



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

**Diseño, Construcción y Caracterización de un Calorímetro de
Cavidad para la Medición de Flujos Radiativos Concentrados en
Sistemas de Concentración Solar**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTORADO EN INGENIERIA

ENERGÍA – SOLAR FOTOTÉRMICA

P R E S E N T A:

Carlos Alberto Pérez Rábago

Director de tesis: **Dr. Claudio A. Estrada Gasca**



2007

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Cervantes De Gortari Jaime

Secretario: Dr. Estrada Gasca Claudio Alejandro

Vocal: Dr. Arancibia Bulnes Camilo Alberto

1^{er}. Suplente: Dr. Jaramillo Salgado Oscar Alfredo

2^{do}. Suplente: Dra. De Andres García M^a. Cruz

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA, TEMIXCO MORELOS.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Claudio A. Estrada Gasca

FIRMA

Dedicatoria

a los amores de mi vida

Catalina y Sebastián

Agradecimientos

A mis padres que cultivaron a lo largo de mi vida hacer todo con fe, esperanza y cariño. Que gracias a ello disfrute plenamente la realización de este trabajo.

Al Dr. Claudio A. Estrada Gasca por su apoyo, cariño y dirección para la realización y término de esta tesis.

A los miembros de mi jurado; Dr. Oscar A. Jaramillo Salgado, Dra. Ma. Cruz de Andres García, Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes y Dr. Jaime Cervantes de Gortari, les agradezco sus observaciones y sugerencias para mejorar el documento.

Al Centro de Investigaciones en Energía de la UNAM por permitirme el uso de sus instalaciones para el desarrollo de la tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante mis estudios de doctorado.

Al proyecto PAPIIT IN104205-2 y PAPIIT IN113805-2 con los cuales se construyó el primer prototipo de CAVIRAD.

A la Universidad Complutense de Madrid y en especial a la Dra. Ma. Cruz de Andres García por la beca otorgada para realizar la estancia de investigación en España en el periodo 2003 - 2004.

Al los investigadores y directivos del CIEMAT España por las facilidades prestadas para la realización de las campañas experimentales con HyCal y CAVICAL. En especial al Dr. Jesús Ballestrín Bolea por su valiosa colaboración tanto en las campañas experimentales en la PSA como en la concepción del concepto de CAVIRAD.

A Maria Jesús Marcos Crespo por el apoyo prestado con la modelación de la transferencia con FLUENT de calor de CAVICAL y de HyCal, así como sus enseñanzas en el manejo de este software.

A Guillermo de Velasco Muñoz y José Rodríguez García por la ayuda brindada en la instrumentación y montaje de los experimentos con CAVICAL en el HS-PSA.

A los buenos amigos que hice en mi estancia en la PSA.

Al Sr. Simón Ortiz Juárez miembro del taller del CIE, el cual realizó la construcción de CAVIRAD.

A Maribel Fernández Pérez por su apoyo en la impresión de la tesis.

Agradezco al Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar y el MI. Victor Hugo Gómez Espinoza por la ayuda brindada en la instrumentación y montaje en los experimentos con CAVIRAD.

A mis primer@s alumn@s Alejandra, Moisés y Antonio con los cuales he compartido esta pasión por seguir al Sol.

A mis compañeros y amigos del CIE, en especial a Fernando, David, Oscar, Memo y Jorge por su apoyo y cariño durante estos años.

Nuevamente agradezco el apoyo que me han brindado mis hermanos y hermanas: Aurora, Javier, Rodolfo, Lupita, Conchita, Eduardo, José Luís y Martha, así como sus respectivas familias, por todo el cariño y comprensión que me han tenido.

A los buenos amig@s de León: Checo, Jaime y Nohemí con los que, a pesar de la distancia, se han compartido muchos sueños y arto cariño a lo largo de este tiempo.

Por último quiero agradecer a Catalina por el apoyo incondicional que me brindó durante los momentos más difíciles de mi doctorado.

Resumen

En este trabajo se diseñó, construyó y caracterizó un calorímetro de cavidad cónica, al que se le denominó CAVIRAD, con el propósito de medir el flujo radiativo altamente concentrado, aplicado a sistemas de concentración solar de foco puntual, como Platos/Stirling o Torre Central. Para iniciar con el diseño se realizaron trabajos preliminares para comprender los mecanismos de transferencia de calor y la relación entre la densidad del flujo radiativo incidente y la respuesta térmica que ocurren tanto en un calorímetro como en un radiómetro.

Para el diseño del calorímetro – radiómetro se plantea el problema físico, las consideraciones requeridas para realizar la medición del flujo radiativo concentrado, así como el análisis de las características ópticas y térmicas de la cavidad cónica en función de los parámetros de diseño. Por otra parte, se realizó el análisis de los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en el interior del dispositivo.

Se presenta la instrumentación, el montaje, en el concentrador de foco puntual DEFRAC, y la puesta en operación para realizar la caracterización del dispositivo en condiciones definidas de operación. Donde se realizó una campaña experimental de pruebas y caracterización. Por otra parte, para caracterizar el dispositivo, se realizó la experimentación con el seguimiento, haciendo variar el número de espejos empleados para la concentración, teniendo diferentes niveles de densidad radiativa concentrada incidiendo en la cavidad.

Abstract

In this thesis, a calorimeter of conic cavity, denominated CAVIRAD was designed, built, and, characterized, with the intention of measuring the highly concentrated radiative flow, applied to systems of solar concentration of punctual focus, such as Stirling/Plates or Central Tower. When the design was started, several preliminary tasks were done in order to understand the heat transferring mechanisms and the relationship among the density of the incident radiative flow and the thermic answer that happen either in a calorimeter or in a radiometer.

In order to design the calorimeter – radiometer the following are established: the physic problem, the necessary considerations to measure the concentrated radiative flow, and the analysis of the optic and thermic characteristics of the conic cavity related to the design parameters. By other side, an analysis of the phenomenon of heat transfer that happens within the instrument was made.

Herein the instrumentation, the set up in the concentrator of punctual focus DEFRAC, and the operation, in order to make the characterization of the instrument in well defined operational conditions. Where trials and characterizations experimental campaign was made. By other hand, in order to characterize the instrument, a trail with the following up was made, variating the number of mirrors used to make the concentration happen, having different levels of concentrated radiative density having a bearing on the cavity.

Índice

Introducción	1
1. Antecedentes	
1.1 Energía, medio ambiente y energía solar	4
1.2 Sistemas de concentración solar	5
1.3 Métodos convencionales para la medición de radiación solar altamente concentrada	8
1.4 Dispositivos para medición de radiación solar altamente concentrada	10
1.5 Objetivos	23
2. Estudios – preliminares para el diseño del calorímetro – radiómetro	
2.1 El calorímetro de cavidad cónica CAVICAL	25
2.1.1 Transferencia de calor en CAVICAL	25
2.1.2 Caracterización de CAVICAL en el Horno Solar	30
2.2 Radiómetro HyCal	38
2.2.1 Calibración calorimétrica del radiómetro	38
2.2.2 Modelación de la transferencia de calor del radiómetro	41
3. Obtención de los parámetros de diseño del calorímetro - radiómetro (CAVIRAD)	
3.1 Problema físico en la medición con CAVIRAD	48
3.2 Parámetros geométricos	51
3.3 Análisis de la absorptancia aparente de la cavidad	54
3.4 Análisis de la distribución radiativa en las paredes de la cavidad	58
3.5 Análisis de la transferencia de calor en el calorímetro	63
3.6 Tiempo de respuesta	68
3.7 Dimensiones propuestas para CAVIRAD	70
4. Diseño del calorímetro / radiómetro (CAVIRAD)	
4.1 Componentes del dispositivo	72
4.2 Descripción general del dispositivo	73
4.3 Construcción del dispositivo	73
4.4 Descripción de los componentes de CAVIRAD	75
5. Diseño Experimental y Operación del Sistema	
5.1 Instrumentación y montaje	79
5.2 Operación del sistema experimental	83
5.3 Diseño experimental	86
5.4 Metodología experimental	86
6. Análisis y Resultados	
6.1 Experimentación con seguimiento solar	88
6.2 Experimentación con calorímetro fijo	93
6.3 Calibración del Instrumento	95
Conclusiones y Recomendaciones	99
Referencias	102
Apéndices	
A1 Experimentos de CAVICAL en el Horno Solar de la PSA	108

Nomenclatura

Latinas

A_{ab}	Área de la abertura	m^2
C_p	Capacidad calorífica del agua	W
Q_c	Calor extraído por el fluido de refrigeración	W
Q	Pérdidas	W
Q_{in}	Calor entrante a la cavidad	W
Q_{sun}	Potencia absorbida por el calorímetro	W
E_{out}	Energía saliente	W
G_b	Irradiancia directa	$W m^{-2}$
L_f	Distancia focal	M
L	Altura del cono	M
m	Masa de la cavidad de cobre	Gr
$\dot{m}$	Flujo másico	$Kg s^{-1}$
P	Presión	<i>Bares</i>
R_a	Radio de la abertura de la cavidad	M
R_o	Radio de la base del cono	M
R_{co}	Radio del disco de constantan	M
T	Temperatura	$^{\circ}C$
t	Tiempo	<i>Segundo</i>
V_{cu}	Volumen de la pared del cono receptor	m^3

Griegas

α	Absortancia	
α_{ap}	Absortancia aparente	
ϕ_{sun}	Densidad de flujo radiativo concentrado incidente	$kW m^{-2}$
Φ	Densidad de radiación concentrada	$kW m^{-2}$
ϵ	Emitancia de pared	
ϵ_a	Emitancia aparente	
δ_{co}	Espesor del disco de constantan	M
δ	Espesor de pared del cono receptor	M
ΔV	FEM del efecto Seebeck	V
Γ	Constante de calibración de radiómetro	$kW m^{-2} mV^{-1}$
η_{ab}	Eficiencia de absorción del receptor	
ρ	Reflectancia	
ρ_{agua}	Densidad del agua	$Kg m^{-3}$
ϖ	Velocidad del aire (viento)	$Km h^{-1}$
v	Caudal de refrigeración	$l min^{-1}$
ξ	Relación de baffle	
ω	Ángulo de abertura del cono	$^{\circ}$

