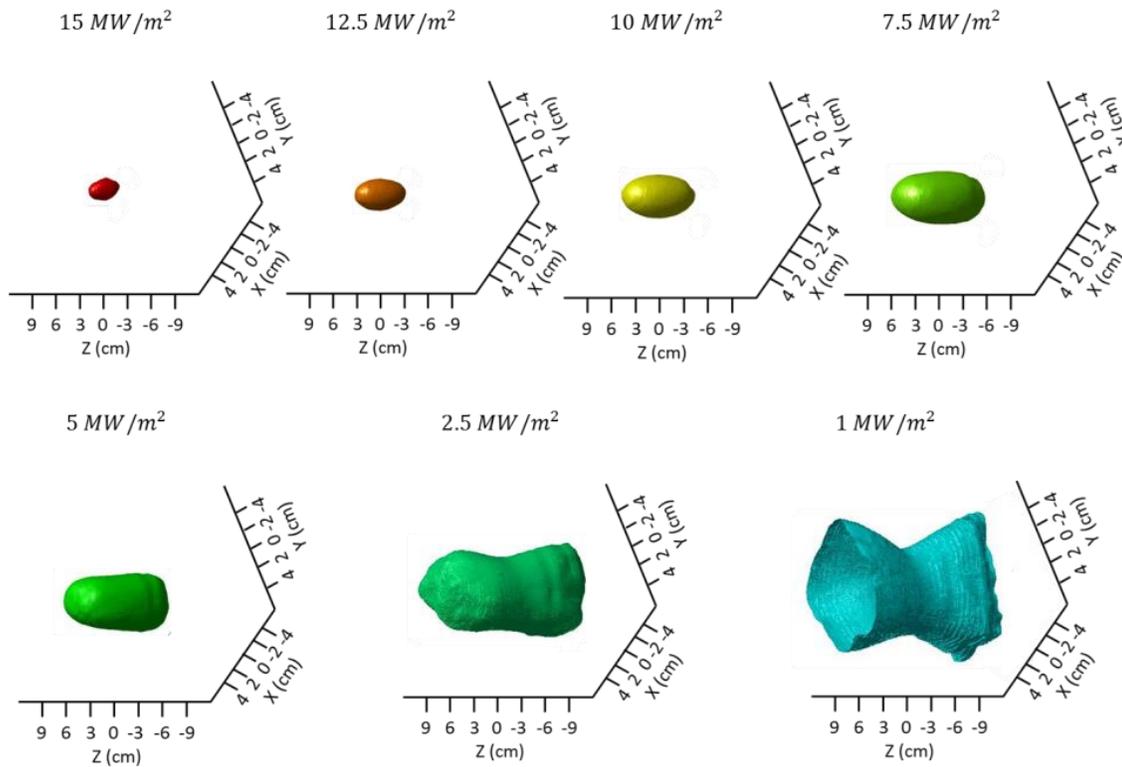


Figura 3.18. Protosuperficies experimentales de radiación solar concentrada en la zona focal del HoSIER, a lo largo del eje óptico del concentrador.

Entre las imágenes de las protosuperficies teóricas y experimentales es posible apreciar que existe una similitud muy estrecha para las mismas intensidades de flujo. Para simplificar la comparativa entre las protosuperficies teóricas y las reales, se compara el perfil teórico contra el real de la distribución de flujo radiativo que se da a lo largo del eje óptico del concentrador. Estos perfiles se presentan en la gráfica de la figura 3.19.

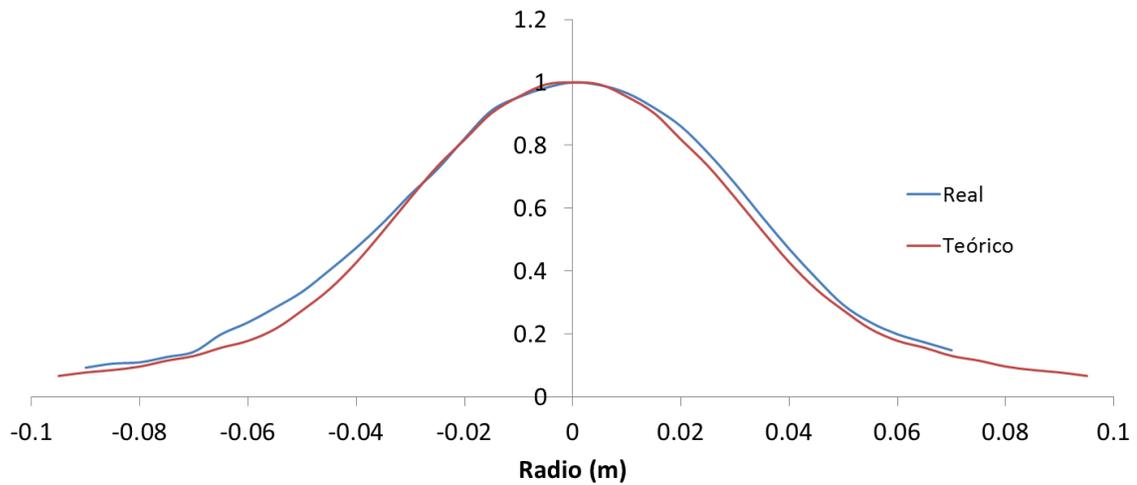


Figura 3.19. Perfiles de distribución de flujo radiativo a lo largo del eje óptico, obtenido a partir de las protosuperficies teóricas y experimentales.

Ya que se definió el error óptico global del HoSIER y los niveles de concentración solar, ahora es necesario conocer la potencia térmica del horno; para lograrlo se hicieron cálculos teóricos y mediciones directas. Estas metodologías y resultados se describen en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Caracterización Térmica del Horno Solar del IER

En este capítulo se presentan las metodologías teóricas y experimentales con las que se determinó la potencia térmica del HoSIER. Para medir de forma directa toda la potencia del HoSIER fue necesario diseñar y construir un calorímetro de cavidad (CAVICAL-2). El diseño del CAVICAL-2 se hizo tomando en cuenta las relaciones geométricas de un calorímetro de cavidad cónica.

4.1. Método calorimétrico. Diseño del calorímetro de cavidad cónica

Para conocer la potencia térmica del HoSIER se pueden emplear varios métodos, uno de ellos es conociendo las características geométricas y físicas de los elementos ópticos del sistema de concentración como lo es el área efectiva de captación y la reflectividad de los espejos (estos parámetros determinan en parte el “Factor de horno”), además de la medición de la radiación solar directa por medio de un pirheliómetro; otra forma de conocer la potencia térmica es por medio de un dispositivo que permita englobar todos los parámetros que se consideran en el método anterior (características geométricas y físicas) y sin necesidad de medir la radiación solar directa. El principio de este dispositivo es que por medio de un receptor se logre captar toda la radiación solar concentrada y transferir esa potencia térmica a un fluido que se monitorea para conocer su caudal y su diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida, lo que permite calcular la potencia absorbida (Q_c) por medio de la ecuación siguiente:

$$Q_c = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (4.1)$$

Dependiendo de la capacidad que tenga el receptor para absorber la radiación solar concentrada que incide sobre su superficie, o la que pasa a través de la abertura de su cavidad, será la exactitud con la que se logre medir la potencia térmica (Q_e) del sistema de concentración solar. Las propiedades físicas y geométricas del receptor definen la

absortancia (α) del dispositivo y puede ser real (α_r , de la superficie del receptor) si se considera un receptor abierto, o aparente (α_a , de la abertura) si se trata de una cavidad. Tomando en cuenta esta consideración, la potencia absorbida (Q_c) se puede también calcular a partir de la potencia de entrada (Q_e) y la absortancia (α) del dispositivo.

$$Q_c = \alpha \cdot Q_e \quad (4.2)$$

Para conocer de manera teórica el valor de la potencia (Q_e) del HoSIER se puede emplear la modelación en SolTrace ya que dentro de la información que se genera al ejecutar el código, está la distribución de flujo y la potencia. Tanto el flujo como la potencia se ven afectados por el valor de la reflectividad que se asigne a los espejos y este valor corresponde al Factor de Horno. En el capítulo 3 se presentaron tres casos distintos: el ideal, el óptimo y el real. En la tabla 4.1 se presentan las potencias que se tendrían en la zona focal del HoSIER para estos tres casos si se tiene una intensidad de radiación solar directa (IDN) de 1000 W/m².

Tabla 4.1. Potencia del HoSIER obtenida con SolTrace

Parámetro	Caso Ideal	Caso óptimo	Caso real
Factor de Horno	1.00	0.68	0.56
Potencia (kW)	38.5	26.2	21.7

Otra forma teórica que resulta práctica para estimar la potencia del HoSIER, es mediante una función distribución normal que coincida con el perfil de distribución de la radiación solar que se obtiene de la modelación en SolTrace, esta función es la siguiente:

$$I_e(r) = F_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\mu^2}\right) \quad (4.3)$$

Donde I_e es la intensidad de flujo radiativo, r es la distancia del radio del spot, F_{\max} es el valor máximo de flujo radiativo que se alcanza en $r = 0$ y μ es la desviación estándar de la distribución. Para que la distribución normal se ajustara a la distribución de flujo obtenida de la modelación del spot solar con un error de 2 mrad, el valor de la desviación estándar fue de $\mu = 0.0147$ m. En la figura 4.1 se compara el perfil de la distribución de flujo obtenido por la ecuación (4.3) y el obtenido de la modelación en SolTrace con error óptico

de 2 mrad, ambos perfiles están normalizados y se puede apreciar que son similares, con una diferencia porcentual máxima entre perfiles punto por punto de 1.4% y una promedio de 0.4 %.

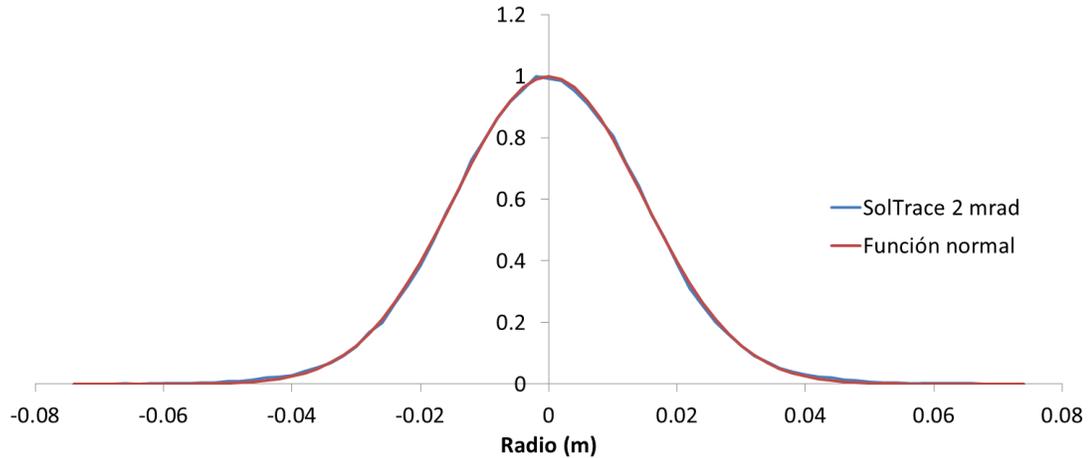


Figura 4.1. Comparativa entre los perfiles del spot solar obtenidos de la función de distribución normal y de la modelación en SolTrace.

Tener definida esta función de distribución de flujo, es de utilidad para el diseño del calorímetro del HoSIER (CAVICAL-2). Como ya se mencionó, el calorímetro que se propone es un calorímetro de cavidad cónica, formado por un cono receptor y una cubierta, las dimensiones del calorímetro deben ser las adecuadas para poder captar toda la radiación solar concentrada por el HoSIER.

Para definir los parámetros geométricos y las dimensiones del cono receptor y la cubierta, se tomaron en cuenta los trabajos previos realizados en el IER del diseño del CAVICAL y el CAVIRAD [Pérez-Rábago, 2006] que son calorímetros de cavidad cónica, y las características del spot solar que se obtiene en el HoSIER en la zona focal a 3.68 m del vértice del concentrador.

Tomando en cuenta que la forma que se definió para la cavidad del calorímetro es un cono con cubierta, las variables que definen sus dimensiones son: el ángulo de apertura del cono (ω), el radio de su base (R_0) y el radio de la abertura de la cubierta (R_a). La relación que existe entre el R_a y R_0 define la relación de la abertura de la cubierta (β) que determina la eficiencia de absorción y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{R_0 - R_a}{R_0} \quad (4.4)$$

Tanto en el CAVICAL como en el CAVIRAD se hicieron minuciosos análisis de la geometría óptima del cono y de la cubierta con las que se obtienen altas eficiencias de absorción. En ambos casos se definió un ángulo de apertura de 15° y una relación de la abertura de la cubierta de 0.62. Con estos parámetros y considerando que el radio del spot solar del HoSIER es del orden de 0.05 m ($3\mu = 0.044 \approx 98\%$ de la energía del spot) y que a lo largo de la prueba para la medición de la potencia del sistema se pudiera presentar algún desplazamiento producido por deriva o backlash no mayor a 1 cm, se definió que el radio de abertura de la cavidad fuera de 0.06 m.

Tomando en cuenta los parámetros anteriores, la altura del cono (L) queda de 0.6 m y R_0 de 0.16 m. En la figura 4.2 se presenta la forma y las dimensiones del cono con cubierta.