Lista de figuras

1.1	Diferentes tipos de sistemas de concentración solar operando de manera experimental en la Plataforma Solar de Almería (PSA), a) Sistemas de Torre Central (CESA), b) Sistemas Dish Stirling, c) Sistemas de Enfoque Lineal (DISS) y d) Sistema de concentración tipo Fresnel.	7
1.2	Vista esquemática del DEFRAC donde se muestra la distribución de los grupos de espejos.	8
1.3	Esquema del calorímetro de placa plana.	12
1.4	Esquema de las principales partes que conforman a CAVICAL.	14
1.5	Esquema del calorímetro del SunCach [Groer y Neumann, 1999].	15
1.6	Esquema del calorímetro ASTERIX: 1 Abertura del calorímetro, 2 Salida del flujo de refrigeración, 3 Amplificación y medición del DTagua, 4 Diafragma, 5 Cavidad [Ferrier y Rivoire ,2000].	17
1.7	Esquema del radiómetro HyCal.	19
1.8	Simplificación del disco de constantan del Gardon para el modelo unidimensional [Gardon et al., 1953].	19
1.9	Esquema del radiómetro esférico, las partes importantes del sensor son: 1) es el área de primer contacto, 2) es el área de medición, 3) foto-sensor y da es el diámetro de la abertura al sensor.	21
1.10	Fotografía del radiómetro Kendall.	22
2.1	Esquema de las condiciones a la frontera para el calorímetro CAVICAL y el dominio del aire atmosférico.	26
2.2	Distribución de flujo radiativo. Casos A y T, se muestra la distribución de la potencia incidente en la pared del receptor.	27
2.3	Esquema de un corte transversal de CAVICAL, donde se muestra la distribución de temperaturas en su interior en grados K para una concentración con todos los espejos.	28
2.4	Comparativo de la distribución de temperaturas en la pared del receptor, donde se representa con la línea continúa los resultados de la simulación y los puntos con la banda de error de $\pm 1^\circ\text{C}$ representan las mediciones experimentales. Los parámetros son: $G_b = 938 \text{ W m}^{-2}$, $Q_c = 333 \text{ W}$, $m = 0.01 \text{ kg s}^{-1}$, $T_c = 275.8 \text{ K}$, $T_s = 307.3 \text{ K}$.	29
2.5	Respuesta de los ΔT_i a los incrementos de potencia.	32
2.6	Respuesta de los ΔT_i a los incrementos de potencia.	33
2.7	Comportamiento de las temperaturas del agua de refrigeración.	34
2.8	Comportamiento de ΔT_i para todo el experimento.	35
2.9	Imágenes CCD del escudo protector a) con 20% de la abertura del atenuador del HS y b) con 60 % de la abertura del atenuador del HS.	35
2.10	Distribución de la radiación a) con 70% de la abertura del atenuador del HS incidiendo en el blanco lambertiano y b) con 70 % de la abertura del atenuador del HS incidiendo en la abertura de CAVIRAD.	36
2.11	Distribución de radiación tanto en el cono de la cavidad como en la cara del calorímetro.	37
2.12	Instrumentación del sensor HyCal para su calibración a través de calorimetría.	39
2.13	Comparación de las respuestas entre los métodos de calibración a través de un balance térmico y de manera radiométrica [Ballestrín et al., 2004].	40
2.14	a) Esquema de la vista lateral de la sección cerrada del dominio extendido del aire frente al sensor y b) Vista frontal del enmallado del disco de constantan.	42
2.15	Vista de la sección trasversal de la distribución de temperatura tanto en el HyCal como en el aire que se encuentra próximo a este. En el recuadro se muestra la distribución de temperatura para el disco de constantan.	43
2.16	Distribución de temperatura en la superficie del HyCal.	43
2.17	Potencia incidente vs ΔV_{co} . (▼) Datos con base en la calibración experimentales (■) Datos con base en la modelación numérica.	44
2.18	Pérdidas térmicas en función de la potencia absorbida (αG_b); pérdidas convectivas (Q_{conv}), radiativas (Q_{rad}) y totales ($Q_{total} = Q_{conv} + Q_{rad}$).	45
2.19	Porcentajes de las pérdidas térmicas en función de la velocidad del viento, para tres rangos de potencia absorbida $\alpha G_b = 69, 460 \text{ y } 1039 \text{ kW m}^{-2}$.	46
3.1	Esquema del calorímetro de cavidad con flujos de calor.	50
3.2	Esquema de la geometría de la cavidad cónica.	52
3.3	Gráfica de L en función de ω , para diferentes ξ y $R_a = 5 \text{ mm}$.	53
3.4	Gráfica del peso de la cavidad (m) en función del ángulo de abertura de la cavidad (ω) para $R_a = 5 \text{ mm}$.	54
3.5	Gráfica de la ε_a en función de ξ calculada con Monte Carlo para un ángulo de apertura ω de 15° .	55
3.6	Gráfica de la ε_a en función de ξ calculada con Monte Carlo para un ángulo de apertura ω de 30° .	55

3.7	Gráfica de ε_a en función de la geometría, representada en este caso por la L , para diferentes ξ .	56
3.8	Gráfica de ε_a en función de la geometría, representada en este caso por la m , para diferentes ξ .	57
3.9	Diagramas de los diferentes casos de cavidades.	59
3.10	Distribución de flujo radiativo para los doce casos a modelar.	60
3.11	Potencia radiativa incidente para cada uno de los cavidades.	61
3.12	Pico máximo de radiación incidente para cada uno de los cavidades cónicas.	62
3.13	Densidad de potencia concentrada por unidad de masa del cono receptor.	62
3.14	Esquema de las condiciones a la frontera para el calorímetro.	64
3.15	Distribución de flujo radiativo para la geometría del caso B4 (puntos-línea) y aproximación Gausiana (línea).	65
3.16	Distribución de temperaturas(K) en la pared del calorímetro de la geometría B4 para una densidad de flujo radiativo de 1000 kW m^{-2} , con un caudal de refrigeración de 1 l min^{-1} .	66
3.17	Distribución de la diferencia de temperatura longitudinalmente para la geometría del caso B4 (línea azul) y la distribución del flujo radiativo incidente (línea negra).	66
3.18	Relación de temperaturas en el vértice de la cavidad para diferentes caudales y flujos de radiación incidentes, para la geometría del caso B4.	67
3.19	Incrementos de la temperatura del vértice del cono receptor para diferentes casos de caudal y flujo incidente para la geometría del caso B4.	68
3.20	Distribución de la temperatura promedio en función del tiempo.	70
4.1	Esquema de los sistemas de refrigeración de CAVIRAD.	74
4.2	Corte transversal y fotografía del cuerpo principal del calorímetro.	76
4.3	Corte transversal y fotografía del cono receptor.	77
4.4	Fotografía de la tapadera del diafragma.	77
4.5	Corte transversal y fotografía del diafragma refrigerado, donde se muestra el cuerpo principal ya colocado adentro del diafragma.	78
4.6	Esquema y fotografía de la ventana del diafragma.	78
5.1	Pasa muros de los termopares de entrada y salida de CAVIRAD.	80
5.2	Vista esquemática de la instrumentación de CAVICAL.	81
5.3	Pirheliómetro con el equipo de seguimiento del Sol.	82
5.4	CAVIRAD armado e instrumentado listo para hacer experimentación.	82
5.5	a) Proyección del disco superior en el disco inferior, b) imagen del ajuste de la sombra en el disco inferior.	85
5.6	Clasificación de los espejos por su distancia al eje principal del DEFRAC.	85
5.7	Ajuste de espejos del concentrador, a) muestra como la imagen solar se encuentra en la periferia de la abertura del diafragma b) muestra como los espejos ajustados forman una sola imagen dentro de la abertura.	86
6.1	Distribución de temperaturas en el calorímetro para la prueba 1	89
6.2	Comportamiento de los ΔT del agua de refrigeración para la prueba 1.	90
6.3	Comportamiento de los ΔT_i para la prueba 1 y ajustes exponenciales.	90
6.4	Medición del flujo radiativo concentrado para las pruebas 1,2 y 3.	92
6.5	Evolución de diferencias de temperaturas en el calorímetro para el experimento con el calorímetro fijo.	94
6.6	Imágenes CCD de la mancha Solar en el experimento de CAVIRAD sin seguimiento a) Fuera de la abertura del diafragma y b) La mancha Solar dentro de la abertura del diafragma.	95
6.7	Curva de calibración de la ΔT_v en función de la densidad de radiación incidentes en el dispositivo.	96
6.8	Curva de calibración de la ΔT_m en función de la densidad de radiación incidentes en el dispositivo.	97
6.9	Curva de calibración de la ΔT_b en función de la densidad de radiación incidentes en el dispositivo.	97
6.10	Curva de calibración del transductor en la base.	98
A1.1	Esquema básico del horno solar.	109
A1.2	Vista esquemática de la instrumentación de CAVICAL.	109
A1.3	Esquema de conexiones del sistema de refrigeración de CAVICAL.	110
A1.4	Incrementos de potencia radiativa de forma gradual.	111
A1.5	Incrementos de potencia radiativa de manera repentina.	111
A1.6	Arreglo experimental con CAVICAL y el blanco lambertiano.	112
A1.7	Comportamiento de las temperaturas del agua de refrigeración.	113
A1.8	Comportamiento de los ΔT para todo el experimento.	114
A1.9	Respuesta de ΔT_{agua} a los incrementos de potencia incidente Q_{sun} .	115
A1.10	Respuesta de los ΔT_i a los incrementos de potencia.	116
A1.11	Distribución de ΔT a lo largo de la pared del cono receptor para diferentes densidades de radiación concentradas.	116

A1.12	Comportamiento de las temperaturas del agua de refrigeración.	117
A1.13	Comportamiento de ΔT_i para todo el experimento.	118
A1.14	Respuesta de los ΔT_i a los incrementos de potencia.	118
A1.15	Comportamiento de las temperaturas del agua de refrigeración.	120
A1.16	Comportamiento de ΔT_i para todo el experimento.	120
A1.17	Imágenes CCD del escudo protector a) con 20% de la abertura del atenuador del HS y b) con 60 % de la abertura del atenuador del HS.	121
A1.18	Distribución de radiación tanto en el cono.	121
A1.19	Distribución de la radiación a) con 70% de la abertura del atenuador del HS incidiendo en el blanco lambertiano y b) con 40 % de la abertura del atenuador del HS incidiendo en la abertura de CAVIRAD.	123

Lista de tablas

1.1	Parámetros de CAVICAL	14
1.2	Comparativa entre los calorímetros SunCatch y CAVICAL	15
1.3	Comparativa entre los calorímetros ASTERIX y CAVICAL	18
2.1	Condiciones iniciales para la modelación	27
2.2	Balance teórico de energía para los cuatro casos.	29
2.3	Parámetros de la experimentación.	31
2.4	Parámetros de la regresión lineal para Φ [kW m ⁻²].	32
2.5	Parámetros de la experimentación.	33
2.6	Parámetros de la regresión lineal para Φ [kW m ⁻²].	33
2.7	Parámetros de la experimentación.	34
2.8	Mediciones realizadas tanto con CAVICAL como por la técnica de imágenes CCD de la densidad de radiación concentrada.	36
2.9	Estimación con trazados de rayos de la potencia radiativa incidente en cada prueba.	37
2.10	Comparativo entre la constante de calibración y la regresión lineal de la modelación.	44
2.11	Rango de variación de los parámetros de la modelación.	46
3.1	Rangos de los parámetros de diseño del cono receptor.	57
3.2	Geometrías propuestas a modelar.	58
3.3	Resumen de la modelación.	68
3.4	Parámetros de diseño del cono receptor.	70
6.1	Tiempos de respuesta de CAVIRAD.	91
6.2	Resultados calorimétricos de las mediciones realizadas con CAVIRAD.	92
6.3	Promedios de Resultados calorimétricos de las mediciones realizadas con CAVIRAD.	93
6.4	Tiempos de respuesta de CAVIRAD.	94
A1.1	Parámetros de la experimentación.	112
A1.2	Parámetros de la experimentación.	116
A1.3	Parámetros de la experimentación.	117
A1.4	Parámetros de la experimentación.	119
A1.5	Parámetros de la experimentación.	119
A1.6	Potencia radiativa incidente en cada prueba.	122