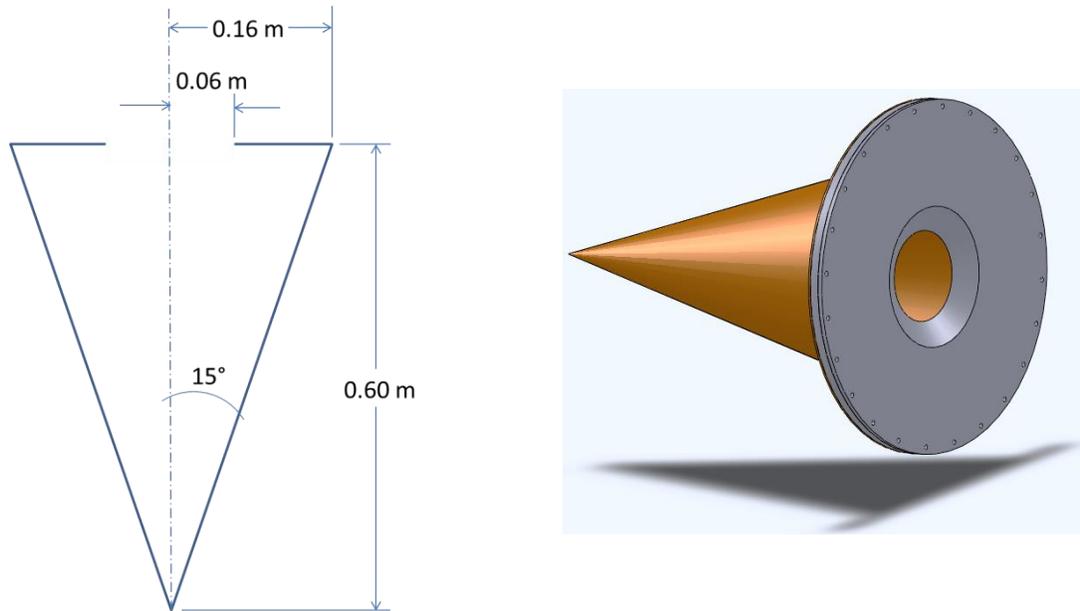


Figura 4.2. Esquema de la cavidad del calorímetro en el que se muestra la forma y sus dimensiones y la vista 3D.

Ya que se definieron las dimensiones de la cavidad, es necesario analizar teóricamente su eficiencia de absorción (η_{ab}) la cual se calcula dividiendo la potencia absorbida entre la potencia recibida. Considerando que el receptor de cavidad está perfectamente aislado, la eficiencia de absorción se puede calcular por la ecuación siguiente:

$$\eta_{ab} = \frac{\alpha_a Q_{ap} - \varepsilon_a \pi R_a^2 \sigma T_w^4}{Q_e} \quad (4.5)$$

Donde Q_{ap} es la potencia que logra pasar a través de la abertura de la cavidad y $(\varepsilon_a \pi R_a^2 \sigma T_w^4)$ es la potencia emitida a través de la abertura, siendo ε_a la emitancia aparente de la abertura, σ la constante de Stephan Boltsman y T_w la temperatura promedio de la superficie interna del cono.

Por medio de la ecuación (4.3) con la cual se aproxima a la distribución de flujo del spot por medio de una función de distribución normal, se puede estimar de forma teórica la Q_e y la Q_{ap} , mediante la integración de volumen de 0 a 2π y definida para el radio en el intervalo de 0 a infinito para la Q_e , y de 0 a R_a para Q_{ap} , quedando las soluciones de la siguiente manera:

$$Q_e = 2\pi\mu^2 F_{max} \quad (4.6)$$

$$Q_{ap} = 2\pi\mu^2 F_{max} \left(1 - \exp\left(-\frac{R_a^2}{2\mu^2}\right) \right) \quad (4.7)$$

Tomando el valor de $F_{max} = 18.73 \text{ MW/m}^2$ correspondiente al factor de horno del caso óptimo, se logran calcular Q_e y Q_{ap} dando valores de $Q_e = 25.4 \text{ kW}$ y $Q_{ap} = 25.4 \text{ kW}$. Además, si se considera que la cavidad se comporta como un cuerpo negro, entonces la absorptancia (α_a) y emitancia (ε_a) aparentes son iguales a 1 y por lo tanto la ecuación de la eficiencia de absorción solo es función de la temperatura de la pared interna del cono (T_w). En la figura 4.3 se presenta una gráfica del comportamiento de la eficiencia de absorción en función de la variación de la temperatura promedio de pared T_w .

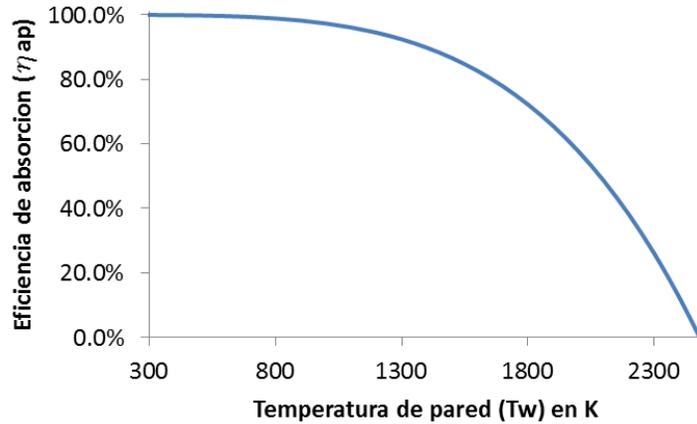


Figura 4.3. Comportamiento de la eficiencia de absorción de la cavidad cónica en función del cambio en la temperatura de la pared interna del cono.

En la figura 4.3 se puede apreciar que para temperaturas de pared menores a 800 K, la eficiencia de absorción es prácticamente del 100%, obviamente este es un valor ideal debido a las consideraciones anteriores, pero sirve como referencia para predecir el comportamiento del sistema.

Para conocer la distribución del flujo radiativo concentrado (I_c) que incide sobre la superficie interior del cono receptor, se modeló el HoSIER y la cavidad en SolTrace. El resultado de la distribución de flujo radiativo se muestra en la figura 4.4.

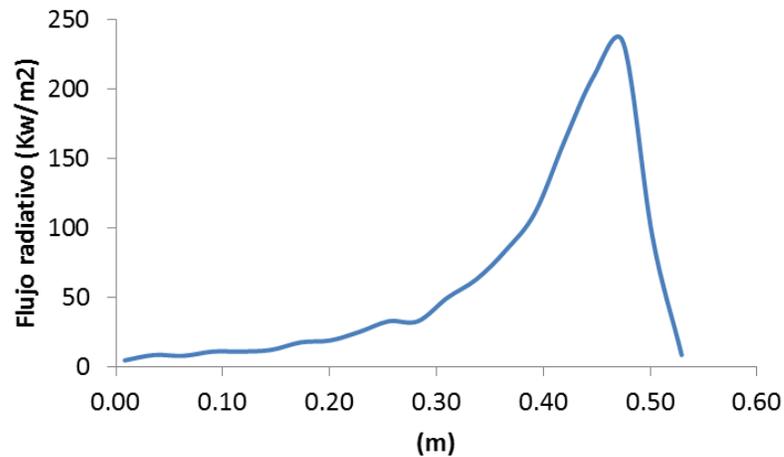


Figura 4.4. Distribución de radiación solar concentrada sobre la superficie interna del cono receptor de la cavidad cónica.

Para poder manipular más fácilmente esta información de distribución de flujo radiativo, se buscó una aproximación por medio de dos expresiones matemáticas en diferentes intervalos

de longitud de la generatriz del cono de la cavidad del CAVICAL-2 (g , generatriz de un cono recto) que se presentan a continuación.

$$I_c = 11.41 + 350.81 \exp\left(-\frac{(g - 0.59)^2}{0.037}\right); (0 \leq g < 0.47) \quad (4.8)$$

$$I_c = \frac{256}{1 + \exp^{107(g-0.5)}}; (0.47 < g \leq 0.61) \quad (4.9)$$

En la figura 4.5 se muestra la comparativa entre los perfiles de I_c obtenidos con la modelación en SolTrace y las ecuaciones (4.8) y (4.9).

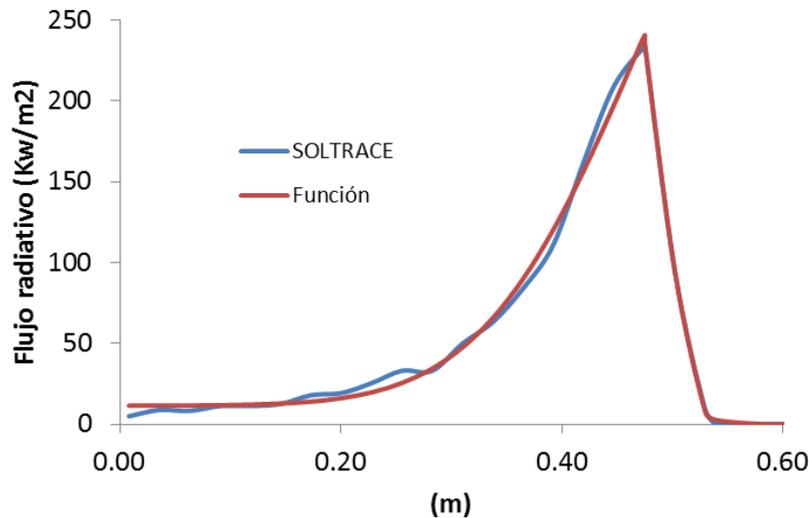


Figura 4.5. Comparativa entre los resultados de la modelación en SolTrace y las funciones de las distribuciones de radiación solar concentrada sobre la superficie interna del cono receptor de la cavidad cónica.

Para calcular el tiempo de respuesta del calorímetro, se utilizaron las ecuaciones obtenidas en trabajos anteriores, específicamente en el del CAVIRAD, en las que se propuso un modelo de transferencia de calor simplificado que consistió en el análisis del método de resistencia interna despreciable, dando una solución para el cálculo de la temperatura promedio de la superficie interna del cono T_w durante el estado transitorio de:

$$T_w = \frac{\dot{Q}_e + hA_w T_f}{hA_w} - \left(\frac{\dot{Q}_e}{hA_w} \right) \exp \left(- \frac{hA_w}{m_{cu} C_p} t \right) \quad (4.10)$$

Donde T_f es la temperatura del fluido, y el tiempo necesario para que se llegue al estado permanente queda definido por:

$$\tau = \frac{m_{cu} C_p}{hA_w} \quad (4.11)$$

La cavidad del CAVICAL-2 se diseñó y fabricó de cobre, la cual, por sus dimensiones, tiene una masa de $m_{cu} = 4.3 \text{ kg}$ y su calor específico $C_p = 381 \text{ J/kgK}$; el coeficiente de transferencia de calor por convección se consideró en un intervalo de $5000 \leq h \leq 10000$, cada $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ y el área de la superficie del cono $A_w = 0.3 \text{ m}^2$. Con estos valores y considerando que en un tiempo de 3τ se alcanza el 98% del estado permanente, se espera que en 4 segundos aproximadamente se alcance el estado permanente con una temperatura promedio que se encuentre en el intervalo de $308 \leq T_w \leq 317 \text{ K}$. En la figura 4.6 se presentan los transitorios de la temperatura promedio de la superficie interna del cono para distintos valores del coeficiente de transferencia de calor por convección.

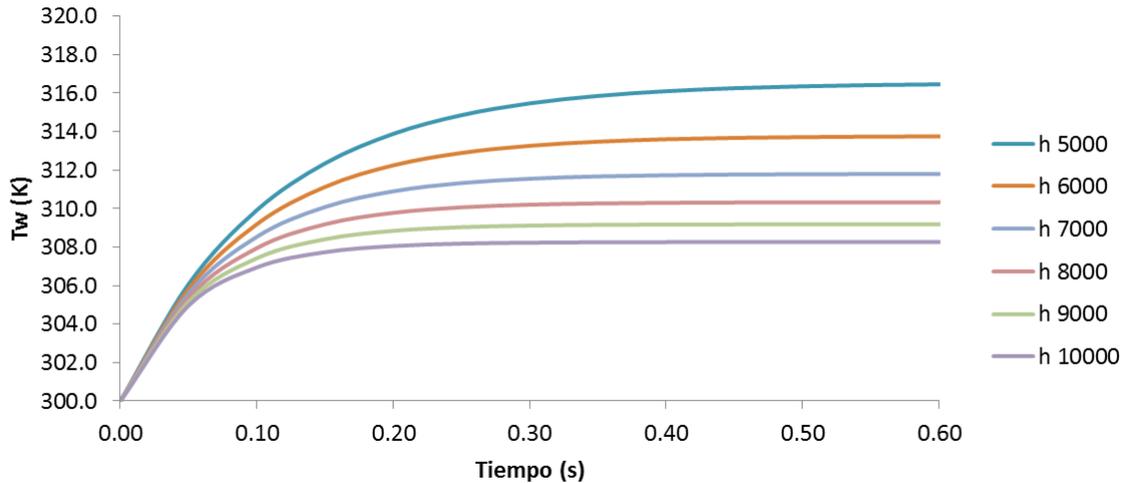


Figura 4.6. Cambio de la temperatura sobre la superficie interna del cono receptor de la cavidad cónica en función del tiempo, para distintos valores de h .

Para conocer la distribución de temperaturas en la cavidad cónica, se desarrolló un programa basado en el método numérico de diferencias finitas, para lo cual se partió de la ecuación general de conducción de calor en coordenadas cilíndricas.

Para resolver la modelación de la transferencia de calor que sucede en el cono receptor, se consideró la sección transversal que va desde el eje de simetría hasta la orilla de la base del cono, ya que se asumió que la distribución de radiación solar concentrada sobre la superficie interna del cono es simétrica respecto al mismo eje de simetría del cono. En la figura 4.7 se presenta un esquema de la sección transversal del cono.