Acrónimos

ASTERIX	Tecnología Avanzada para la Estimación de la Radiación Solar de manera más Precisa
CAVICAL	Calorímetro de Cavidad Cónica
CAVIRAD	Calorímetro y Radiómetro de Cavidad Cónica
CCD	<i>Charge Coupled Device</i> (Dispositivo de carga Interconectada)
CCS	Coordinación de Concentración Solar
CESA	Sistemas de Torre Central de la Plataforma Solar de Almería, España
CIE	Centro de Investigación en Energía
CNRS-IMP	<i>Center National de la Recherche Scientifique</i>
DEFRAc	Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Altamente Concentrados
DISS	Sistema de Enfoque Lineal de la Plataforma Solar de Almería, España
DLR	<i>Deutsches Zentrum Für Luft- und Raumfahrt</i> (Centro Aeroespacial Alemán)
HS-PSA	Horno Solar de la Plataforma Solar de Almería
HyCal	Radiómetro tipo Gardon
PSA	Plataforma Solar de Almería, España
SunCatch	Calorímetro de Cavidad Cónica con Diafragma

Introducción

Debemos considerar que actualmente la mayor parte de la generación de energía térmica en el mundo está basada en hidrocarburos provenientes del petróleo y gas natural cuyas reservas probadas permitirán satisfacer la demanda sólo para algunos años. Aunque hubiera suficientes recursos fósiles para cubrir la creciente demanda, ahora el problema está relacionado también con la contaminación, específicamente con las altas emisiones de CO₂ y muchos otros gases de efecto invernadero que afectan seriamente nuestro ecosistema [Tyner *et al.*, 2001].

Se han realizados esfuerzos importantes por parte de la comunidad internacional para la protección del medio ambiente, como son el protocolo de Montreal y el de Kyoto. Bajo estos acuerdos internacionales es donde la tecnología relacionada con el aprovechamiento de la radiación solar se reconoce como una solución apropiada para la generación de energía térmica y eléctrica. Se debe tener en mente que la transformación de la radiación solar es la fuente primordial de las tecnologías renovables ya que el viento, olas, hidroeléctrica e incluso biomasa son resultado de la potencia proveniente del Sol [Maxwell *et al.*, 1994, Norman Z. Shilling 2003].

En la tecnología solar fototérmica que se encarga del aprovechamiento de la energía solar como una fuente de calor útil, el diseño de los receptores solares de sistemas de concentración requiere de un conocimiento adecuado de los procesos de transferencia de calor que ocurre en los mismos. Es particularmente importante en el diseño e incluso en la operación de estos sistemas, conocer la cantidad de potencia solar concentrada que llega a ellos, así como su distribución espacial. El receptor puede ser optimizado y su eficiencia mejorada sólo si las distribuciones de flujo radiativo en la región focal y en la superficie del absorbedor son conocidas. Hay que recordar que los picos de densidad de flujo generan puntos calientes sobre la superficie del receptor produciendo la aparición de esfuerzos térmicos y el posible daño del mismo [Ulmer, *et al.*, 2002].

La medición de la radiación altamente concentrada se realiza principalmente con radiómetros o calorímetros. Los radiómetros empleados para medir el flujo radiativo concentrado, introducen una serie de errores sistemáticos debidos, entre otras

cosas, a que la composición espectral de la radiación solar es diferente a la radiación de cuerpo negro con el cual fueron calibrados y las diferencias entre las condiciones de operación y la llevadas a cabo en la calibración. Por otra parte, los calorímetros empleados para este fin, requieren de un arreglo experimental muy complejo que dificultan la operación de los mismos e introducen una serie de errores en el cálculo del flujo radiativo concentrado.

En el Centro de Investigación en Energía de la UNAM se han realizado investigaciones relacionadas con tecnologías de concentración solar, en particular en la evaluación de la potencia concentrada de dispositivos de concentración de foco puntual a través de la técnica de calorimetría. En un principio se realizó esta evaluación con un calorímetro de placa plana, sin embargo, debido a que en la superficie se alcanzaban temperaturas muy altas, por arriba de 470 °C, las pérdidas térmicas y la incertidumbre en la medición de la absorptancia de la superficie a estas temperaturas [Acosta *et al.*, 2004] se consideró poco adecuado este instrumento. Posteriormente se construyó un calorímetro de cavidad cónica, el cuál se denominó CAVICAL [Pérez-Rábago *et al.*, 2006]. Con este dispositivo se consiguió reducir las pérdidas térmicas y tener mayor control en la absorptancia del dispositivo reduciendo la incertidumbre en la medición [Pérez-Rábago *et al.*, 2006]. Sin embargo, el gran tamaño de dicho dispositivo repercutió en un tiempo de respuesta largo para su operación y por otra parte, su arquitectura no le permite realizar mediciones fuera del entorno para el que fue diseñado.

Con todo lo anterior surge la idea de desarrollar un nuevo dispositivo que funcionara como calorímetro y también como radiómetro. Se mantuvo la idea original de utilizar la cavidad para reducir considerablemente la influencia de la absorptancia de la superficie del instrumento y cuyas propiedades opto-térmicas sólo dependieran de la geometría de la cavidad. Así, se buscó que el nuevo instrumento de medición presentara una medición más precisa y exacta del flujo concentrado con tiempos de respuesta por debajo de los 10 segundos, que son similares a los de los radiómetros comerciales.

Por lo anterior se estableció como objetivo de la tesis diseñar, construir y caracterizar un dispositivo de medición de flujo radiativo aplicado a sistemas de concentración solar de foco puntual, como pueden ser Platos/Stirling o Torre Central. Además, se propuso realizar un estudio teórico-experimental de los procesos de transferencia de calor que ocurren en el interior del instrumento, para cuantificar las pérdidas térmicas y estimar el tiempo de respuesta del instrumento.

Debido a que el entorno donde se realizan las mediciones del flujo radiativo concentrado resulta ser de difícil acceso, dificultando la instrumentación, se requiere que el dispositivo realice la medición a través de un solo transductor y en el menor tiempo posible. Así, se propuso la construcción de un calorímetro-radiómetro, el cual opera de manera radiométrica y se calibra calorimétricamente.

En esta tesis se reportan los principales resultados de la investigación y esta consta de seis capítulos. En el primero se presenta los antecedentes al trabajo, donde se

incluye una pequeña introducción a las fuentes renovables de energía, centrando la atención en la energía solar y los sistemas de concentración. También se ha dado una breve explicación de los diferentes tipos de medición de la radiación concentrada que incide en estos sistemas. Debe quedar claro que dicha medición es sumamente importante para la evaluación de las tecnologías de concentración solar. Por último, se hace una revisión de los diferentes calorímetros y radiómetros que se emplean para medir la densidad de flujo radiativo concentrado, donde se indican sus ventajas y desventajas, y se plantean las estrategias a seguir para el diseño de un nuevo dispositivo que realice mediciones de la densidad de flujo radiativo concentrado.

En el segundo capítulo se describen estudios preliminares, tanto teóricos como experimentales de dos de los principales dispositivos de medición de flujo radiativo altamente concentrado: el radiómetro HyCal, el cual es el más utilizado para esta aplicación y el calorímetro de cavidad cónica desarrollado en el Centro de Investigaciones en Energía de la UNAM (CAVICAL). Se busca entender la fenomenología que ocurre en estos dispositivos y con ello conocer los parámetros más importantes a ser considerados en un nuevo diseño.

En el tercer capítulo se presenta el problema físico del calorímetro y las consideraciones requeridas para realizar la medición del flujo radiativo concentrado, así como el análisis de las características ópticas y térmicas de la cavidad cónica en función de los parámetros geométricos. Por otra parte se presenta el análisis de los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en el interior del dispositivo y su sistema de refrigeración.

En el cuarto capítulo se describe el dispositivo propuesto, sus partes generales, la forma como se arman cada uno de los componentes, el funcionamiento tanto del calorímetro como del diafragma refrigerado, así como las condiciones especiales que fueron tomadas en cuenta para el diseño.

En el quinto capítulo se describe la instrumentación, la operación general del sistema, el diseño de los experimentos y la operación del sistema experimental.

En el sexto capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos, así como su análisis y la determinación de la calibración del calorímetro para condiciones específicas de operación.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios.

Capítulo 1

Antecedentes

En este capítulo se presenta el panorama energético, la dependencia que tiene la sociedad en las fuentes de energía fósiles y las implicaciones medioambientales que estas presentan. Además se plantea como una alternativa de solución el uso de las fuentes renovables, en especial el uso de la energía solar fototérmica. Para el desarrollo de dicha tecnología es importante evaluar la disponibilidad de energía concentrada por lo que se requiere una medición con la menor incertidumbre de la misma. También se presenta el estado del arte de los diferentes dispositivos que existen para hacer esta medición y se realiza una comparación entre ellos. Con base en los antecedentes expuestos y la identificación de la problemática se exponen los objetivos y metas de este trabajo.

1.1 Energía, medio ambiente y energía solar

El hombre, a lo largo de su historia, ha requerido de la energía para realizar sus actividades. Desde su aparición en la faz de la Tierra hasta el inicio de la industrialización en Europa, utilizó fuentes renovables de energía como la solar, la biomasa, la del viento y la del agua. Éstas le dieron a la humanidad el calor para cocinar y calentarse, la potencia para transportarse en ríos y mares, y la fuerza para la molienda de granos y el bombeo de agua. Hoy en día, los combustibles fósiles con son el petróleo, carbón y gas natural, son las principales fuentes de energía de en planeta ya que más del 80% de la demanda de energía se satisface con ellos [IEA, 2004].

El uso indiscriminado de los combustibles fósiles está causando un daño ecológico irreversible en muchas partes del planeta. Algunos estudios muestran que el cambio climático se debe a la acumulación de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, como son dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, ozono y clorofluorocarburos y es son posiblemente los de mayor impacto [Climate Change,

2001]. Por otro lado, no hay que olvidar que los combustibles fósiles no son renovables y se prevé el agotamiento del petróleo a mediados del presente siglo [Houghton y Ding, 2001].

El deterioro ambiental se agudiza con el paso del tiempo; por ello es necesario aplicar políticas para la reducción y el control de las emisiones de contaminantes, así como garantizar las reservas de combustibles fósiles para las siguientes generaciones. Ante esta situación, toma especial importancia la alternativa de suplir dichas fuentes por fuentes renovables de energía. No es posible realizar completamente esta sustitución en los siguientes veinte años, sin embargo, sí de manera gradual, mediante la diversificación de las fuentes de energía, procurando que las renovables tengan un impacto favorable muy importante.

De las energías renovables la solar es con la que se cuenta con mayor disponibilidad en el planeta. Desde la década de los años setenta, del siglo pasado, se empieza a utilizar en varias partes del mundo, y se espera que en un futuro no mayor que 30 años pueda ser una de las fuentes básicas del suministro energético del planeta.