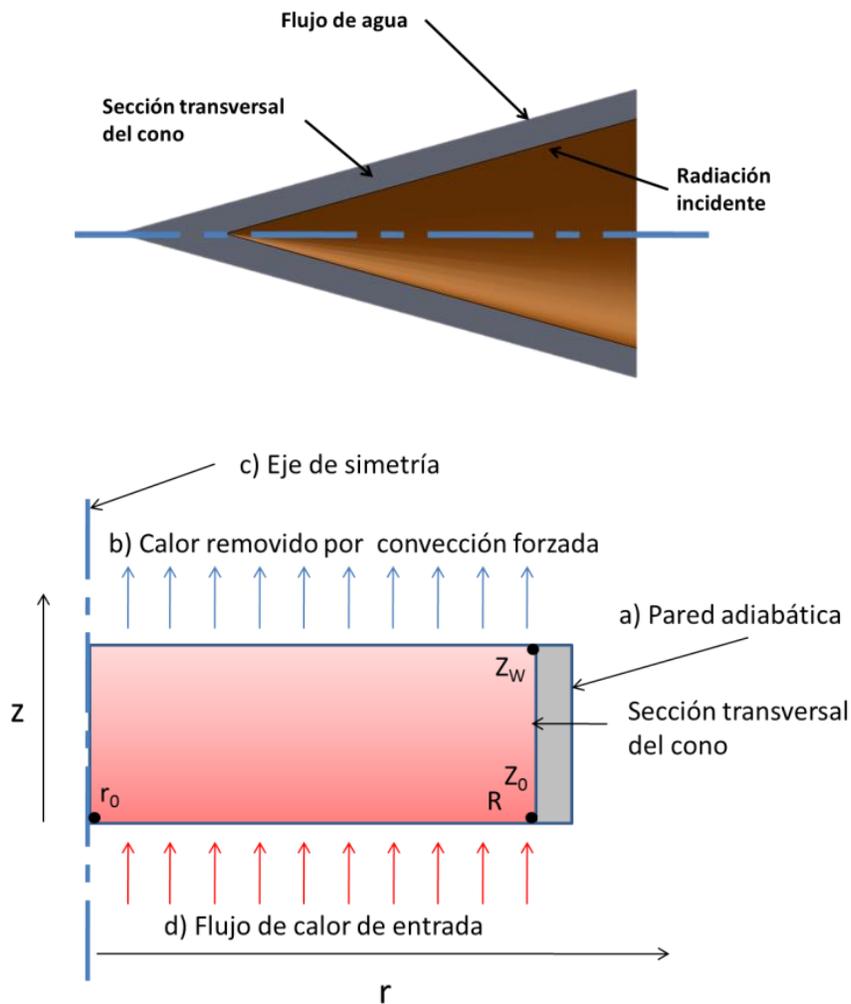


Figura 4.7. Esquema de la sección transversal del cono receptor.

El resultado de la modelación se muestra en la figura 4.8 donde se presenta la distribución de temperaturas en la superficie interna del cono receptor, en la que se puede apreciar que la máxima temperatura esperada es menor a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y también se presenta la relación entre la distribución de radiación solar concentrada y la T_w .

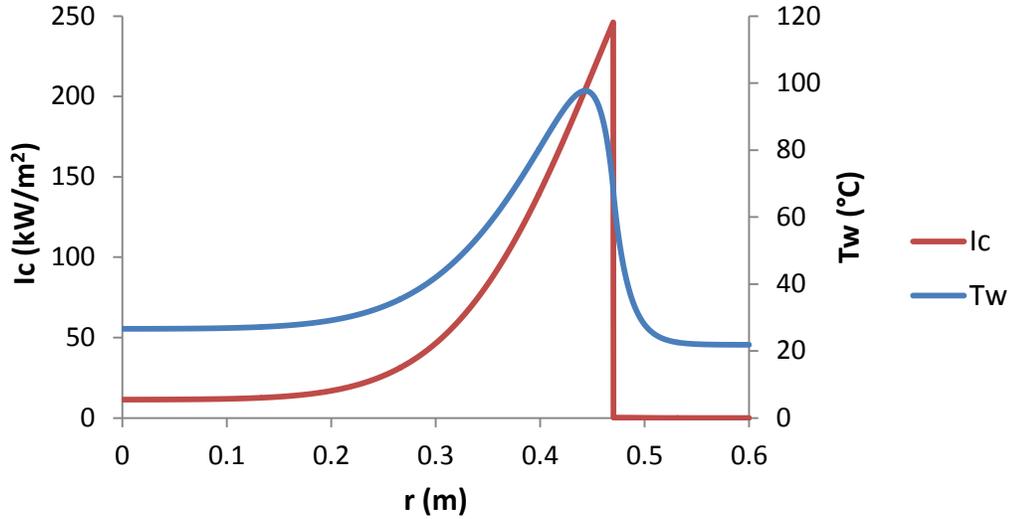


Figura 4.8. Perfil de distribución de temperaturas sobre la superficie interna del cono receptor de la cavidad cónica y la relación entre la distribución de radiación solar concentrada.

Para poder remover la potencia que absorbe la cavidad cónica, se requiere de una envoltura que permita que el agua fluya de manera uniforme sobre la superficie externa del cono y que el calor absorbido por el agua no tenga pérdidas hacia el ambiente, por lo que la envoltura debe ser un buen aislante térmico.

El material que se definió para la envoltura es Nylami ya que es relativamente ligero (0.95g/cm^3), fácil de maquinar y buen aislante térmico (0.38 W/mK). En la figura 4.9 se muestra el diseño de la envoltura.

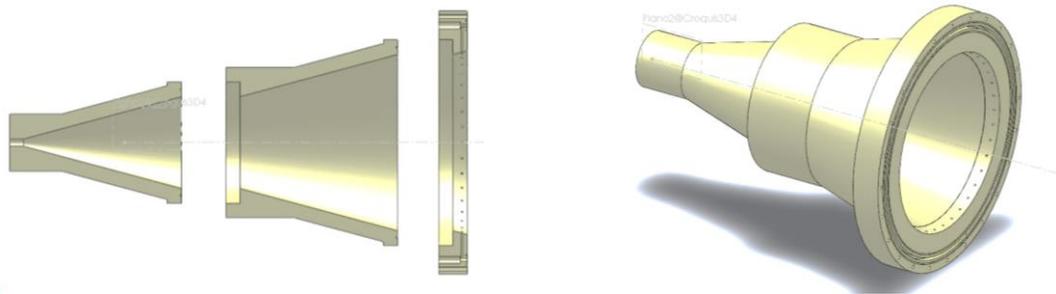


Figura 4.9. Esquema de la envoltura de la cavidad cónica.

Para corroborar que el diseño propuesto permite una distribución de flujo uniforme en toda la superficie externa del cono, se hizo una modelación del flujo del fluido en FLUENT®. En la figura 4.10 se presentan los resultados de la modelación, en los que se puede apreciar que se tiene una distribución de flujo uniforme angularmente, pero que varía a lo largo del cono debido a que el área de sección transversal del fluido también varía a lo largo del cono.

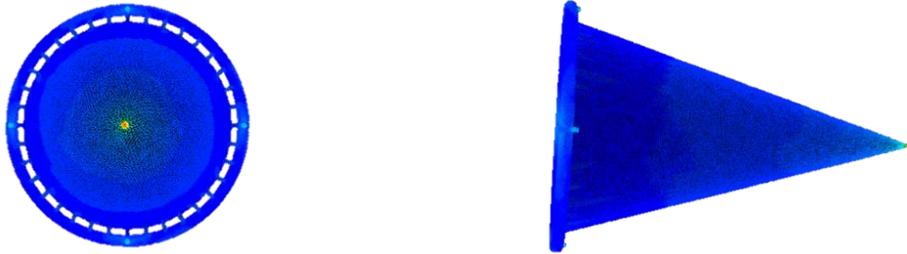


Figura 4.10. Distribución del flujo del agua entre el cono y la envoltura.

Para prevenir que la cubierta del cono pudiera sufrir algún daño debido a que se encuentra en la zona focal del sistema de concentración y que una desviación del spot solar pudiera llegar a incidir sobre él, fue necesario diseñar una cubierta refrigerada. En la figura 4.11 se presenta un esquema de la cubierta.

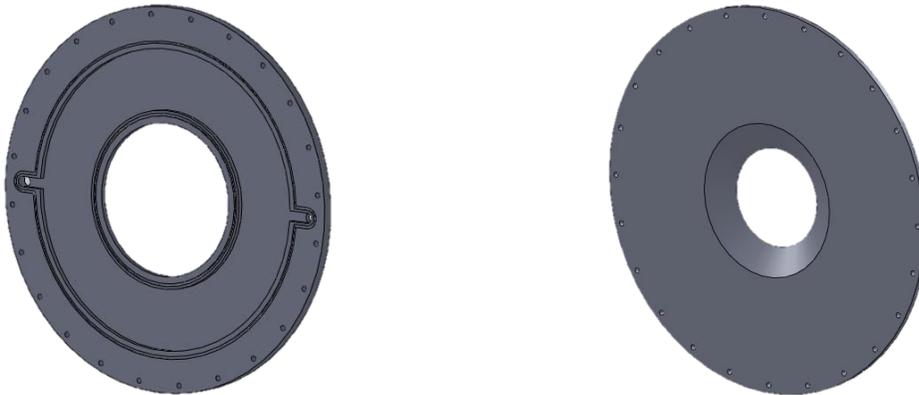


Figura 4.11. Esquema de la cubierta refrigerada.

En la figura 4.12a se presenta el calorímetro completo, mostrando en un corte longitudinal todos sus componentes y en la figura 4.12b la vista del calorímetro armado en 3D.

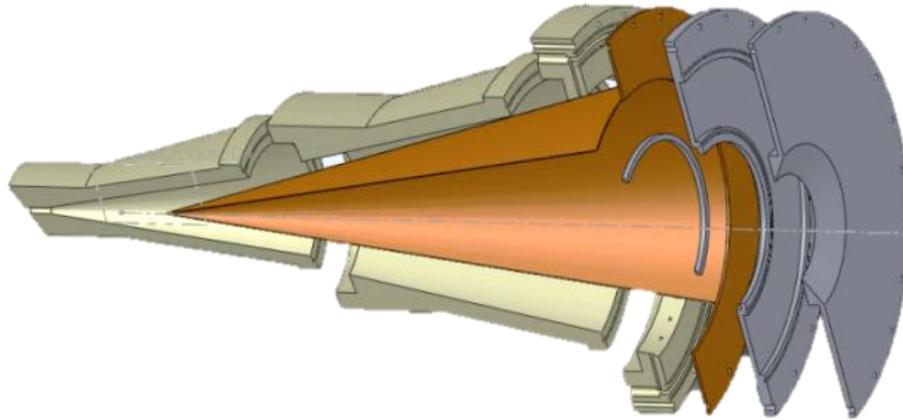


Figura 4.12a. Vista de corte y con desplazamiento de los elementos del calorímetro.

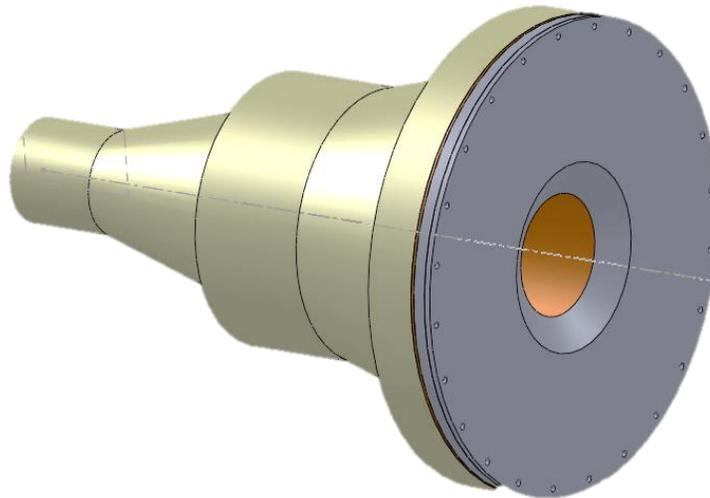


Figura 4.12b. Vista 3D del calorímetro ensamblado.

Ya que se definió el diseño del CAVICAL-2, se enviaron los planos al taller de maquinado del IER donde se fabricó cuidadosamente y con gran calidad. Una vez que quedo terminado, se instrumentó de la siguiente manera:

Los parámetros que se requieren medir para conocer el funcionamiento del calorímetro al momento de realizar las pruebas de medición de potencia térmica del HoSIER, son los siguientes:

- Temperatura del agua a la entrada del calorímetro
- Temperatura del agua a la salida del calorímetro
- Temperaturas en la cavidad del calorímetro
- Flujo másico del agua que entra al calorímetro

Para medir las temperaturas, se usaron termopares tipo T y para la medición del flujo másico del agua se usó un flujómetro de coriolis. Antes de instalar los termopares, se calibraron usando un termopozo.

El criterio para ubicar los termopares que miden la temperatura de la cavidad se basó en la distribución de la radiación solar concentrada que incide sobre la superficie interna de la cavidad (ver figura 4.13). Además de los termopares ubicados a lo largo del cono, también se pusieron 5 termopares mas a 15 cm de la base y distribuidos cada 60 grados alrededor del cono. La ubicación física de los termopares se aprecia en la imagen de la figura 4.14.

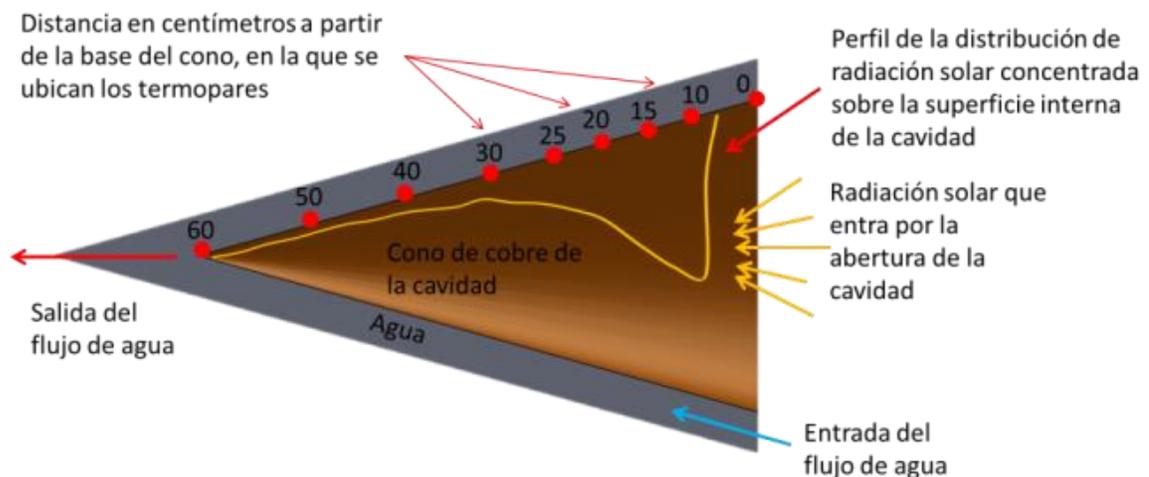


Figura 4.13. Esquema de la ubicación de los termopares en la cavidad del calorímetro.



Figura 4.14. Imagen del cono del calorímetro en el que se aprecian los termopares instalados.