Para hacer posible el uso de las fuentes renovables a gran escala, se requieren tecnologías con altas eficiencias, disminuyendo los costos de producción, que en estos momentos la hacen en muchos casos poco competitivas frente a las tecnologías convencionales que emplean combustibles fósiles [Brakmann *et al.*, 2005].

A pesar de que gran parte de nuestro país se encuentra en una de las franjas con mayor insolación del planeta, superior a $5.0 \text{ kW h m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en casi todo el territorio [NASA, 2005], no se han desarrollado las tecnologías necesarias para su aprovechamiento. Por esto, es indispensable fomentar la investigación y el desarrollo de infraestructura para beneficiarnos de esta fuente de energía.

1.2 Sistemas de concentración solar

El aprovechamiento de la energía solar depende de la manera en la que se capta la radiación, así como los materiales y sistemas empleados para su transformación, por lo que estos se pueden clasificar en tres ramas tecnológicas principales [Winter, *et al.*, 1991]:

- a. *Tecnología fotovoltaica*; la cual consiste en la transformación directa de la energía solar en energía eléctrica mediante dispositivos semiconductores denominados celdas solares y empleados en dispositivos fotovoltaicos.
 - b. *Tecnología fotoquímica*; la cual utiliza la radiación solar para producir combustibles solares que son referidos como vectores energéticos. Por ejemplo, la generación de electricidad a través del hidrógeno obtenido mediante sistemas de concentración solar. Los sistemas de concentración solar también pueden ser empleados para depurar el agua, degradando compuestos tóxicos entre otros.
-

- c. *Tecnología fototérmica*; la cual por medio de un fluido térmico y empleando diversos tipos de dispositivos como concentradores, receptores y sistemas de seguimiento, transforman la energía radiativa del Sol en energía térmica. Esta última posteriormente se puede usar para producir potencia mecánica, eléctrica y también como fuente de calor de proceso doméstico o industrial.

Si consideramos la generación de potencia eléctrica, la tecnología fotovoltaica es en la actualidad la de mayor capacidad instalada en el mundo, debido a su flexibilidad y a que resulta fácil de aplicar y satisfacer demandas energéticas domésticas en sitios de difícil acceso de la red eléctrica. Sin embargo, sus eficiencias son aún bajas y sus costos elevados con respecto a las plantas de generación convencionales la hacen poco competitiva actualmente. Por otra parte, las tecnologías fototérmicas o de concentración solar, han demostrado tener eficiencias mayores que los sistemas fotovoltaicos y en el escalamiento adecuado pueden llegar a ser competitivas frente a las tecnologías convencionales [Kolb *et al.*, 2000].

Existen cuatro tipos de sistemas de concentración solar para la generación de potencia eléctrica, calor de procesos y producción de hidrógeno:

- a. Los sistemas de **enfoque puntual tipo Torre Central**, los cuales utilizan grandes campos de reflectores denominados helióstatos que siguen el movimiento aparente del Sol para reorientar los rayos y concentrar la radiación en un receptor colocado en la parte superior de una torre (ver figura 1.1a).
 - b. Los sistemas de **enfoque puntual que utilizan platos o discos parabólicos**, para concentrar la radiación en un receptor de cavidad, el cual se encuentra acoplado a un motor Stirling conectado a un generador para producir directamente la electricidad (ver figura 1.1b). Estos equipos son muy eficientes, pero en la actualidad sus costos y mantenimiento son muy elevados, lo que los hace poco competitivos frente a otras tecnologías. Por otra parte, en estos mismos equipos se pueden sustituir los motores Stirling por reactores químicos y pueden ser empleados para la generación de combustibles solares [William y Richard, 1994].
 - c. Los sistemas de **enfoque lineal que concentran la radiación solar en tubos** colocados a lo largo de la línea focal del canal parabólico. En el receptor se produce vapor, empleado en la generación de electricidad a gran escala o bien para calor de procesos. Actualmente estos sistemas son los más instalados y con mayor experiencia en operación [Zarza *et al.*, 2004]. Se puede esperar que este tipo de tecnología tenga un futuro muy prometedor (ver figura 1.1c).
 - d. Los sistemas **concentradores de reflexión tipo Fresnel**, donde las superficies están colocadas de tal manera que reflejan individualmente la radiación sobre el receptor. Su gran ventaja radica en su facilidad de construcción, siendo muy interesante su utilización en colectores solares de gran potencia y alta temperatura. (ver figura 1.1d).
-

En el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la Universidad Nacional Autónoma de México se realiza investigación básica, aplicada y desarrollo tecnológico en la generación, conversión, almacenamiento y utilización de la energía, en particular de las fuentes renovables. De manera más específica la Coordinación de Concentración Solar (CCS) tiene como misión hacer investigación aplicada y desarrollo tecnológico de sistemas de concentración solar.

En la CCS, se construyó para fines de investigación y desarrollo tecnológico un Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Altamente Concentrados denominado DEFRAC. Este dispositivo es un concentrador solar de foco puntual con 18 espejos montados sobre una estructura ecuatorial, la cual tiene su eje de giro paralelo al eje de rotación de la Tierra. Ajustando un segundo plano a la declinación del día le permite el seguimiento del movimiento aparente del Sol. Este concentrador produce una imagen de aproximadamente 2 cm de diámetro del disco solar en un receptor plano [Estrada, *et al.*, 1995]. Se han realizado las caracterizaciones dinámica y óptica [Grajeda *et al.*, 1997; Quiñones *et al.*, 1997] así como la térmica [Estrada *et al.*, 1998] del DEFRAC. La figura 1.2 muestra un esquema general donde se señalan las partes importantes del concentrador, así como la ubicación de cada uno de los grupos de espejos.



Figura 1.1. Diferentes tipos de sistemas de concentración solar operando de manera experimental en la Plataforma Solar de Almería (PSA), a) Sistemas de Torre Central (CESA), b) Sistemas Dish Stirling, c) Sistemas de Enfoque Lineal (DISS) y d) Sistema de concentración tipo Fresnel.

En concentradores solares de foco puntual es frecuente el uso de receptores solares con forma de cavidades. La energía concentrada se absorbe en la pared interior de dichas cavidades y se transfiere a algún fluido térmico. Con esto se trata de reducir al máximo las pérdidas de calor y maximizar la eficiencia térmica de los sistemas.

En el diseño de los receptores solares, se requiere de un conocimiento adecuado de los procesos de transferencia de calor que ocurre en los mismos, así como una correcta evaluación de la potencia solar concentrada [Ulmer *et al.*, 2002] que llega a ellos y su distribución espacial. Sólo si las distribuciones de flujo radiativo en la región focal y en la superficie del absorbedor son conocidas, el receptor puede ser optimizado para tener una eficiencia adecuada. Hay que mencionar que los picos de densidad de flujo generan puntos calientes sobre la superficie de los receptores produciendo la aparición de esfuerzos térmicos y el posible daño de los mismos. Por esta razón es sumamente importante evaluar de una manera precisa la densidad de radiación concentrada que incide en el receptor y su distribución sobre el mismo.

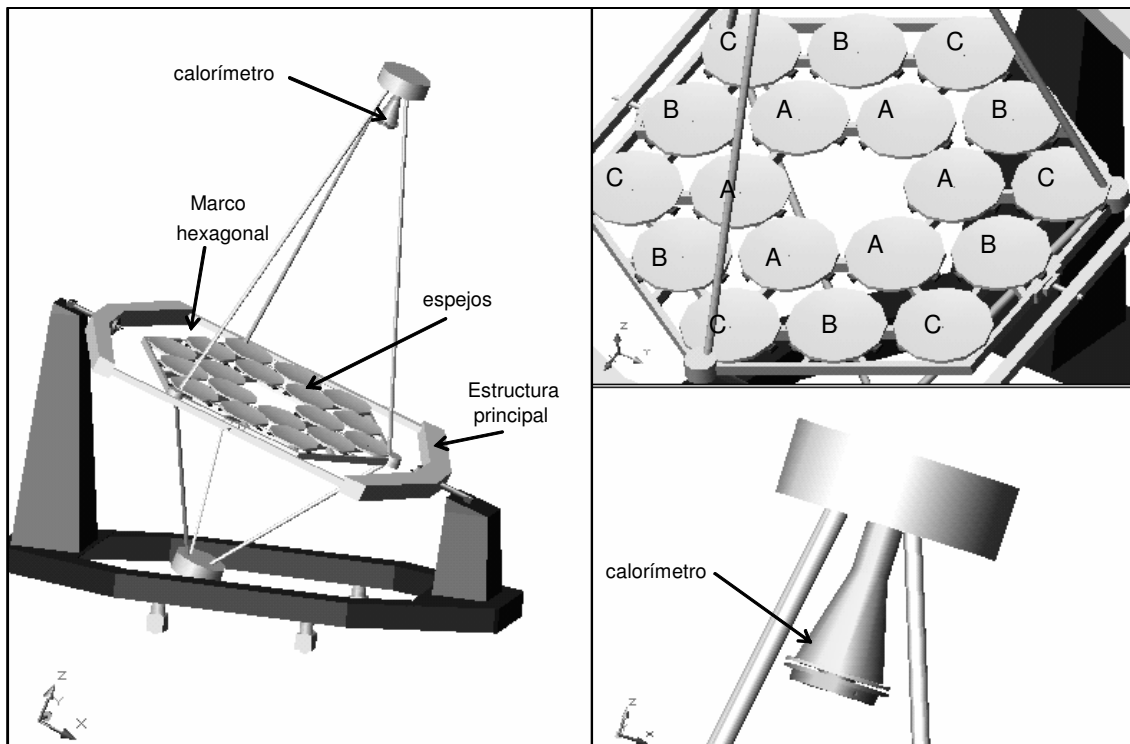


Figura 1.2. Vista esquemática del DEFRAC donde se muestra la distribución de los grupos de espejos.

1.3 Métodos convencionales para medición de radiación solar altamente concentrada

La eficiencia térmica de un receptor se evalúa como la razón de la potencia térmica de salida entre la potencia radiativa entrante en el sistema [Caraso y Becker, 1990].

La potencia incidente en la abertura del receptor se obtiene a través de la integración del flujo radiativo en función del área de la superficie del receptor. Así la medición del flujo radiativo incidente es esencial para obtener dicha eficiencia. Básicamente hay dos métodos de medición para evaluar la cantidad de energía que llega al receptor. El método directo [Ballestrín, 2002] y el método indirecto [Ballestrín y Monterreal, 2002] se explican a continuación.

El método directo consiste en realizar la medición con calorímetros o radiómetros, los cuales proporcionan la densidad de radiación concentrada incidente en el área determinada por el propio dispositivo. Para poder hacer la medición en toda el área del receptor con estos instrumentos, simplemente se colocan varios de ellos en puntos relevantes; o simplemente se hacen pasar a través de diferentes puntos del receptor para conocer la distribución espacial del flujo radiativo incidente [Ballestrín, 2002].

El segundo método, el indirecto, consiste en hacer pasar una superficie blanca altamente difusa, llamado plano lambertiano, enfrente de la abertura del receptor. Se busca que la radiación concentrada sea reflejada isótopamente y esta es posteriormente captada mediante una cámara CCD, cuyo elemento fotodetector es un chip consistente en una matriz de microcélulas fotosensibles que detectan la intensidad de radiación que incide en cada una de ellas. Esto permite capturar un conjunto de imágenes de la mancha solar que se forma en el plano lambertiano en movimiento [Ballestrín y Monterreal, 2002]. Cabe señalar que la calibración de la cámara CCD se efectúa usando un radiómetro como referencia para convertir los niveles de grises, los cuales implican la intensidad de la radiación detectada, en valores de densidad de flujo radiativo [Neumann *et al.*, 1996].

Este tipo de métodos indirectos tienen varias ventajas con respecto a los primeros, a saber, tienen una mayor resolución espacial, el tiempo de adquisición de datos es menor, y se usan componentes comerciales. Comparando sistemáticamente ambas mediciones se puede aumentar la confianza en la estimación de la distribución de flujo radiativo y el cálculo de la potencia incidente [Ballestrín y Monterreal, 2002].

Los radiómetros comerciales más usados son medidores de flujo radiativo circulares llamados HyCal o tipo Gardon, los cuales son fabricados por la empresa norteamericana llamada Batlle [Gardon, 1963]. En la actualidad son los únicos disponibles en el mercado para medir flujo radiativo con niveles por encima de 1000 kWm^{-2} . Sin embargo el uso de estos instrumentos para medir el flujo solar concentrado introduce errores sistemáticos debidos, entre otras cosas, a que la composición espectral de la radiación solar es distinta a la radiación de cuerpo negro con el cual fueron calibrados. Para estos sensores se ha estimado que el valor del flujo radiativo medido está sobrestimado hasta un 27% para el caso donde se emplea como superficie absorbidora grafito coloidal y en un 3% para el caso donde se emplea la pintura comercial Zynolyte [Ballestrín *et al.*, 2003].

Por otra parte, en el CIE - UNAM se ha usado la técnica de calorimetría de agua fría con un calorímetro de placa plana. Con este dispositivo se determinó la potencia total concentrada por el DEFRAC. Sin embargo, se observaron dificultades en la determinación de las pérdidas radiativas por la falta de conocimiento de las propiedades opto-térmicas de la superficie a la temperatura de operación (emitancia / absortancia) [Acosta *et al*, 2001], lo mismo que ocurre con los radiómetros HyCal. Por lo que surgió la necesidad de desarrollar un nuevo calorímetro el cual sirviera para evaluar la potencia total concentrada del DEFRAC teniendo independencia de las propiedades opto-térmicas de emitancia / absortancia, para reducir las pérdidas térmicas.

Basándose en los estudios de la eficiencia de absorción de una cavidad cónica para un flujo concentrado [Steinfeld *et al.*, 1992] en el análisis de su emitancia aparente en función de sus parámetros geométricos como son el ángulo de abertura del cono, su longitud y las dimensiones del baffle [Heinisch *et al.*, 1973], y haciendo una optimización de dichos parámetros.

CAVICAL resolvió el problema de la incertidumbre relacionado con las propiedades opto-térmicas del calorímetro anterior y permitió determinar con menor incertidumbre la potencia radiativa concentrada por el DEFRAC [Pérez-Rábago *et al.*, 2006].

Las mediciones realizadas con el dispositivo se llevan a cabo a través del balance de energía en el agua de refrigeración, a través de la técnica de calorimetría de agua fría. Por otra parte, el dispositivo debe ser caracterizado en su distribución de temperatura para ser empleado también como radiómetro. Este dispositivo por sus características de cavidad debe reducir la incertidumbre de la absortancia de la superficie y además que sus propiedades opto-térmicas dependan básicamente de su geometría. Se busca que el nuevo instrumento sea versátil y se pueda emplear tanto en sistemas de Torre Central donde las áreas de captación son muy grandes como en sistemas del tipo Plato/Stirling donde las áreas de aceptación son pequeñas.

Para comprender mejor las características que debe cumplir un dispositivo como las mencionadas anteriormente, a continuación se presenta una revisión del estado del arte de los principales dispositivos empleados para realizar mediciones de densidad de flujo radiativo concentrado.

1.4 Dispositivos para medición de radiación solar altamente concentrada

Los dispositivos para medir radiación altamente concentrada de manera directa, se pueden clasificar por el modo como realizan la medición y la manera en como son calibrados, en tres grupos principales:

- a) *Calorímetros*: este tipo de dispositivos evalúan la densidad de flujo concentrado incidente en un área determinada mediante el balance entre la
-

potencia absorbida por el agua de refrigeración y la radiación incidente en el dispositivo. Para ello, se requiere reducir las incertidumbres en las mediciones directas tanto del flujo másico, así como en la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del flujo de refrigeración. Para realizar la medición, es muy importante conocer las propiedades de absorción del dispositivo, así como hacer una buena estimación de las pérdidas térmicas hacia los alrededores.

- b) *Radiómetros*: son sensores que evalúan la densidad de flujo radiativo concentrado, a través de la medida de un transductor que registra el incremento de temperatura en una zona definida del sensor, que puede ser un termopar o una termopila, o bien la intensidad luminosa en una zona del instrumento a través de un foto-sensor. Este tipo de instrumentos requieren de una calibración previa, así como un sistema de refrigeración que le permite resistir a los altos flujos radiativos sin dañarse.
- c) *Radiómetros-Calorímetros*: Son sensores con los que se pueden medir de cualquiera de las dos formas anteriores; incluso se puede emplear la calorimetría para calibrar la respuesta radiométrica, lo que le da una gran versatilidad.

A continuación se presentan los principales instrumentos de medición de altos flujos radiativos existentes tanto comerciales como experimentales, clasificados en los tres grupos antes mencionados dependiendo de la manera en la que se realiza la medición.

Calorímetros

El método de calorimetría de agua fría consiste en determinar la potencia radiativa concentrada a partir de un balance de energía, de la radiación incidente absorbida, la energía transferida al fluido de refrigeración y las pérdidas térmicas hacia los alrededores. En esta técnica se supone que la temperatura del receptor expuesto a la radiación solar y al medio ambiente, es aproximadamente igual a la temperatura del medio ambiente y es próxima a la temperatura de cielo, entonces es razonable suponer que las pérdidas por convección y radiación son despreciables. En tal caso, el calor absorbido por el instrumento es igual al calor extraído por el fluido de refrigeración ($\dot{Q}_c$), el cual es calculado midiendo el flujo másico $\dot{m}$ y la diferencia de las temperaturas del fluido entre la entrada T_e y la salida T_s , esto es:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}C_p(T_s - T_e) \quad (1.1)$$

donde C_p es la capacidad calorífica a presión constante del fluido de refrigeración. Así, con base en un balance de energía entre la cantidad de calor que sale del sistema por el fluido y la cantidad de calor absorbida por el sistema αQ_{in} se puede describir mediante

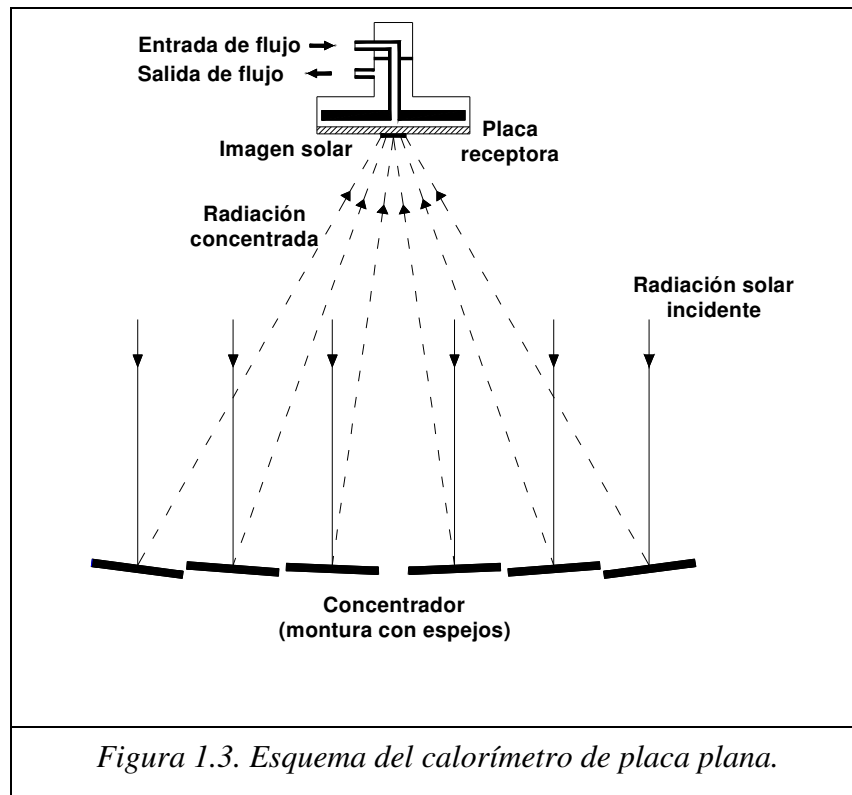
$$\dot{Q}_c = \alpha \cdot \dot{Q}_{in} \quad (1.2)$$

donde α es la absorptancia de la superficie extendida o bien la aparente cuando se trata de una cavidad. Por lo tanto, conociendo α y $\dot{Q}_c$ se puede determinar $\dot{Q}_{in}$. Por otra parte, es claro que la fracción de la potencia $\dot{Q}_{in}$ que no es absorbida por el calorímetro, es reflejado al exterior.

Los dispositivos que se presentan a continuación fueron desarrollados como parte de la instrumentación para la medición del flujo radiativo concentrado, y son empleados exclusivamente para este propósito.

Calorímetro de placa plana:

El calorímetro de placa plana, desarrollado por la CCS del CIE-UNAM, actúa como receptor de la radiación solar concentrada. La energía que incide es absorbida por la superficie de la placa y transferida por conducción hacia el interior, y de allí, donde es transferida al el agua de refrigeración por convección forzada. La energía absorbida se evalúa a través de la técnica de calorimetría de agua fría.



La técnica de calorimetría de agua fría que se ha considerado con el calorímetro de placa plana. Sin embargo, también se ha demostrado, a partir de estudios teóricos y

experimentales, que la superficie de la placa receptora alcanza temperaturas hasta 470 °C en el centro, a pesar de manejar flujos másicos relativamente altos (1.1 kg min^{-1}) y tener incrementos de temperatura en el agua de refrigeración pequeños ($\sim 5^\circ \text{C}$) [Jaramillo *et al.*, 2007]. Al determinar que las pérdidas convectivas y radiativas, resultan ser por encima del 7%, y con ello determinar la incertidumbre en la medición. Se planteo diseñar un nuevo calorímetro de cavidad, para reducir las pérdidas y mantener un mejor control en la emitancia del dispositivo.

Calorímetro de cavidad cónica:

El calorímetro de cavidad cónica denominado CAVICAL fue desarrollado bajo la dirección del Dr. Estrada y investigaciones reporta en la tesis de maestría de Carlos Alberto Pérez Rábago [Pérez-Rábago, 2003]. El objetivo de dicho trabajo fue diseñar y construir un dispositivo para determinar la potencia total concentrada por el DEFRAC, y evaluar sus propiedades ópticas y térmicas. En la medición se empleó la técnica de calorimétrica de agua fría.