Una característica que distingue al CAVICAL-2 de los anteriores calorímetros de cavidad cónica fabricados por la Coordinación de Concentración Solar del IER (CAVICAL y CAVIRAD) además de su gran tamaño, es que este calorímetro tiene la cubierta de aluminio, mientras que los anteriores la tenían de cobre. La razón por la que la cubierta es de aluminio, es porque el flujo de agua que remueve el calor del cono es independiente del que enfría a la cubierta, por lo que se requiere que la parte interna de la cubierta regrese la radiación que llegue a recibir y por eso se definió que fuera de aluminio tiene un alto índice de reflectividad lo que permite que gran cantidad de la radiación reflejada y emitida por la superficie interna del cono sea reflejada nuevamente hacia esa misma superficie del cono. En la figura 4.15 se muestra una imagen de la cubierta a la que se le está puliendo la superficie interna para mejorar su reflectividad.



Figura 4.15. Imagen de la cubierta del calorímetro a la que se le está puliendo con lijas finas.

4.2. Potencia térmica del HoSIER

Para medir la potencia de la radiación solar concentrada por el HoSIER se diseñaron los experimentos de tal forma que se pudiera al mismo tiempo medir potencia térmica y caracterizar el funcionamiento del atenuador, para lograrlo se hizo lo siguiente:

Con la técnica de calorimetría de agua fría se midió la potencia recibida en el calorímetro variando el porcentaje de apertura del atenuador desde el 0% hasta el 100%, en incrementos del 10% y con intervalos de tiempo entre cada cambio de porcentaje, de 2 minutos. Además, se registró la radiación solar directa para cada caso.

En la tabla 4.2 se presentan los resultados de una prueba realizada el 25 de mayo del 2013, las condiciones de operación del HoSIER fueron las siguientes:

- Los espejos del heliostato ligeramente sucios
- Los espejos del concentrador limpios
- El puente de acceso a la mesa de experimentos haciendo sombra
- Elevador haciendo sombra
- Atmosfera con turbiedad visible

Tabla 4.2. Potencia térmica del HoSIER medida con el calorímetro a diferentes porcentajes de apertura del atenuador

Apertura del atenuador (%)	Potencia calorimétrica Q_c (W)	Radiación solar directa I_b (W/m^2)	Potencia extrapolada a $I_b=1000W/m^2$
100	16.20	828.00	19.56
90	14.66	827.00	17.73
80	12.99	824.00	15.76
70	11.12	819.00	13.58
60	9.54	817.00	11.67
50	7.89	818.00	9.64
40	6.37	828.00	7.69
30	4.75	835.00	5.69
20	3.02	839.00	3.60
10	1.50	826.00	1.81

Con los datos de la tabla 4.2 se hizo una gráfica (ver figura 4.16) en la que se puede observar que el comportamiento del calorímetro y del atenuador son lineales. En la gráfica de la figura 4.17 se presentan las temperaturas registradas por los termopares ubicados a lo largo del cono de la cavidad a los diferentes porcentajes de apertura del atenuador.

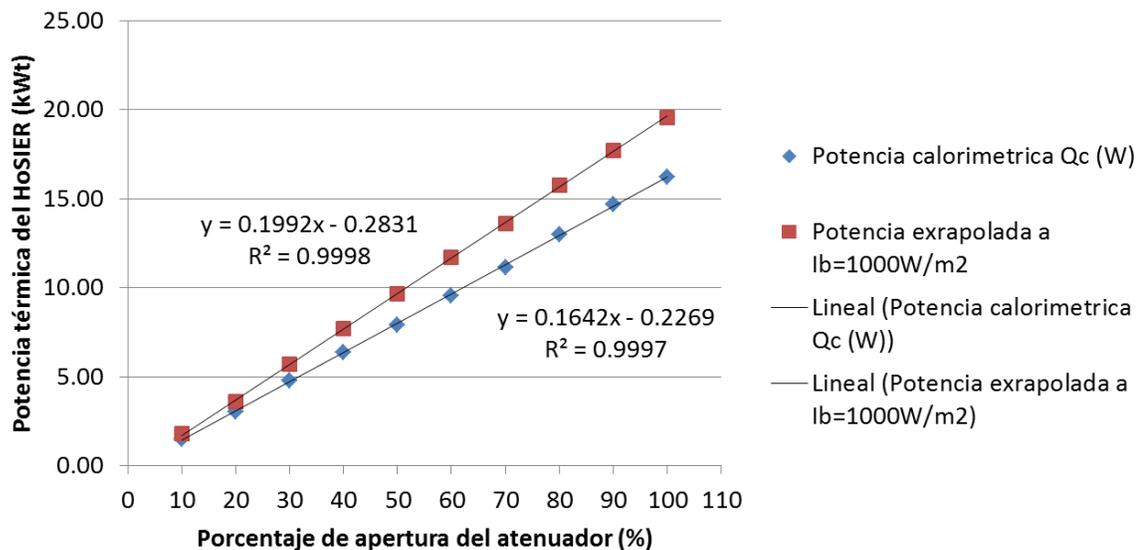


Figura 4.16. Comportamiento del calorímetro y del atenuador a diferentes porcentajes de apertura.

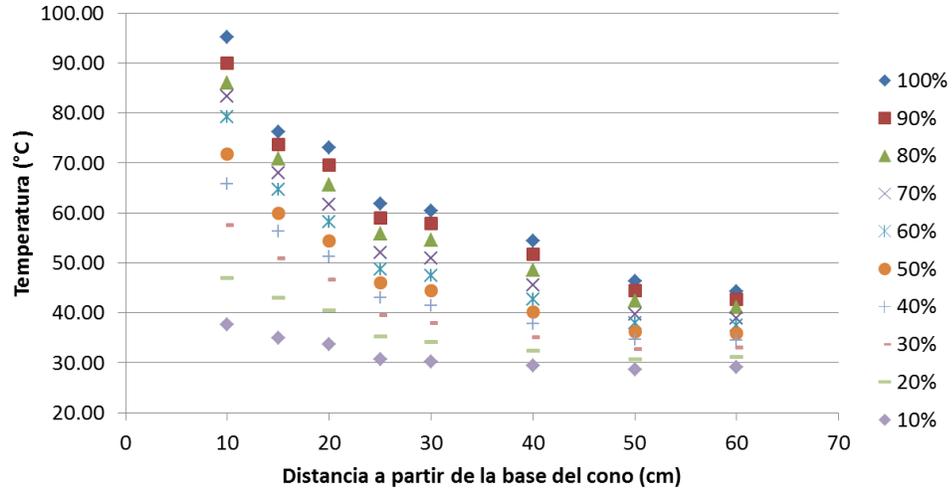


Figura 4.17. Gráfica de las temperaturas registradas en el cono del calorímetro a diferentes porcentajes de apertura del atenuador.

Con los datos de potencia térmica medidos con el calorímetro, se presenta un análisis de los coeficientes que intervienen en la potencia que es capaz de concentrar el HoSIER, en la tabla 4.3 se presentan los coeficientes y sus valores estimados. Estos parámetros son los que determinan el Factor de Horno para las condiciones en las que se realizó la prueba, la radiación solar y la eficiencia del CAVICAL-2.

Tabla 4.3. Estimación de los coeficientes de las condiciones de uso del HoSIER

Símbolo	Descripción	Ideal	Real
η_t	Transmisividad del vidrio del H81	1.00	0.94
η_{r1}	Reflectividad de los espejos del H81	1.00	0.91
η_{r2}	Reflectividad de los espejos del concentrador	1.00	0.91
η_{e1}	Sombreamiento estructural del horno	1.00	0.96
η_s	Sombreamiento de mesa experimental	1.00	0.95
η_p	Sombreamiento por persianas del atenuador	1.00	0.99
η_{d1}	Factor de suciedad del H81	1.00	0.85
η_{d2}	Factor de suciedad del concentrador	1.00	0.95
F	Factor de Horno	1.00	0.53
C	Relación de concentración solar máxima	27500	14670
I_b	Radiación solar directa (W/m ²)	1000	826
η_c	Eficiencia del CAVICAL-2	1.00	0.95
Q_e	Potencia (kW)	38.5	16.1

De los parámetros presentados en la tabla 4.3, hay algunos que tienen valores definidos y otros que cambian de acuerdo a las condiciones de uso del HoSIER, dentro de los que están definidos se encuentran los siguientes:

- Transmisividad del vidrio del H81
- Reflectividades de los espejos del H81 y del concentrador
- Eficiencia térmica del calorímetro

A diferencia de los parámetros anteriores que son prácticamente fijos, los que cambian dependiendo de las condiciones de operación al momento de realizar una prueba o experimento son los siguientes:

- La radiación solar directa
- Los factores de suciedad
- Los factores de sombreado

La radiación solar directa depende de la temporada del año en la que se realicen las pruebas, de la hora del día y de las características climatológicas y atmosféricas presentes a la hora y fecha en que se hace la prueba.

Los factores de sombreado dependen de que tan despejada este el área entre el heliostato y el concentrador.

Los factores de suciedad dependen de la periodicidad con la que se limpien los espejos y de la cantidad de suciedad que se deposite en ellos.

Otro factor que se debe considerar al momento de realizar una prueba de medición de potencia, es la región circunsolar (CSR) ya que esta modifica el tamaño del spot y puede variar el porcentaje de energía que pasa por la abertura del calorímetro, por lo tanto cambia la potencia que puede medir el calorímetro. La región circunsolar (CSR) queda definida al igual que la intensidad de la radiación solar, por las características climatológicas y atmosféricas presentes a la hora y fecha en que se hace la prueba. A continuación se presenta un análisis de los efectos de la región circunsolar.

Para conocer la cantidad de potencia del spot que queda fuera de la abertura del CAVICAL-2, se hicieron modelaciones en SolTrace en las que se cambió el perfil solar con regiones circunsolares de 0%, 5%, 10%, 20%, 30% y 40 %. En la tabla 4.4 se presentan los resultados de las modelaciones y en la figura 4.10 se presentan las imágenes correspondientes.

Tabla 4.4. Resultados de las modelaciones de la potencia que queda fuera del CAVICAL-2 a diferentes CSR

Región circunsolar	Imagen	Potencia total (W)	Potencia fuera de la abertura del CAVICAL-2 (W)	Potencia fuera de la abertura del CAVICAL-2 (%)
CSR0	a	20300	103	0.5%
CSR5	b	20300	377	1.9%
CSR10	c	20300	653	3.2%
CSR20	d	20300	1338	6.6%
CSR30	e	20300	2160	10.6%
CSR40	f	20300	2824	13.9%

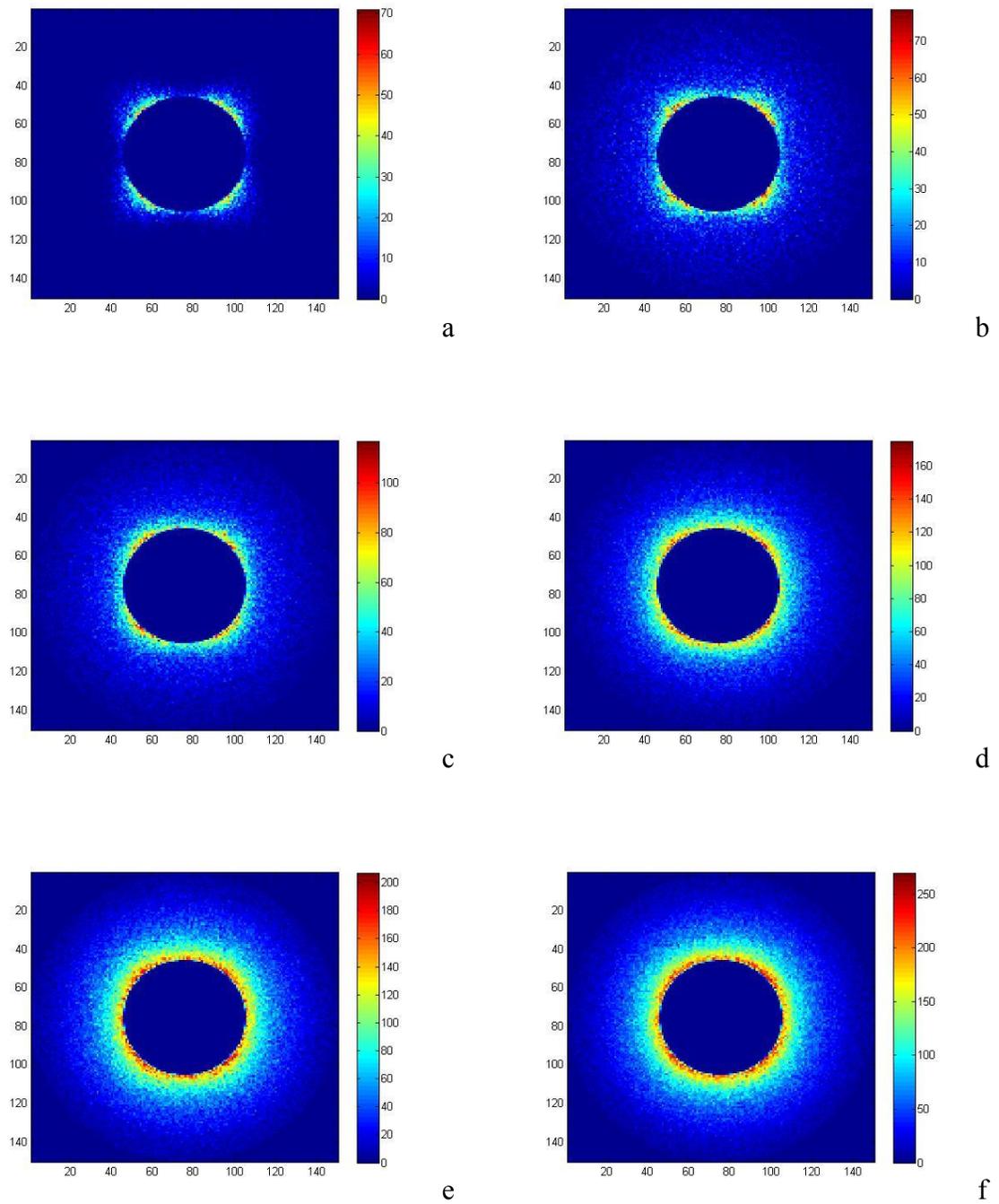


Figura 4.18. Imágenes de la radiación solar que queda fuera de la abertura del CAVICAL-2.

Con la finalidad de verificar si al momento de hacer las mediciones de la potencia del HoSIER con el CAVICAL-2 parte de la energía del spot quedaba fuera de la abertura, se tomó una imagen con la cámara CCD de la cubierta del CAVICAL-2, mientras se hacía la medición de la potencia. En la figura 4.19 se presenta la imagen de la cubierta del CAVICAL-2 en la que se aprecia que hay parte del spot fuera de la abertura.

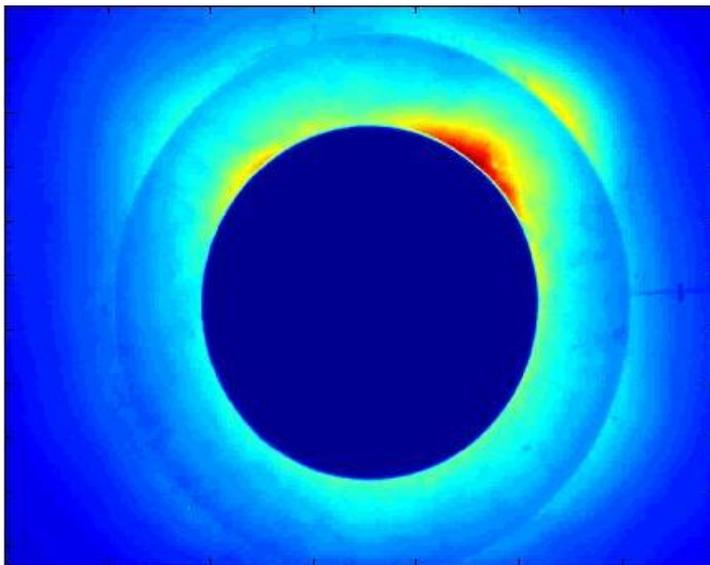


Figura 4.19. Imagen de la cubierta del CAVICAL-2 al momento de la medición de la potencia del HoSIER.

Medir la potencia del HoSIER con el CAVICAL-2, requiere que la mesa de experimentos este dedicada exclusivamente a soportar el CAVICAL-2 debido a su gran tamaño, lo que provoca que si se requiere medir la potencia antes de realizar un experimento o prueba se dedique parte del día para las maniobras de instalación y desinstalación tanto del calorímetro como del dispositivo experimental (por ejemplo un reactor químico). Es por este motivo que se planteó la idea de medir la potencia con el PPLR ya que es más pequeño y ligero y puede integrarse de manera simultánea al dispositivo experimental.

Para calcular la potencia concentrada por el HoSIER a partir de una imagen del spot en el foco del concentrador y la medición simultánea del flujo radiativo, se requiere conocer el tamaño del pixel y ubicar el gardon en el centro del spot.

Para conocer el tamaño del pixel se requiere tomar una imagen del target sobre el que se proyectará el spot y ubicar un objeto con una distancia conocida (por ejemplo una regla graduada). En la figura 4.20 se presenta un ejemplo de esta imagen.

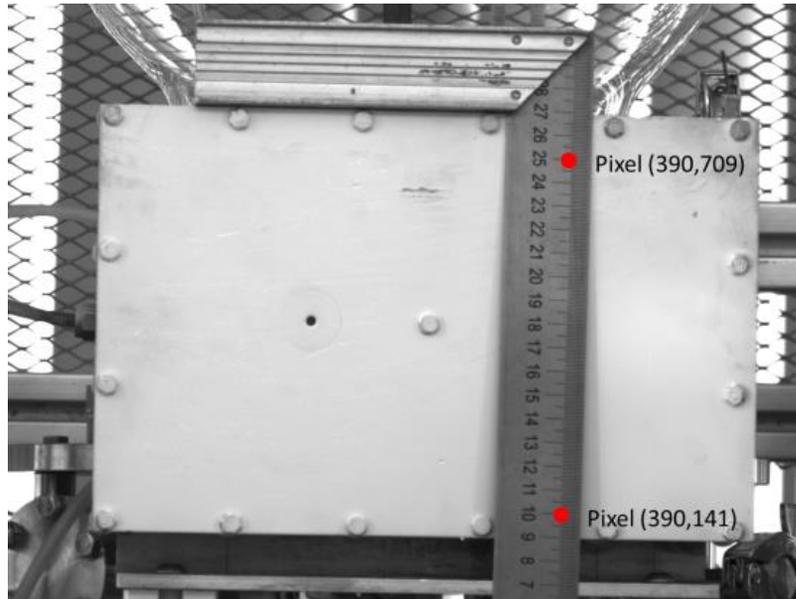


Figura 4.20. Imagen del target y una regla graduada necesaria para conocer el tamaño del pixel.

El tamaño del pixel se determina conociendo la cantidad de pixeles que se encuentran alineados en un intervalo de distancia conocido, por ejemplo, los pixeles ubicados en la imagen de la regla en la marca de 0.10 m y de 0.25 m corresponden a 141 y 709 respectivamente, ambos en la misma coordenada 390. Así, la distancia del pixel resulta al dividir 0.15 m entre 568 pixeles que da como resultado un tamaño de pixel de $2.64E^{-4}$ m.

Una vez que se conoce el tamaño del pixel se puede conocer el área del pixel ya que son pixeles de forma cuadrada, lo cual corresponde a un área de $(2.64E^{-4})^2 = 6.97E^{-8}$ m². El área del pixel es necesaria ya que haciendo la sumatoria de la cantidad de pixeles que forman la imagen del spot se puede conocer el área del spot.

Para convertir la imagen del spot de escala de grises a intensidad de flujo radiativo, es necesario conocer la razón entre el flujo medido con el gardon y la intensidad de gris registrada por la cámara en la zona central del spot. En la figura 4.21 se muestra una imagen del spot y la ubicación del gardon.

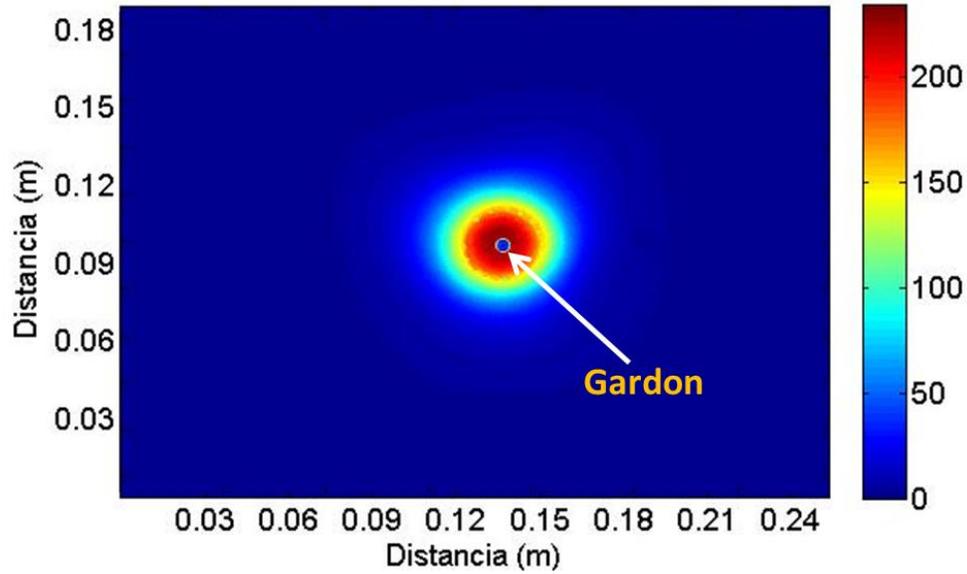


Figura 4.21. Imagen del spot y del sensor de flujo (Gardon).

La escala de grises que tiene la imagen es de 0 a 255 que corresponde a una sensibilidad de 8 bits y la intensidad del gris correspondiente a la zona en que se encuentra el sensor es de 236. La medición del gardon fue de 2450 kW/m^2 con un porcentaje de apertura del atenuador de 20%. La constante de calibración de la imagen es el cociente entre el flujo radiativo y la intensidad de gris, esto es $2450 / 236 = 10.30 \text{ kW/m}^2\text{gris}$. Para convertir la imagen de escala de grises a intensidad de flujo, basta con multiplicar la matriz de datos de la imagen en escala de grises por la constante de calibración.

Ya que se tiene la imagen en escala de flujo radiativo, se promedian los valores de intensidad de todos los pixeles de la imagen del spot, se multiplica por el área del spot y se divide entre el porcentaje de apertura del atenuador para conocer la potencia concentrada. Para este caso el área del spot es de 0.018 m^2 , el flujo promedio del spot es de 214.69 kW/m^2 y el porcentaje de apertura del atenuador fue de 20 % lo que da como resultado un potencia concentrada por el HoSIER de 19.3 kW .

La incertidumbre de la potencia calculada con esta técnica depende principalmente de la incertidumbre con la que el Gardon mide la intensidad de la radiación solar concentrada por el HoSIER.

Calibración de la medición de potencia con imagen-gardon

Para calibrar el método imagen-gardon para la medición de la potencia del HoSIER tomando como parámetro de referencia la potencia medida con el calorímetro de cavidad del HoSIER (CAVICAL-2) se debe realizar la siguiente metodología:

Primera etapa:

- Se mide la potencia concentrada por el HoSIER con el CAVICAL-2 y se debe registrar simultáneamente el porcentaje de apertura del atenuador (A_{ap}) y la radiación solar directa (I_b).
- Se mide el flujo de radiación solar concentrada por el HoSIER con el gardon, en el centro del spot y se debe registrar simultáneamente el A_{ap} y la I_b .
- Se toma una imagen del spot que incide sobre el blanco lambertiano.

Segunda etapa:

- La imagen del spot se procesa en un código para hacer el cálculo de la potencia contenida en el área del spot. Para hacer este cálculo, se requiere conocer el flujo medido por el gardon y el tamaño del pixel calibrado a partir de una imagen de referencia, tal como ya se explicó anteriormente.

Ya que se tienen las mediciones de potencia por el método imagen-gardon y por medio del CAVICAL-2, se comparan los resultados y se obtiene el factor de corrección para el método imagen-gardon, tomando en cuenta que la medición obtenida por el CAVICAL-2 es la mejor. En la tabla 4.5 se presentan los resultados de una prueba que se realizó para determinar el factor de corrección del método imagen-gardon.

Tabla 4.5. Factor de corrección del método imagen-gardon para la medición de la potencia concentrada por el HoSIER

CAVICAL-2					IMAGEN-GARDON			
I_b (W/m ²)	% Aten	Potencia medida (kW)	Potencia extrapolada a $I_b = 1000$ W/m ² y a 100% de apertura, (kW)	Potencia extrapolada y considerando la eficiencia ($\eta = 0.92$), (kW)	I_b (W/m ²)	% Aten	Potencia medida (kW)	Potencia extrapolada a $I_b = 1000$ W/m ² y a 100% de apertura, (kW)
840	100%	17.0	20.24	22.00	839	10%	2.12	25.27
846	10%	1.7	20.09	21.84	838	10%	2.11	25.18
812	100%	16.0	19.70	21.42	833	10%	2.07	24.85
Promedio				21.75	824	10%	2.06	25.00
Desviación estándar				0.30	822	10%	2.06	25.06
					821	20%	4.4	26.80
					824	30%	6.75	27.31
					824	20%	4.46	27.06
					820	10%	2.08	25.37
					Promedio			25.77
					Desviación estándar			0.99

Factor de corrección
0.84

4.3. Coeficiente de operación del HoSIER

El coeficiente de operación del HoSIER (K_p), define las condiciones de operación del HoSIER al momento de realizar un experimento o prueba. Para calcular el K_p se requiere medir la potencia del HoSIER (Q_{oc}) a un porcentaje definido de apertura del atenuador (A_{ap}), el área real del concentrador (A_r) y la radiación solar directa (I_b). Los parámetros anteriormente descritos se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{oc} = K_p A_{ap} A_r I_b \quad (4.12)$$

De la ecuación (4.12) se despeja K_p como se expresa en la ecuación (4.13) y se sustituyen los datos de Q_{oc} , A_{ap} , A_r y I_b para definir el coeficiente de operación para las condiciones de uso del HoSIER al momento de hacer la prueba y así mediante la ecuación (4.12) poder determinar en cualquier momento durante la prueba la potencia concentrada por el HoSIER dependiendo de manera práctica de la intensidad de la radiación solar (I_b) y del porcentaje de apertura del atenuador (A_{ap}).

$$K_p = \frac{Q_{oc}}{A_{ap} A_r I_b} \quad (4.13)$$

Para medir la potencia del HoSIER (Q_{oc}) se puede usar CAVICAL-2 o puede ser calculada por medio del método imagen-gardon. La ventaja de usar el CAVICAL-2, es que dará un valor más exacto de la potencia real, pero debido a su gran tamaño, el cual ocupa toda el área de la mesa de experimentos, requiere que se realicen las maniobras de instalación y desinstalación del experimento lo que implica riesgo de daño en el dispositivo experimental y tiempo; por otra parte, la gran ventaja que ofrece calcular la potencia por el método imagen-gardon es que es un dispositivo de fácil manipulación y puede acoplarse al experimento.

4.4. Temperatura máxima

La máxima temperatura que se pudiera alcanzar en la zona focal del HoSIER se lograría si se colocara un receptor con las propiedades ideales de un cuerpo negro y el HoSIER estuviera en las condiciones óptimas de operación. Si se lograran obtener las dos condiciones anteriormente descritas, la temperatura se puede calcular mediante la ley de Stefan-Boltzmann despejando de la ecuación a la temperatura, quedando de la siguiente forma:

$$T_{max} = \sqrt[4]{\frac{F_{max}}{\sigma}} \quad (4.14)$$

Donde F_{max} es la máxima densidad de flujo radiativo concentrado en la zona focal que corresponde a $F_{max} = 18 \times 10^6 \text{ W/m}^2$, y sabiendo que la constante de Stefan Boltzmann es $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$, se calcula que la temperatura máxima es $T_{max} = 4220 \text{ K}$.

En la gráfica de la figura 4.22 se presenta la temperatura en función de la intensidad de flujo radiativo y en la 4.23 la distribución de temperaturas en función del perfil del flujo radiativo del spot solar.