Para diseñar el dispositivo se realizó un análisis teórico de la eficiencia de absorción del receptor (η_{ab}) en función del área de abertura de la cavidad y con ello se determinó el radio óptimo de la abertura (R_a). Por otra parte, se realizó un análisis de la emitancia aparente de la cavidad ε_{ap} en función de los parámetros geométricos, como el ángulo de abertura de cono (ω) y la relación de la abertura de la cavidad (ξ) con la finalidad de obtener la máxima absortancia aparente (α_{ap}). Por último, se realizó una simulación de la propagación de radiación en el interior de la cavidad a través de la técnica de trazado de rayos para conocer cual sería la distribución de flujo radiativo incidente en la cavidad [Pérez-Rábago, 2003].

La figura 1.4 muestra un esquema de CAVICAL con las principales partes que lo componen, las cuales son: cuerpo principal, cono receptor con una tapadera o bafle con abertura central, difusor de agua y cámara receptora del fluido de refrigeración.

En la tabla 1.1 se presentan los parámetros de CAVICAL, los cuales fueron determinados en su diseño y durante la primera prueba experimental del dispositivo en el concentrador de foco puntual DEFRAC.

Con base en los resultados obtenidos con el calorímetro se puede concluir que éste podría recibir una potencia concentrada incluso mucho mayor que la que produce DEFRAC. Esto debido a que la cavidad produce una distribución de temperaturas relativamente homogénea con diferencia de no más de 30 °C en diferentes puntos. En los primeros experimentos con CAVICAL la eficiencia de absorción fue de 96.3% con una absortancia aparente de 99.0 %. Estos resultados muestran que es posible utilizar CAVICAL además de instrumento de medición como un dispositivo receptor-intercambiador en sistemas de concentración. Sin embargo, debido al tiempo de respuesta prolongado de 45 segundos por su inercia térmica, es poco atractivo para ser empleado como un dispositivo de medición en sistemas de concentración.

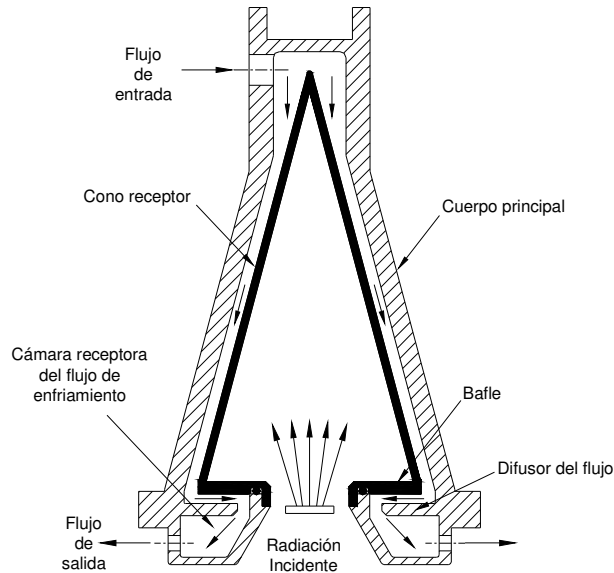


Figura 1.4. Esquema de las principales partes que conforman a CAVICAL.

Tabla 1.1. Parámetros de CAVICAL

Parámetros	
Potencia medida con el instrumento	0.3 a 2.0 kW
Error en la medición de la potencia concentrada	< 3%
Tipo de abertura	Fija
Calibración	No requiere
Material de la cavidad	Cobre
Ángulo del cono	30° (optimizado para el DEFRAC)
Diámetro de la base del receptor	85.6 mm
Relación de baffle	0.65
Diámetro de abertura del calorímetro	Ø 32.4 mm
Área de la abertura	$8.244 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Emitancia aparente	0.99
Eficacia de absorción	0.96
Dimensiones del calorímetro	Ø 147 mm, L 250 mm
Masa	6.5 kg aprox.
Flujo másico de refrigeración	8.3×10^{-3} a $2.5 \times 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$
Tiempo de respuesta	15 a 45 seg.

SunCatch:

SunCatch fue desarrollado por el grupo de investigación del Centro Aeroespacial Alemán DLR (por sus siglas en Alemán, *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) para la caracterización del Horno Solar de Colonia. El calorímetro SunCatch consiste en una cavidad cónica, la cual actúa como receptor de la radiación concentrada. La cavidad se aproxima a un cuerpo negro, donde casi toda la energía radiativa que entra queda atrapada. La radiación incidente entra a la cavidad a través del área de la abertura A_{ab} , donde es absorbida a través de la pared, y esta energía a su vez es

extraída por el agua de refrigeración que circula a través de un serpentín alrededor de las paredes del receptor (ver figura 1.5) [Groer y Neumann,1999].

El calorímetro cuenta con un diafragma refrigerado que lo protege de la radiación incidente aislándolo térmicamente y dejando pasar la radiación solamente a través de la abertura A_{ab} . La medición de la potencia se hace a través de la técnica de calorimetría de agua fría, descrita anteriormente. La densidad promedio del flujo radiativo concentrado ϕ_{sun} , que entra a través de la abertura del calorímetro, se define simplemente como:

$$\phi_{sun} = \frac{\dot{Q}_{sun}}{A_{ab}} \quad (1.3)$$

La medición de la potencia absorbida por el calorímetro Q_{sun} se calcula a partir de la energía absorbida por el fluido, considerando las pérdidas que SunCatch tiene hacia el medio.

A pesar de que CAVICAL fue desarrollado sin tener conocimiento de la existencia de SunCatch y tomando en cuenta que ambos dispositivos tienen propósitos diferentes, por su geometría y la técnica de medición que emplean, ambos dispositivos tienen entre sí muchas similitudes que se analizan a continuación. En la tabla 1.2 se presenta un análisis comparativo entre las características de ambos dispositivos.

Si bien la utilización de cavidades en instrumentos calorimétricos, es conseguir cierta independencia de las propiedades opto-térmicas de la absorción mediante características geométricas, estos dispositivos tienen el inconveniente de lo complejo de su instrumentación como es medición del caudal, sensores de presión y temperatura y los dispositivos periféricos para refrigeración.

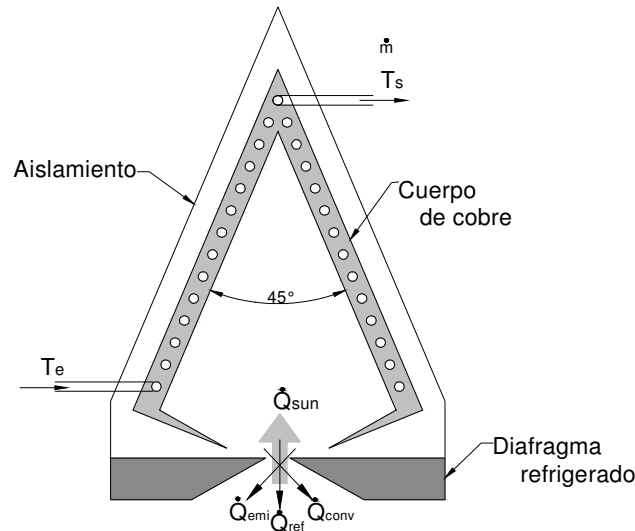


Figura 1.5. Esquema del calorímetro del SunCatch [Groer y Neumann,1999]

Tabla 1.2. Comparativa entre los calorímetros SunCatch y CAVICAL

Parámetros	SUNCATCH	CAVICAL
Equipo a evaluar	HS del DLR	DEFAC
Objetivo	Medición de densidad de flujo concentrado por el HS	Medición de la potencia total concentrada por el DEFAC
Potencia a medir	> 1.0 kW	0.3 a 1.2 kW
Error en la medición	$\leq 1\%$	$\leq 3\%$
Tipo de abertura	Intercambiable (diafragma)	Fija
Calibración	No requiere	No requiere
Material	Cobre	Cobre
Ángulo del cono	45°	30° (optimizado)
Diámetro de abertura del calorímetro	20.0 mm ($3.142 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)	32.4 mm ($8.244 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)
Diámetro de abertura del diafragma	9.9 mm ($0.77 \times 10^{-4} \text{ m}^2$)	--
Ángulo de aceptación	--	45 °
Dimensiones	Ø 220 mm, L 240 mm	Ø 147 mm, L 250 mm
Masa	10 kg aprox.	6.5 kg aprox.
Flujo de refrigeración del agua	0.3 a 1.2 l/min	0.5 a 1.5 l/min
Tiempo de respuesta	75 s	45 s

El diafragma de SunCatch elimina toda la radiación que puede alterar la medición. En su momento CAVICAL no presentaba un implemento en su cara frontal que le permitiera evitar la sobrestimación en la medición.

Al comparar estos dispositivos se concluye que la precisión y exactitud en la medición depende en gran medida, de qué tan correcta sea la instrumentación, la medición del caudal y la medición de la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del agua de refrigeración.

Por último cabe señalar que el tiempo de respuesta de ambos dispositivos es demasiado grande para condiciones en las cuales estos dispositivos operan como son los sistemas de concentración solar (ver tabla 1.2).

ASTERIX

Un grupo de investigación del *Center Nacional de la Recherche Scientifique* (con sus siglas en francés CNRS-IMP) en el Horno Solar de Odeillo, en Francia, desarrolló un calorímetro para medir altos flujos de radiación solar concentrados en 1996. A este dispositivo lo llamaron ASTERIX, que por sus siglas en inglés significa (Tecnología Avanzada para la Estimación de la Radiación Solar de manera más precisa). El objetivo del diseño y la construcción de este dispositivo fue contar con un instrumento fácil de operar, que permitiera hacer mediciones de altos flujo concentrados en áreas pequeñas menor que 10 mm^2 y por tiempos prolongados por arriba de 1 horas. Las características del instrumento son:

1. Área pequeña de medición (3 mm diámetro), que permite hacer mapeos en diferentes puntos de la mancha solar concentrada.
2. Instrumento que no requiera de una calibración en otro contexto distinto al solar, en otras palabras requiere ser un instrumento que no emplea de un patrón para su calibración.
3. Medición de altos flujos radiativos durante tiempos prolongados (horas).

4. Facilidad en la manipulación y operación.
5. Ángulo de aceptación de 80° , suficiente para casi todos los sistemas de concentración solar existentes.
6. Baja incertidumbre menor que 1.0%.

ASTERIX es un calorímetro de cavidad cilíndrica, con abertura es absorbida $\alpha_{ap} = 0.9998$ y refrigerado con agua que circula alrededor de la cavidad. El calorímetro cuenta con dos circuitos de refrigeración independientes: el primero protege y aísla a la cavidad de la radiación que incide en las paredes exteriores (de la misma forma que SunCatch) y el segundo refrigera únicamente a la cavidad que absorbe la radiación entrante. La potencia absorbida por el instrumento se mide de manera calorimétrica con el agua de refrigeración que circula alrededor de las paredes de la cavidad (ver figura 1.6) [Ferrier y Rivoire, 2000]. Este instrumento se emplea como patrón para la calibración de otros calorímetros-radiómetros.

En la tabla 1.3 se comparan las características de CAVICAL y AXTERIX.

El hecho de que la cavidad sea pequeña, permite tener un menor tiempo de respuesta, así como una mayor movilidad del dispositivo. Al igual que en el caso del SunCatch, la precisión del dispositivo dependerá principalmente de la medición del caudal y del incremento de temperatura. Sin embargo, el incremento de temperatura es demasiado pequeño por lo que requiere ser amplificación lo que resulta en errores sistemáticos de la medición.

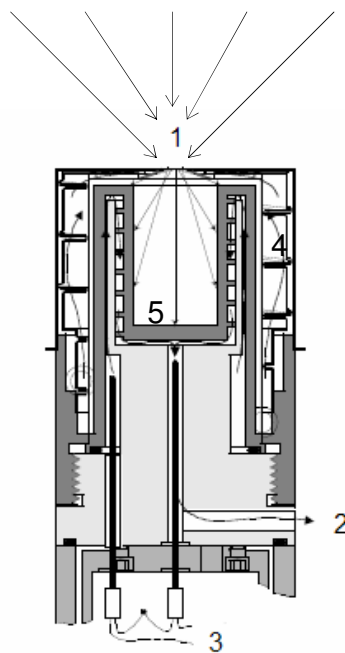


Figura 1.6. Esquema del calorímetro ASTERIX: 1 Abertura del calorímetro, 2 Salida del flujo de refrigeración, 3 Amplificación y medición del ΔT_{h2o} , 4 Diafragma, 5 Cavidad [Ferrier y Rivoire, 2000].

Al igual que SunCatch se utiliza un diafragma refrigerado para aislar al instrumento de medición del resto de la radiación incidente.

Tabla 1.3. Comparativa entre los calorímetros ASTERIX y CAVICAL

Parámetros	ASTERIX	CAVICAL
Equipo a evaluar	HS del Odeillo, Francia	DEFRAC
Objetivo	Medición de densidad de flujo concentrado por el HS	Medición de la potencia total concentrada por el DEFRAC
Máxima densidad de flujo	20 000 kW m ⁻²	4000 kW m ⁻²
Error en la medición	≤ 1.5 a 7.0 %	≤ 3%
Tipo de cavidad	Cilíndrica con diafragma	Cónica con bafle
Aislamiento	Diafragma refrigerado	--
Calibración	No requiere	No requiere
Material	Cobre	Cobre
Absortancia aparente	0.9998 (teórico)	0.98 (teórico)
Diámetro de abertura del calorímetro	3 mm (7.07 x 10 ⁻⁶ m ²) limitado por diafragma	32.4 mm (8.244 x 10 ⁻⁴ m ²)
Ángulo de aceptación	81 °	45 °
Dimensiones	Ø 16 mm, L 32 mm	Ø 147 mm, L 250 mm
Masa	0.6 kg aprox.	6.5 kg aprox.
Flujo de refrigeración del agua	0.06 a 0.3 l/min	0.5 a 1.5 l/min
Tiempo de respuesta	Menor que un segundo	45 s

Radiómetros

De los radiómetros que se presentan a continuación, si bien el primero fue desarrollado para aplicaciones distintas a la medición de la energía solar concentrada es ampliamente utilizado actualmente.

Radiómetro HyCal o tipo Gardon

El sensor fue desarrollado por Gardon en 1953 [Gardon, 1953] para medir directamente altos flujo radiativos. El instrumento tiene las ventajas de tener una construcción relativamente simple y un tamaño pequeño, y por tanto, su tiempo de respuesta relativamente bajo menor que 1.0 segundo. Este tipo de instrumentos, desde su creación hasta la fecha, han sido empleados en muy diversas aplicaciones como metalurgia, aplicaciones en cohetes de propulsión y su actual aplicación en sistemas de concentración solar.

El sensor consiste en un cilindro de cobre con una cavidad anular interior que permite la refrigeración del mismo, consiguiendo de esta forma, una temperatura uniforme en el cuerpo del sensor (ver figura 1.7). En la superficie del instrumento, se encuentra un disco delgado de constantan, que tiene una superficie con un alto índice de absorción ($\alpha = 0.95$). Entre el centro del disco y la unión con el cuerpo del sensor se conectan dos hilos delgados de cobre, a través de los cuales se mide un potencial eléctrico por efecto Seebeck (ΔV) producto del diferencial de temperatura de estos dos puntos.

Vatlle es la única compañía que manufactura y calibra estos calorímetros, los cuales cuentan con una exactitud del $\pm 3\%$ y una repetitividad del $\pm 1\%$.

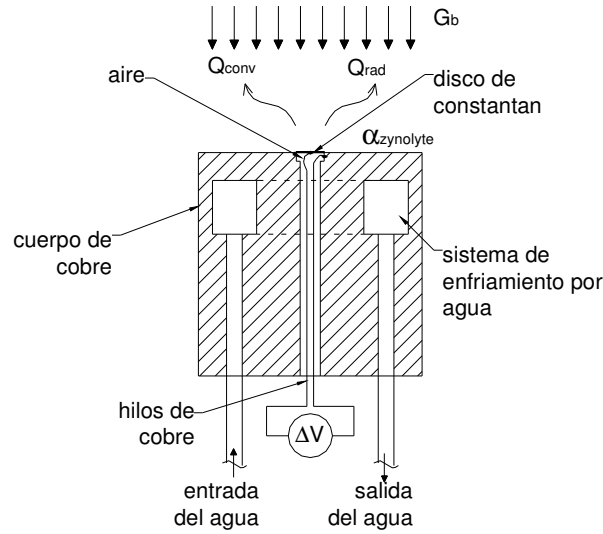


Figura 1.7. Esquema del radiómetro HyCal.

En su trabajo original Gardon (1953) desprecia el espesor del disco de constantan δ_{co} , pues es muy delgado comparado con el radio del disco R_{co} , y supone que la conducción tiene lugar solamente en la dirección radial, del centro a la periferia. Además considera que el sistema de refrigeración mantiene una temperatura uniforme T_o en todo el cuerpo de cobre, como se muestra en la figura 1.8. La energía radiativa que incide en la superficie del sensor (G_b) es absorbida ($G_b\alpha$) por la superficie.

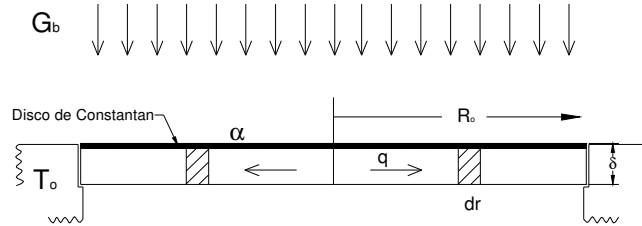


Figura 1.8. Simplificación del disco de constantan del Gardon para el modelo unidimensional [Gardon et al., 1953].

La conducción se puede expresar a través de la componente radial de la ecuación de conducción en coordenadas cilíndricas en estado permanente:

$$-\frac{G_b\alpha}{\delta k_{co}} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (1.4)$$

La solución a la ecuación 1.4 es de la frontera:

$$\Delta T = (G_b \alpha) \frac{R_{co}^2 - r^2}{4k_{co} \delta} \quad (1.5)$$

La solución del modelo de Gardon establece una relación de ΔT en términos de la FEM generada por efecto Seebeck ΔV y las dimensiones del radio R_o y espesor δ del disco de constantan, tal que:

$$\frac{\Delta V}{G_b \alpha} = 4.374 \times 10^{-4} \frac{R^2}{\delta} \left[\frac{mV}{kW/m^2} \right] \quad (1.6)$$

En el dispositivo de Gardon se establece comúnmente una FEM de 10 mV como ΔV y con base en la relación 1.6 se define la radiación incidente que se desea medir y las dimensiones del disco de constantan.

Con lo anterior se puede concluir que a pesar de ser un dispositivo robusto, de fácil operación y con un tiempo de respuesta pequeño, existe una gran dependencia de las propiedades ópticas de la superficie en la medición, lo que obliga a que el instrumento requiera de una calibración, la cual se hace fuera del contexto de medición, introduciendo un error sistemático en la medición [Ballestrín *et al.*, 2003].

Foto-Sensor con Esfera Integradora

Los investigadores del grupo del CNRS-IMP del Horno Solar en Odeillo Francia, en el 2000, dos años después de haber desarrollado el calorímetro ASTERIX, diseñaron y construyeron un nuevo instrumento de medición de altos flujos concentrados (20,000 kW m⁻²). Las dos principales características que perseguían en este nuevo dispositivo eran: que tuviera un rápido tiempo de respuesta menor 1.0 segundo y una alta sensibilidad para poder medir áreas muy pequeñas (0.5 mm de diámetro). Por estas razones, emplearon un transductor, que para este caso fue un foto-sensor, el cual presenta una sensibilidad mayor que la que se tener a través de una medición calorimétrica [Ferrier y Rivoire ,2002].

El componente principal de este instrumento es una esfera integradora, que actúa como receptor de la radiación solar concentrada. La esfera integradora consiste en una cavidad esférica con paredes difusas de alta reflectividad. La radiación entra a través de una pequeña abertura de diámetro d_a incidiendo en la superficie de primer impacto S_f . La cavidad cuenta con una segunda abertura d_m a través de la cual el foto-sensor registra la radiación reflejada en la superficie 2. Es importante garantizar que le área de la superficie 2 sea distinta a la superficie de primer impacto, para no saturar al sensor (ver figura 1.9).

Las paredes de la esfera integradora son refrigeradas con agua, esto permite realizar mediciones durante tiempos muy prolongados, y debido al tamaño pequeño del sensor, de aproximadamente 10 mm diámetro, resulta muy fácil de operar.

Aunque este es un instrumento muy pequeño y tiene un buen tiempo de respuesta, la precisión que se obtiene con el foto-sensor y la esfera integradora es relativamente baja $\pm 5.0 \%$ en comparación con los calorímetros. Es importante indicar que otra desventaja de este dispositivo es su manufactura ya que requiere de una esfera.

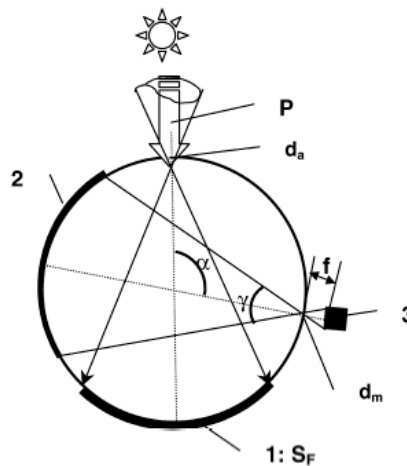


Figura 1.9. Esquema del radiómetro esférico, las partes importantes del sensor son: 1) es el área de primer contacto, 2) es el área de medición, 3) foto-sensor y d_a es el diámetro de la abertura al sensor.