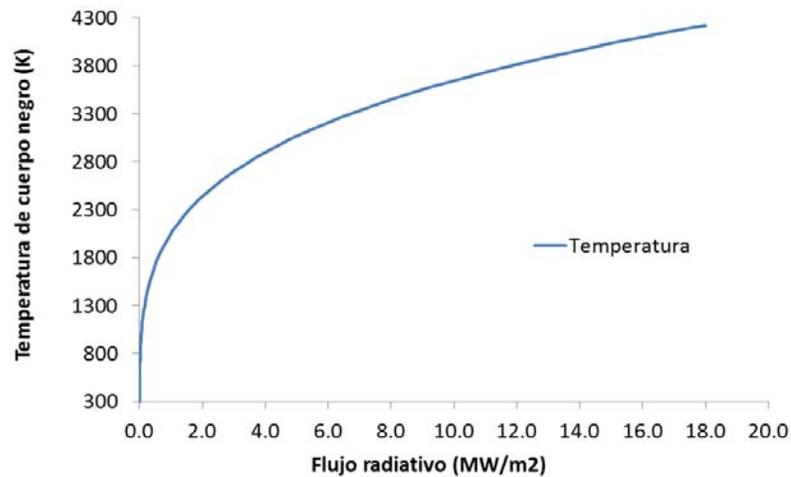


Figura 4.22. Temperatura de cuerpo negro en función de la intensidad de flujo radiativo.

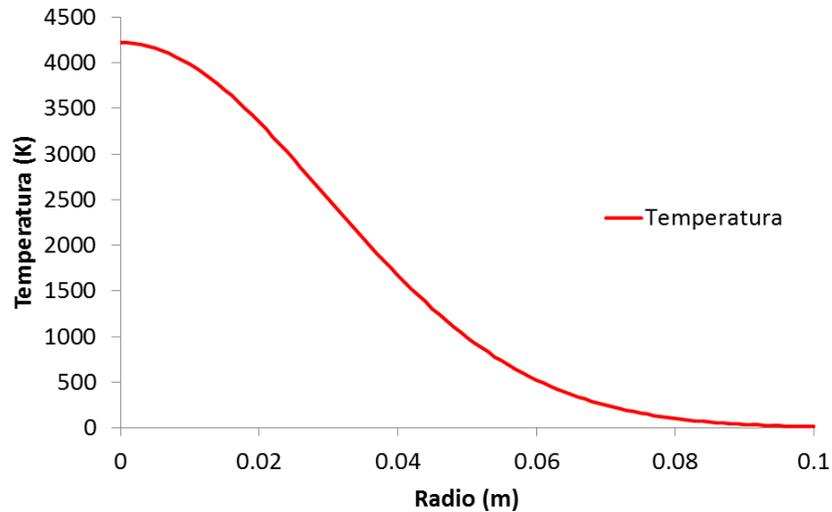


Figura 4.23. Distribución de temperaturas en función del perfil del flujo radiativo del spot solar.

Para determinar de manera experimental la máxima temperatura que se puede alcanzar en la zona focal del HoSIER, se diseñó una prueba para fundir tungsteno. El arreglo experimental consistió en poner un disco de grafito en el foco del concentrador con una barra de tungsteno en el centro, dentro de un reactor que permite controlar la atmosfera que rodea al grafito y al tungsteno desplazando el aire y sustituyéndolo con argón para evitar la oxidación del tungsteno y la degradación del grafito. En la imagen de la figura 4.24 se presenta el arreglo experimental.

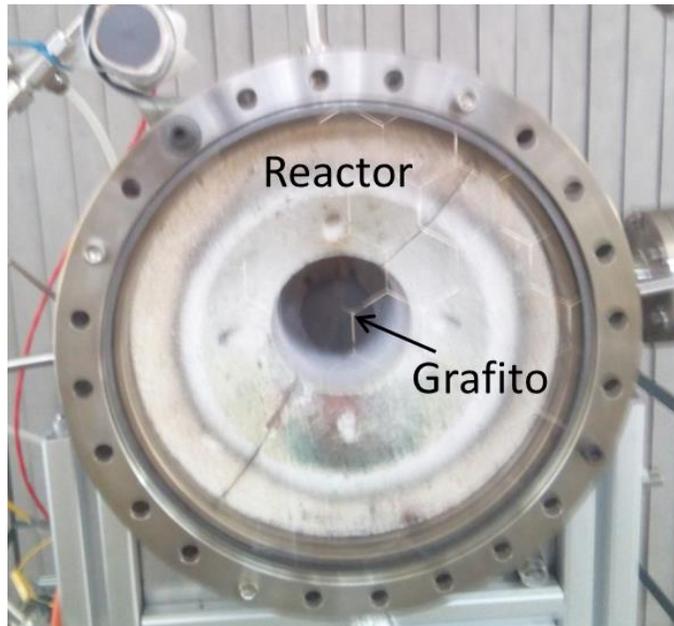


Figura 4.24. Imagen del arreglo experimental para la fundición de tungsteno en la que se aprecia el reactor y al grafito.

Se consideró utilizar grafito por su alto índice de absorción (> 0.9) y su alta conductividad térmica (129 W/(m K)), lo que permite absorber la mayor cantidad de la radiación solar que incide en su superficie, y por conducción de calor caliente al tungsteno, usando al grafito como crisol.

El resultado de la prueba demostró que se puede alcanzar al menos una temperatura de 3680 K ya que se logró fundir el tungsteno. En la imagen de la figura 4.25 se presenta una imagen del reactor con el grafito emitiendo radiación térmica a gran temperatura. Esta imagen se tomó unos segundos después de haber cerrado las persianas del atenuador. En la figura 4.26 se presenta una imagen del tungsteno fundido en el grafito.



Figura 4.25. Imagen del reactor con el grafito emitiendo energía térmica después de haber cerrado las persianas del atenuador.



Figura 4.26. Imagen del tungsteno fundido en el grafito.

Las condiciones de operación del HoSIER al momento de la prueba son las que se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Condiciones de operación del HoSIER en la prueba de fundición de tungsteno.

Parámetro	Magnitud
Potencia ideal del HoSIER (kW)	38.5
Flujo máximo ideal en el foco del HoSIER (kW/m ²)	27500
Factor de Horno (F.H.)	0.6
Radiación solar directa, DNI (W/m ²)	760
Flujo máximo real (kW/m ²)	12540
Potencia máxima real (kW)	17.6
Temperatura de cuerpo negro (K)	3856.4
Temperatura de cuerpo negro (°C)	3583.2
Temperatura de fundición del Grafito (K)	3800
Temperatura de fundición del Grafito (°C)	3526.9
Temperatura de fundición del Tungsteno (K)	3683
Temperatura de fundición del Tungsteno (°C)	3409.9
Absortancia grafito	0.96

Los resultados de la caracterización óptica y térmica del HoSIER, se resumen de forma general mediante la ficha técnica del HoSIER que se presenta en el siguiente subtema.

4.5. Ficha Técnica del HoSIER

Los parámetros característicos del HoSIER se presentan a continuación en la tabla 4.7 en los que se consideran los máximos valores que se pueden alcanzar si el HoSIER se encuentra en óptimas condiciones y en la gráfica de la figura 4.27 se presenta la potencia acumulada en función de la distancia radial a partir del centro del spot, el perfil del flujo radiativo del spot y el flujo promedio contenido en el 95% del spot.

Tabla 4.7. Especificaciones del HoSIER en condiciones óptimas de operación.

Parámetro	Heliostato	Concentrador	Atenuador	Mesa de experimentos	Desempeño
Dimensiones	9 m x 9 m	6.2 m x 6.2 m	6.3 m x 6.7 m	-	-
Área de espejos	81 m ²	38.5 m ²	42.2 m ²	-	-
Numero de facetas o elementos	30	409	47	-	-
Material reflectivo	Aluminio	Aluminio	-	-	-
Reflectancia	0.91	0.91	-	-	-
Distancia focal	-	3.68 m	-	-	-
Tiempo de cerrado	-	-	2 s	-	-
Desplazamiento	Tipo Azimutal	-	De 0 a 90°	± 0.12 m en los 3 ejes	-
Área de montaje	-	-	-	Base circular de 0.5 m de diámetro	-
Capacidad de carga	-	-	-	250 kg	-
Factor de horno óptimo	-	-	-	-	0.68
Potencia máxima	-	-	-	-	25 kW
Pico máximo de concentración	-	-	-	-	18000 soles
Diámetro del spot a 95%	-	-	-	-	0.072 m
Temperatura máxima medida	-	-	-	-	3680 K
Error óptico global	-	-	-	-	2 mrad

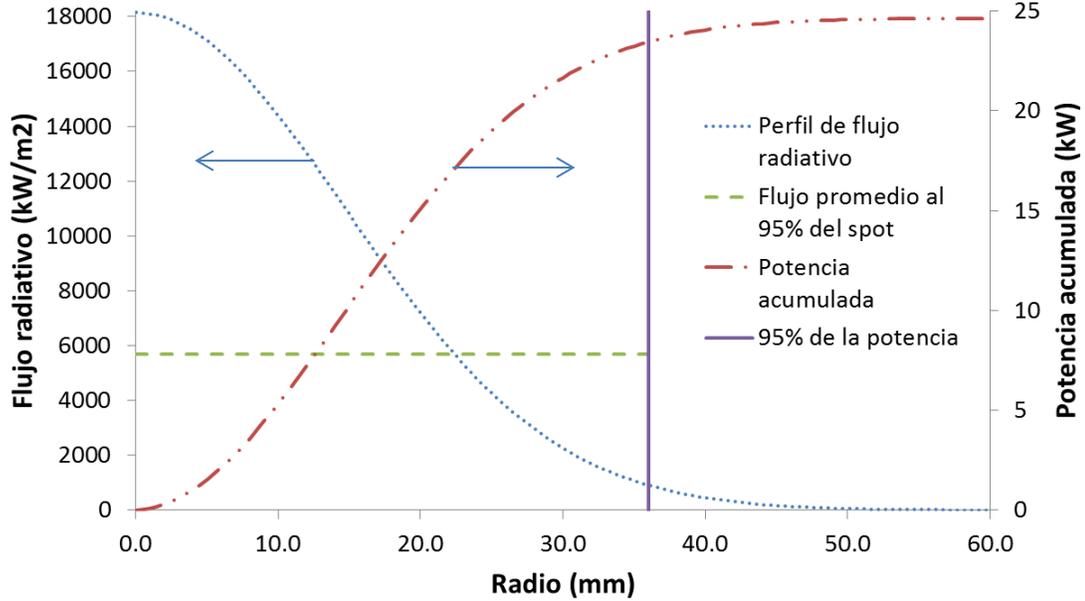


Figura 4.27. Perfil de la potencia acumulada en función de la distancia radial a partir del centro del spot, el perfil del flujo radiativo del spot y el flujo promedio contenido en el 95% del spot.

El perfil de distribución de radiación solar del spot se representa mediante la siguiente función:

$$I_e(r) = F_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2(0.0147)^2}\right) \quad (4.15)$$

Donde I_e corresponde a la intensidad de flujo radiativo en función de la posición radial del spot solar, en el foco del concentrador del HoSIER, r es la distancia radial a partir del centro del spot y F_{\max} es la intensidad máxima de flujo radiativo que se alcanza en el spot para las condiciones dadas de operación del HoSIER.

En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de investigación.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones como resultado del trabajo de la caracterización óptica y térmica del horno solar del IER. Dentro de las conclusiones se presenta lo logros y los resultados más importantes y en las recomendaciones se plantean algunas sugerencias que permitirán mejorar este trabajo.

Conclusiones

1. Se logró el objetivo de determinar el error óptico global, el pico máximo de concentración solar y la potencia del HoSIER por medio de la caracterización óptica y térmica.
2. Se construyeron dispositivos experimentales que se agregan al equipamiento de medición del HoSIER, tales como:
 - a) El CAVICAL-2, que sirve para la medición directa de potencia del HoSIER.
 - b) El PPLR, que sirve para la toma de imágenes del spot de la radiación solar en la zona focal del HoSIER y para la medición de la intensidad del flujo de la radiación solar concentrada.
3. Se lograron desarrollar las siguientes metodologías:
 - a) Método imagen-gardon que consiste en el cálculo de la potencia del HoSIER por medio de la toma de imagen del spot y de la medición del flujo radiativo concentrado en la zona focal.
 - b) Determinación del coeficiente de operación del HoSIER. Este coeficiente define las condiciones de operación diarias del HoSIER y permite conocer la potencia

concentrada en la zona focal en función únicamente de la intensidad de la radiación solar directa y del porcentaje de apertura del atenuador, información que es indispensable al momento de realizar un experimento o prueba.

Los resultados obtenidos demostraron que la combinación de factores como el diseño del HoSIER, el correcto y cuidadoso trabajo técnico de ejecución en la construcción y armado de sus elementos y la capacidad técnica en la alineación de los espejos, permitieron tener un instrumento de investigación de la más alta calidad ya que el error óptico global es de apenas **2 mrad**. Con este valor de error óptico global se podría alcanzar una relación de concentración solar máxima de 27500 soles en el caso teórico ideal, y tomando en cuenta el Factor de Horno que es el conjunto de los factores que disminuyen la potencia y la relación de concentración solar del HoSIER, se podrían alcanzar en el caso óptimo (**F.H. = 0.68**) una potencia máxima de **25 kW** y una relación de concentración máxima de **18000 soles**. También se calculó que la temperatura máxima teórica de cuerpo negro que se podría alcanzar en el foco del concentrador del HoSIER en las condiciones óptimas de operación, es de aproximadamente 4200 K, y la máxima temperatura alcanzada experimentalmente fue de al menos **3680 K** inferida a partir de la fundición de un testigo de tungsteno.

Recomendaciones para mejorar este trabajo

Las recomendaciones que se presentan se consideran con base en la experiencia adquirida a lo largo del tiempo en que se realizaron las pruebas de caracterización del HoSIER, y son las siguientes:

- Se recomienda realizar nuevamente las mediciones de potencia y flujo radiativo en las condiciones óptimas de operación del HoSIER, esto implica hacer una limpieza completa de los espejos del concentrador y del H81, despejar la zona del concentrador para evitar sombras y retirar el puente de acceso a la mesa de experimentos, también se requiere hacer las mediciones en un día con cielo despejado y con niveles de radiación solar directa de al menos 1000 W/m².
- Se recomienda repetir la prueba de fundición de tungsteno y tratar de fundir grafito teniendo las condiciones óptimas de operación del HoSIER para tratar de determinar si es posible alcanzar temperaturas superiores a los 3680 K.

Referencias

- Abdurakhamanov A. A. Akbarov R.Y. Gulamov K.G. et al. "Operating Experience of a Big Solar Furnace 1000kW in Power" Applied Solar Energy, vol 34, No. 1, 1998.
- Bliss, Raymond W. "Notes on performance design of parabolic solar furnaces". Solar Energy, Volume 1, Issues 1, pp. 22-29, January 1957.
- Brenden, B. B. NewKirk H. W. & Woodcock S. H. "A study of temperature measurement in a solar furnace" Solar Energy, vol. 2, Issues 1, pp. 13-17, January 1958.
- Buie, D, A.G. Monger, C.J. Dey, "Sunshape distributions for terrestrial solar simulations", Solar Energy, Volume 74, Issue 2, February 2003, Pages 113-122
- Chen Y. T., Chong K. K., Bligh T. P., Chen L. C., Yunus J., Kannan K. S., Lim B. H., Lim C. S., AliasM. A., Bidin N., Aliman O., Salehan S., Rezan S.A.H, Tam C. M., Tan K. K., 2001. Non-Imaging, Focusing Heliostat. Solar Energy 71, 155-164.
- Chong K. K., 2010. Optical analysis for simplified astigmatic correction of non-imaging focusing heliostat. Solar Energy 84, 1356-1365.
- Duffie J.A. and Beckman W. A., 1991. "Solar engineering of thermal processes", 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- Glaser, Peter E. "A solar furnace for use in applied research". Solar Energy, vol. 1, Issues 2-3, pp. 63-67, April-July, 1957.
- Glaser, Peter E. "Engineering research with a solar furnace" Solar Energy, vol. 2, Issues 2, pp. 7-10, April 1958.
- Gómez González Emilio, 2006, Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría v.1.0, ESI-Universidad de Sevilla.
- Hisada T., Mii H., Noguchi C., Noguchi T., Hukuo N., and Mizuno M. "Concentration of the Solar Radiation in a Solar Furnace" Solar Energy. Vol. 1, No. 4, pp 14-18, 1957.

- Howell, J.R., "The Monte Carlo Method in Radiative Heat Transfer", *J. Heat Transfer* 120(3), 547-560 (Aug 01, 1998)
- IIE , Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Johnston, G. Flux "Mapping the 400m² 'Big Dish' at the Australian National University". *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 117, No. 4, pp 290-293, 1995.
- Jose, Paul D. "The design of the heliostat mirror for a solar furnace" *Solar Energy*, Volume 1, Issues 2-3, pp. 23-27, April-July 1957.
- Kevane, C. J. "Construction and operation of the Arizona State College solar furnace". *Solar Energy*, vol. 1, Issues 2-3, pp. 99-101, April-July 1957.
- Leutz, R., Suzuki, A., Akisawa, A. and Kashiwagi, T. "Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators", *Solar Energy*, Volume 65, Issue 6, April 1999, Pages 379-387
- Loh, Eugene et al. "Heat flux measurements at the sunimage of the California institute of technology lens-type solar furnace" *Solar Energy*, vol. 1, Issues 4, pp. 23-26, October 1957.
- Neumann, A. and Groer, U. "Experimenting with concentrated sunlight using the DLR solar furnace" *Solar Energy*, vol. 58, Issues 4-6, pp. 181-190, October-December 1996.
- Neumann, A., A. Witzke, "The influence of sunshape on the DLR Solar Furnace beam", *Solar Energy*, Volume 66, Issue 6, September 1999, Pages 447-457
- Pérez-Enciso R., Riveros-Rosas D., Sanchez M., Pérez Rabago C.A., Arancibia-Bulnes C.A., Romero-Paredes H., Estrada C.A., "Three-dimensional Analysis of Solar Radiation Distribution at the Focal Zone of the Solar Furnace of IER_UNAM", *Energy Procedia*, Volume 57, 2014, Pages 3031–3040
- Pérez-Enciso R., Brito-Bazan E., Pérez Rabago C.A., Arancibia-Bulnes C.A. Riveros-Rosas D., Estrada C.A., "Correction of the concentrated sunlight spot's drift of the IER-UNAM's solar furnace", *Applied Thermal Engineering*, Volume 75, 22 January 2015, Pages 1187–1191
- Pérez-Rábago C.A., Marcos M.J., Estrada C.A., Romero M., 2006. "Heat Transfer in a Conical Cavity Calorimeter to Measure the Thermal Power of a Point Focus Concentrator", *Solar Energy*. pp. 9-10.
- Riveros, D. 2008. "Diseño Óptico del Horno Solar de alto Flujo del CIE-UNAM". Tesis doctoral, CIE-UNAM, Temixco, Morelos.
- Riveros-Rosas, D., Marcelino Sánchez-González, Camilo A. Arancibia-Bulnes, Claudio A. Estrada, "Influence of the size of facets on point focus solar concentrators", *Renewable Energy*, Volume 36, Issue 3, March 2011, Pages 966-970
- Romero, Vicente J. "CIRCE2/DEKGEN2: A Software Package for Facilitated Optical Análisis of 3-D Distributed Solar Energy Concentrators". Sandia Report, USA, 1984

-
- Schubnell, M. "Sunshape and its influence on the flux distribution in imaging solar concentrators" Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering. Vol. 113, pp. 112-116, May 1991.
- Schubnell, M., M. Kelle J, and Imhof A "Flux Density Distribution in the Focal Region of a Solar Concentrator System" Transactions of the ASME Journal of Solar Energy Engineering. Vol. 113, pp. 112-116, May 1991.
- Schubnell, M. "Influence of circumsolar radiation on aperture, operating temperature and efficiency of a solar cavity receiver", Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 27, Issue 3, August 1992, Pages 233-242
- Steinfeld, A. & Schubnell, M. "Optimum Aperture Size and Operating Temperature of solar cavity-receiver" Solar Energy, vol. 50, No. 1, pp 19-25, 1993.
- Steinfeld, A. & Palumbo, R. "Solar Thermochemical Process Technology", ENCYCLOPEDIA OF PHYSICAL SCIENCE & TECHNOLOGY, R. A. Meyers Ed., Academic Press, Vol. 15, pp. 237-256, 2001.
- Suresh D., P.K. Rohatgi, J.P. Coutures, "use of solar furnaces – I Materials research", Solar Energy, Volume 26, Issue 5, 1981, Pages 377-390
- SWERA, <http://maps.nrel.gov/swera>.
- Trombe, Felix & Le Phat Vinh, Albert "Thousand kW Solar Furnace, Built by the National Center of Scientific Research, in Odeillo (France)" Solar Energy, vol. 15, pp. 57-61, 1973.
- Wallace, J. M. and Hobbs, P. V., 1977. "Atmospheric Science: An introductory survey", Academic Press, New York.
- Winter C.J., Sizmann R.L., Vant-Hull L.L., (1991). Solar Power Plants. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- World Energy Outlook (WEO), 2013. International Energy Agency (IEA).
- World Energy Outlook (WEO), 2008. International Energy Agency (IEA).

Apéndice A

Metodologías para la alineación de los espejos del heliostato y del concentrador

A continuación se mencionan las metodologías empleadas para la alineación de los espejos del heliostato y del concentrador. En el caso de los espejos del heliostato se busca que tengan la mayor planitud posible y que todos en conjunto sean coplanares, esto quiere decir que sus normales sean paralelas para que reflejen de manera uniforme la radiación solar directa como si se tratara de un solo espejo plano. Los espejos del concentrador requieren quedar alineados de tal forma que todos reflejen la radiación solar proveniente del heliostato, hacia el foco del sistema óptico que se encuentra a 3.68 m del vértice, sobre el eje óptico. En la medida en la que se logren alinear correctamente los espejos, se lograra reducir el error óptico global.

Metodología para la alineación de los espejos del Heliostato

El heliostato H81 está compuesto de 30 espejos rectangulares, 20 de ellos de 1.3 x 1.8 m y los otros 10 de 1.8 x 1.9 m, ordenados en 6 filas y 5 columnas como se observa en la figura A1a. Cada espejo está pegado a una estructura independiente compuesta por un marco y un conjunto de platinas triangulares con ajuste en cada uno de sus vértices, para el caso de los espejos chicos cada marco tiene 12 platinas y para el caso de los grandes 16. Los marcos de los espejos se soportan a otras 6 estructuras llamadas costillas, las cuales se sujetan de los brazos y estos a su vez de la corona de la transmisión del heliostato. En la figura A1b se pueden apreciar todos los elementos descritos anteriormente.

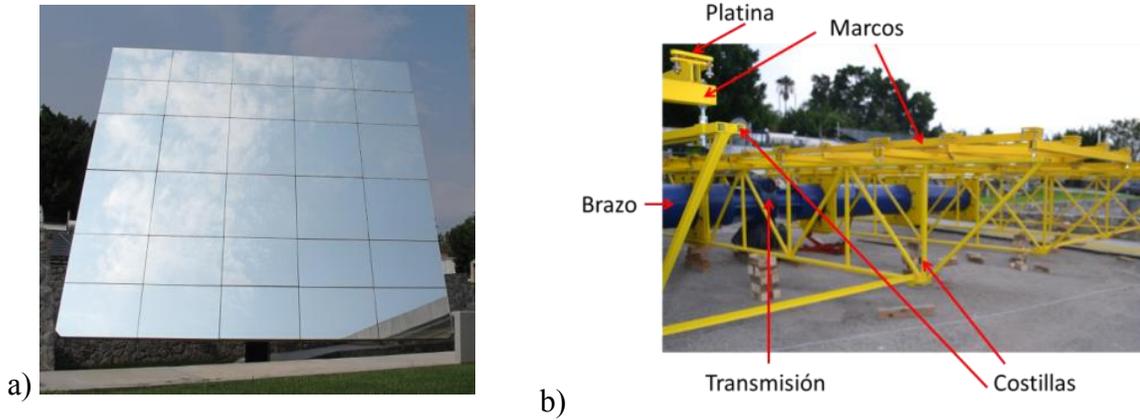


Figura A1. En la imagen a) se muestra el arreglo de los 30 espejos del H81 y en la b) se indican los elementos que los soportan.

Para lograr que las platinas de todas las facetas se alinearan de tal forma que fueran coplanares entre ellas, se desarrolló una metodología de alineación que consistió en lo siguiente:

1. Primero se nivelaron los brazos del heliostato y se calzaron, luego se nivelaron las costillas y se calzaron. La nivelación se hizo para tratar de formar un plano horizontal con las costillas.
2. Después se montaron las estructuras de las facetas (marcos) sobre las costillas, usando una pieza de aluminio para dar una distancia uniforme en cada punto de apoyo de las estructuras respecto a las costillas, con esto se buscó formar un plano paralelo al formado por las costillas. Además se fijó el ajuste de cada punto de apoyo, con un arreglo de doble tuerca para que al retirarlas no se perdiera ese ajuste.
3. Por último, para alinear cada platina se usó un láser de nivel que forma un plano horizontal y un ángulo de aluminio con una marca a 3 pulgadas de su base, sobre la cual se proyectó el plano del láser. Se ajustaron cada uno de los 3 puntos de apoyo de cada platina hasta que se proyectara el plano del láser sobre la marca del ángulo, buscando con esto que todas las platinas fueran coplanares y paralelas al plano horizontal del láser.

Se identificó cada una de las estructuras de las facetas y se retiraron de las costillas para pegar los espejos y se instalaron nuevamente cuando la estructura principal del heliostato se montó sobre el poste. En las imágenes de las figuras A2a, A2b y A3 se muestran imágenes de los tres puntos mencionados de la metodología de alineación del H81.



Figura A2. En la imagen a) se presentan los brazos y las costillas niveladas y en la b) se muestran además los marcos nivelados.



Figura A3. Alineación de platinas.

Metodología para la alineación de los espejos del concentrador

El sistema óptico de concentración solar del HoSIER está compuesto por un arreglo de 409 espejos de forma hexagonal y superficie esférica, divididos en 5 grupos (ver figura A4) con distancias focales distintas. Cada espejo está pegado a un sistema tipo rótula que tiene tres opresores distribuidos alrededor de la rótula a cada 120 grados, la rótula se sujeta a una malla que esta soportada sobre una estructura de superficie esférica. En la figura A5 se pueden apreciar los elementos y estructuras sobre los cuales se sostiene el sistema óptico de concentración.

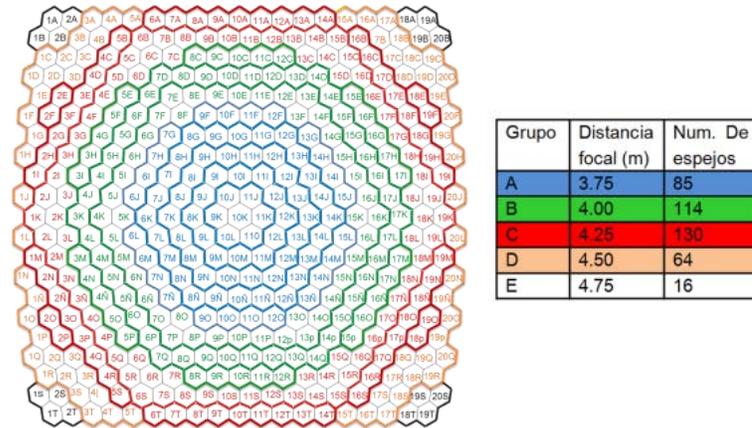


Figura A4. Esquema del sistema óptico de concentración solar, en el que se identifican los 5 grupos.

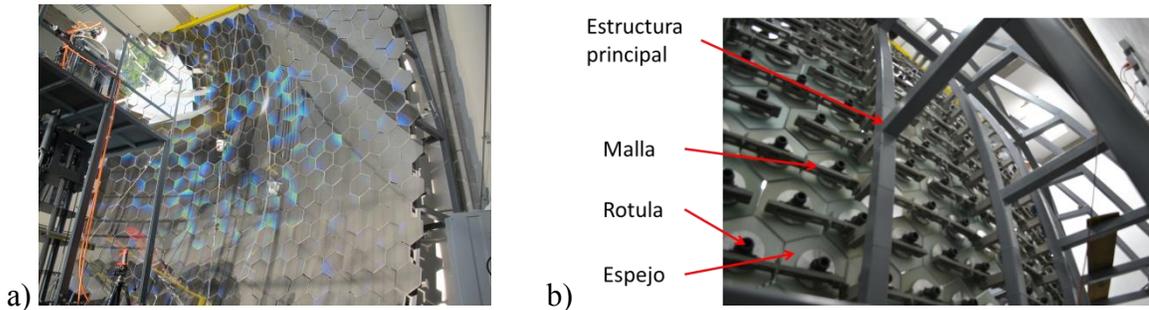


Figura A5. En la imagen a) se muestra el arreglo de los 409 espejos del sistema óptico de concentración y en la b) se indican los elementos que los soportan.

La metodología que se implementó para la alineación de los espejos del sistema de concentración, fue propuesta por el Dr. Sergio Vázquez del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) la cual consistió en lo siguiente:

Se utilizó como fuente de luz un láser de 25 mW y un objetivo de microscopio de 60X y 0.65 de apertura numérica, la función del objetivo fue la de generar un cono de luz que iniciara en el centro de curvatura de cada grupo de espejos e iluminara a esos espejos. Cada espejo al ser iluminado refleja una imagen casi puntual hacia la zona del centro de curvatura del grupo al que pertenece lo que permite ir alineando cada espejo de tal forma que la imagen reflejada coincida con un punto ubicado sobre una plantilla que se encuentra perpendicular al eje óptico del sistema de concentración y a la distancia del centro de curvatura del grupo al que se esté alineando. Los puntos correspondientes al reflejo de cada espejo ubicados sobre la plantilla, se calcularon previamente mediante el método de trazado de rayos, de tal forma que se corrigiera la aberración esférica y esto permitiera que cuando los espejos sean iluminados con una fuente de luz como la del sol, reflejen esa luz hacia el foco del sistema. La distancia focal que se consideró desde el diseño fue de 3.68 m. En la

figura A6 se presenta un esquema del método para la alineación de los espejos y en la figura A7 se presenta la plantilla de alineación.

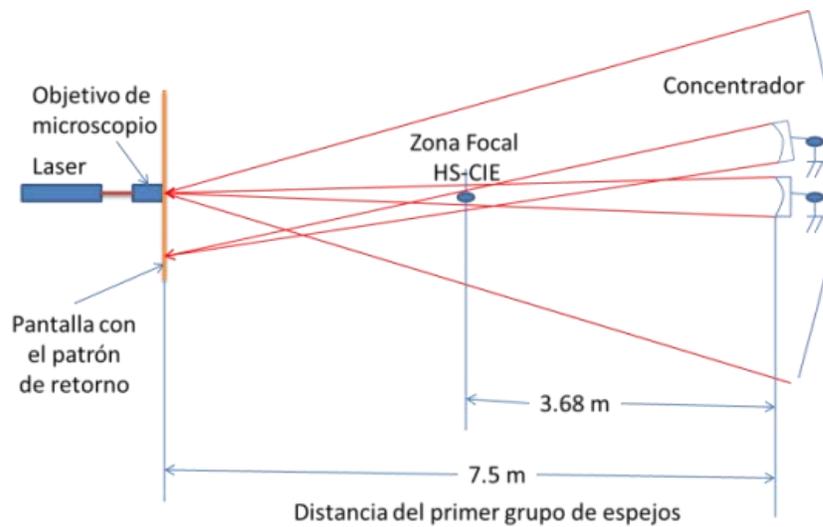


Figura A6. Esquema del método de alineación de espejos del sistema óptico de concentración solar.

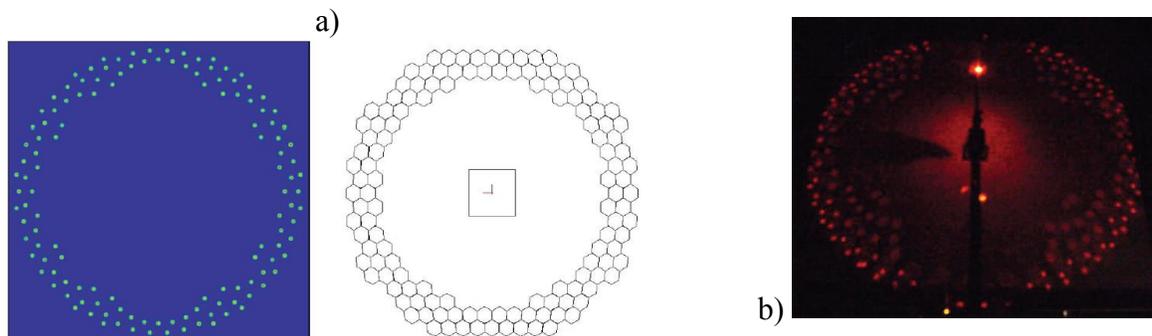


Figura A7. En la imagen a) se muestra la plantilla de alineación con los puntos correspondientes al grupo B y en la b) presenta una imagen de los reflejos de los espejos ya alineados de ese mismo grupo sobre la plantilla de alineación.

Apéndice B

Esquema de los elementos de ensamble del concentrador del HoSIER

Apéndice C

Ecuación del control del atenuador

Desarrollo de la ecuación del sombreamiento del atenuador

Las consideraciones que se tomaron en cuenta para calcular la ecuación de sombreamiento son las siguientes:

El desplazamiento angular de cada persiana es de β a 90° . Para calcular el ángulo β se utilizó la función trigonométrica tangente de un ángulo, siendo el cateto opuesto 1 mm y el adyacente 75 mm, estos valores se definieron por las dimensiones del espesor de cada persiana y el espaciamiento entre ellas respectivamente, en la figura C1 se presenta un esquema del sistema.

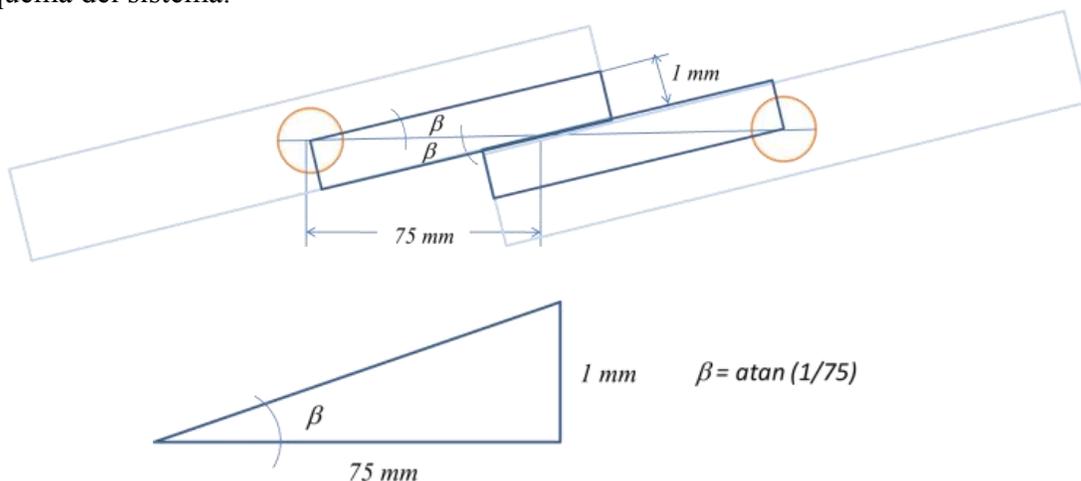


Figura C1. Esquema de las características del atenuador con las persianas traslapadas.

Debido a la diferencia de 10 mm que se tiene entre la mitad de las persianas y la mitad del espaciamiento entre ellas, es necesario que estas giren un ángulo α para que se pueda sombrear únicamente el área correspondiente a la apertura entre ellas. Para calcular el

ángulo α se empleó la función trigonométrica coseno de un ángulo, siendo 85 mm la distancia de la hipotenusa (es la dimensión de cada persiana desde el eje de giro hasta el extremo de la persiana) y 75 mm la del cateto adyacente, en la figura C2 se presenta un esquema del triángulo y el ángulo.

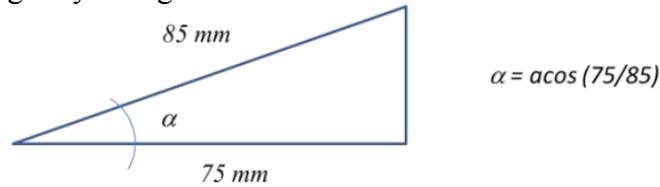


Figura C2. Esquema del ángulo α y su respectivo triángulo.

En función de las consideraciones anteriores se deduce que la cantidad de luz que pasa a través de cada lado de cada persiana depende del factor coseno de un ángulo y queda expresado mediante la ecuación C1.

$$dx = 75 - (85 \cos \theta) \quad (C1)$$

Donde dx es la distancia resultante de la diferencia de la apertura entre las persianas y la proyección de la persiana sobre el eje del atenuador y θ es el ángulo de giro de la persiana. En la figura C3 se muestra un esquema de las variables de la ecuación C1.

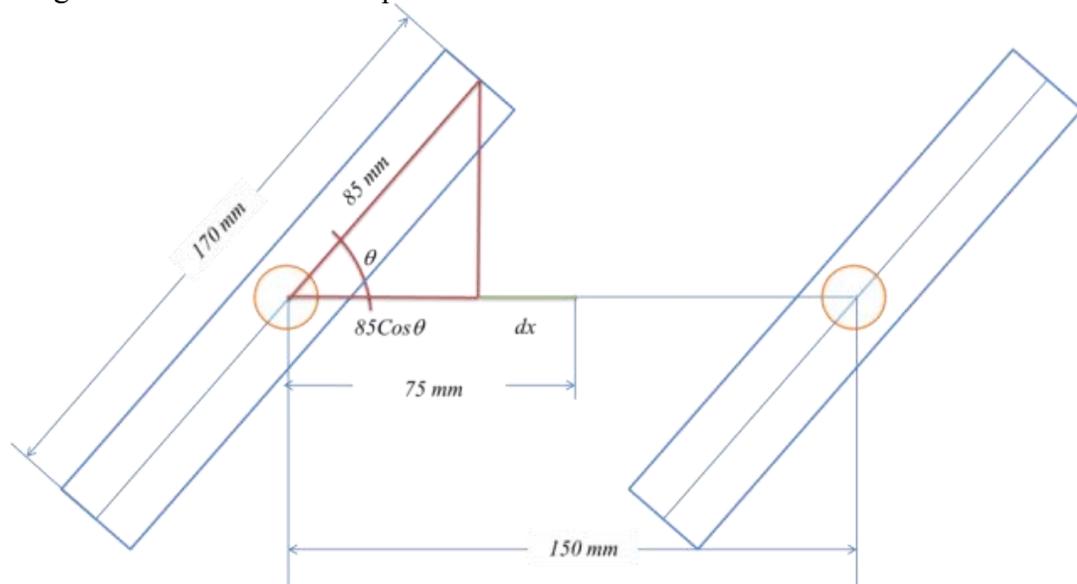


Figura C3. Esquema de las variables de la ecuación C1.

De las figuras y consideraciones se resume que el ángulo β es debido al traslape y al espesor de las persianas, el ángulo α es debido a la dimensión del traslape entre ellas, y el ángulo θ ($0.78^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) su desplazamiento angular. En la figura C4 se muestran estos tres ángulos.

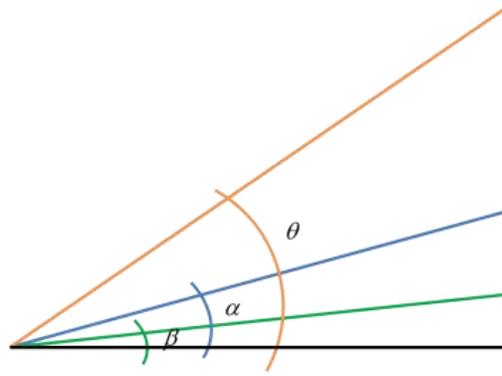


Figura C4. Resumen de los ángulos β , α y θ .

Para fines prácticos, se determinó que el control del atenuador se diera en porcentaje de apertura (P) el cual se expresa mediante la ecuación C2, donde $\theta - \alpha = 0 \leq P \leq 1$.

$$P = \frac{dx}{75} \quad (C2)$$

Por otra parte, el encoder empleado en el atenuador tiene una resolución de 4000 pulsos por revolución, lo que da una relación de 100 pulsos por cada 9 grados. Con esta relación se calculó que el ángulo $\beta = 0.78^\circ$ representa aproximadamente 8.5 pulsos.

Sustituyendo la ecuación C1 en la C2 y despejando al ángulo θ expresado en radianes se obtiene la ecuación C3.

$$\theta = \frac{180}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{75}{85} (1 - P) \right) \quad (C3)$$

Ahora, considerando la relación pulsos por grado y los pulsos que representa el ángulo θ , se obtiene la relación entre pulsos y porcentaje de apertura del atenuador, expresada por la ecuación C4.

$$\text{Pulsos} = \left(\frac{2000}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{75}{85} (1 - P) \right) \right) - 8.5 \quad (C4)$$

Con la ecuación C4 se puede tabular la relación del porcentaje de apertura con su correspondiente valor de pulsos del encoder que es el dato que se necesita para controlar el atenuador mediante el software. En la tabla C1 se presenta esta relación y en la figura C5 la gráfica correspondiente.

Tabla C1. Relación de porcentaje de apertura y pulsos del encoder.

Porcentaje (P)	Pulsos
0	303.4
0.1	407.4
0.2	492.6
0.3	567.7
0.4	636.3
0.5	700.6
0.6	761.9
0.7	821.0
0.8	878.6
0.9	935.3
1	991.5

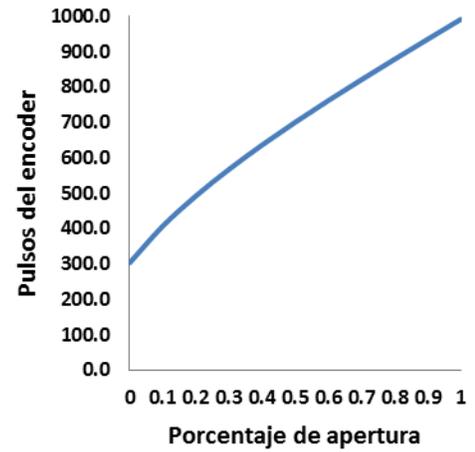


Figura C5. Gráfica de la ecuación C4.