Radiómetro-Calorímetro

Radiómetro Kendall

Kendall diseñó y construyó en 1981 un radiómetro para medir flujos concentrados mayores que 10,000 soles (10000 kW m^{-2}), el cual tiene una precisión alta, con un incertidumbre menor que el 1%. Este instrumento se desarrolló en el Instituto de Pasadena para la Agencia Aeroespacial de los Estados Unidos (NASA). El radiómetro es enfriado por agua y tiene un tamaño relativamente pequeño (50 mm diámetro y 100 mm de longitud), la precisión en la medición depende del área de la abertura, de la absorción aparente de la cavidad y la precisión en la medición de las termopilas [Kendall, 1981]. El ángulo de aceptación del instrumento es de 120° y su tiempo de respuesta es del orden de los 2 segundos (ver figura 1.10).

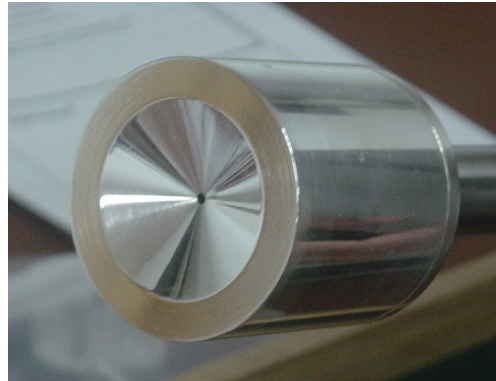


Figura 1.10. Fotografía del radiómetro Kendall.

El radiómetro cuenta con una fuente térmica integrada a su cavidad, que le permite su auto calibración sin radiación incidente. Lamentablemente no existe información reportada en la literatura ya que este dispositivo cuenta con derechos de autor.

Como se ha mostrado hasta ahora, existen actualmente diferentes dispositivos para medir la radiación solar concentrada. Bajo la Tarea III del programa SolarPaces, de la Agencia Internacional de Energía (AIE), se creó en 1998 el grupo de medición de flujo y temperatura (Grupo F&T). Este grupo de investigadores realizó en 1999 una comparación entre los principales tipos de instrumentos de medición de radiación concentrada. Considero HyCal, SunCatch y Kendall. En esta campaña se observó que el radiómetro Kendall y el calorímetro SunCatch mostraron una buena concordancia en sus mediciones con una precisión de 0.4%, mientras que los radiómetros HyCal presentaron mucha disparidad en sus resultados, con una precisión que va desde el 3% hasta el 13%. Se consideró que esto podría deberse a la forma de calibración de los instrumentos [Kaluza y Neumann, 2001]. Por otra parte, cabe mencionar que los tiempos de respuesta del calorímetro SunCatch, debido a su gran tamaño, resultaron ser un orden de magnitud mayor que los radiómetros HyCal.

Una vez que se han revisado cada uno de los dispositivos, se ha considerado, como algo muy valioso, el emplear la técnica de calorimetría de agua fría para realizar este tipo de mediciones, debido a que aporta gran certeza en la medición, sin requerir otro instrumento similar como patrón de calibración. Sin embargo, las dificultades que se presentan en la instrumentación, la cantidad de equipo empleado para realizar la medición y el gran número de variables que entran en juego y que se propagan en la incertidumbre de la medición hacen poco atractivos a los calorímetros para ser usados de manera habitual como dispositivos de medición. Por otro lado, a pesar de que los radiómetros son muy prácticos en su operación, tienen propiedades opto-térmicas de sus superficies muy difíciles de controlar durante su operación y al ser dependientes de una calibración los hacen poco atractivos. Por esta razón se plantea la alternativa de diseñar un dispositivo, el cual funcione como radiómetro, pero cuya calibración se realice a través de la técnica de calorimetría de agua fría.

1.5 Objetivos

Como se menciona anteriormente, el objetivo de la investigación doctoral es diseñar, construir y caracterizar un dispositivo de medición de flujo radiativo aplicado a sistemas de concentración solar de foco puntual, como pueden ser Platos/Stirling o Torre Central. Para llevar a buen término el objetivo, se requiere realizar un estudio teórico-experimental de los procesos de transferencia de calor que ocurren en el interior del instrumento, para cuantificar las pérdidas térmicas y estimar el tiempo de respuesta del instrumento.

Debido a que el entorno donde se realizan las mediciones del flujo radiativo concentrado resulta ser de difícil acceso, dificultando la instrumentación, se requiere que el dispositivo realice la medición a través de un solo transductor y en el menor tiempo posible. Se propone la construcción de un calorímetro-radiómetro, el cual opere de manera radiométrica y se calibre calorimétricamente.

Los objetivos particulares son:

1. Realizar un análisis tanto teórico como experimental del radiómetro HyCal y del calorímetro CAVICAL, para tener un conocimiento más amplio de ambas maneras de realizar mediciones, y con ello poder integrar las dos técnicas en un solo instrumento.
2. Calcular teóricamente la emitancia aparente de la cavidad, la distribución de flujo radiativo incidente y la transferencia de calor en el calorímetro. Esto permitirá definir los parámetros para el diseño de la cavidad y las condiciones de operación.
3. Realizar el diseño con base en los parámetros optimizados de la modelación tanto térmica como óptica de la cavidad receptora, así como de las consideraciones de diseño para la medición de la densidad radiativa concentrada.
4. Instrumentar y poner en operación el calorímetro. Realizar experimentaciones y caracterizarlo.

En el siguiente capítulo se describen algunos estudios teóricos y experimentales de los dos principales dispositivos de medición de flujo radiativo altamente concentrado: el radiómetro HyCal, el cual es el más utilizado para esta aplicación y el calorímetro de cavidad cónica desarrollado en el Centro de Investigaciones en Energía de la UNAM (CAVICAL). La finalidad del siguiente capítulo es entender la fenomenología que ocurre en estos dispositivos y con ello conocer los parámetros más importantes a ser considerados en un nuevo diseño.

Capítulo 2

Estudios preliminares para el diseño del calorímetro - radiómetro

Para profundizar en la comprensión de la fenomenología que tiene lugar en los dispositivos de medición de alto flujo radiativo, en el capítulo anterior se realizó una revisión bibliográfica sobre los dispositivos que operan como calorímetros, los radiómetros y los que operan de ambas maneras [Groer y Neumann, 1999; Ferrier y Rivoire, 2000; Gardon, 1953]. Cabe mencionar, que además de la revisión se presentó un análisis comparativo entre cada uno de los dispositivos, en especial los calorímetros y el calorímetro de cavidad cónica (CAVICAL). Sin embargo, la información encontrada en la literatura resultó insuficiente para tomar decisiones, en el diseño del nuevo calorímetro, ya que en la mayoría de los casos se concibe al dispositivo como calorímetro o radiómetro pero solo en un caso [Kendall, 1981] como una combinación de ambos. Por tal motivo, como trabajo preliminar de la tesis, se estudió la manera cómo operan térmicamente algunos de los dispositivos de medición de flujo radiativo. En este análisis se determinaron los parámetros que deben ser considerados para integrar en el mismo dispositivo la certeza de la medición calorimétrica y la flexibilidad de la medición radiométrica. Dicho análisis se basó en el funcionamiento de CAVICAL, así como en un estudio detallado de la operación del radiómetro HyCal.

Para el análisis de la operación de CAVICAL se realizó una modelación de la transferencia de calor en el dispositivo, donde se encontró la correlación entre el flujo radiativo incidente y la distribución de temperatura en la pared del cono receptor. Por otra parte, con este mismo dispositivo se realizó una nueva serie de experimentos, denominados Campaña Experimental, llevados a cabo en el Horno Solar de la Plataforma Solar de Almería (HS-PSA) con la finalidad de encontrar la función de correlación entre los incrementos o saltos de temperatura y el flujo radiativo incidente en la pared interior de la cavidad.

Al considerar que el radiómetro HyCal es el más utilizado comercialmente para la medición del flujo radiativo altamente concentrado, se consideró importante analizar la operación de este dispositivo. En estos estudios se buscó un procedimiento alternativo de calibración a través del balance energético de la potencia absorbida por el agua de refrigeración, además, de igual manera que con CAVICAL, se desarrolló un modelo de la transferencia de calor en la superficie del dispositivo para evaluar las pérdidas térmicas en distintas condiciones de operación, tanto en el entorno de la calibración, como en las condiciones reales de operación para posteriormente estimar la incertidumbre en la medición producto de las diferencias entre ambos casos.

2.1 El calorímetro de cavidad cónica

A continuación se presenta el análisis de la transferencia de calor que ocurre en CAVICAL a través de una modelación matemática, la cual tiene como propósito evaluar la correlación entre el flujo radiativo incidente y la distribución de temperaturas en el interior de la pared del cono receptor, así como la cuantificación de las pérdidas térmicas. Lo anterior con la idea de determinar la eficiencia térmica del dispositivo como se definió en el capítulo anterior.

Por otra parte, se presentan los resultados de la caracterización de CAVICAL realizada en el HS-PSA. Con la Campaña Experimental se buscó la función de correlación entre la densidad de radiación que incide a través de la abertura y los saltos de temperatura que se producen en la pared del cono receptor.

2.1.1 Transferencia de calor en CAVICAL

En pruebas experimentales previas de CAVICAL en el DEFRAC [Pérez-Rábago, 2003], se encontró de manera cualitativa la relación entre las distribuciones de temperatura y la radiación incidente que entra a la cavidad. En dicho trabajo se encontró que la distribución de temperatura depende principalmente de la manera en como se distribuye la radiación incidente en la pared del cono receptor. Para diseñar un nuevo dispositivo a partir de la arquitectura lograda con CAVICAL se requirió conocer los mecanismos de transferencia de calor de tal dispositivo. Para ello se continuó con el trabajo previo [Pérez-Rábago, 2003], realizando una modelación matemática de la transferencia de calor en el interior de la cavidad, considerando el aire confinado y la transferencia de calor por convección forzada entre la pared y el agua de refrigeración. Con dicho modelo se cuantificaron las pérdidas térmicas del dispositivo. Este modelo fue desarrollado utilizando FLUENT que es un código comercial de mecánica de fluidos CFD (por sus siglas en inglés de *Computational Fluid Dynamics*) basado en un método de volumen finito. Las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía fueron resueltas de manera simultánea para los dos fluidos que intervienen en el problema: el agua que fluye en el interior del calorímetro y el aire confinado en la cavidad del cono receptor. Así mismo se consideraron las ecuaciones de difusión de calor para la

pared del receptor (cobre) y el cuerpo del calorímetro (acero inoxidable), considerando a ésta como una frontera adiabática [Pérez-Rábago *et al.* 2006].

La figura 2.1 muestra un esquema donde se indican las condiciones a la frontera que fueron consideradas para la modelación del calorímetro. Se indica la dirección del flujo de agua de refrigeración que circula de la base del cono hacia el vértice y que sale de manera lateral a través de un tubo colocado en la parte superior. Por otra parte, la temperatura, presión y caudal del agua la entrada del calorímetro se consideran en condiciones permanentes mientras que las propiedades físicas como densidad, viscosidad y conductividad térmica se calculan en función de las temperaturas locales, siendo discretizadas en cada nodo de la geometría. Debido a que durante la operación del calorímetro no se produjeron cambio de fase y las diferencias de temperatura entre la entrada y la salida no resultaron mayores que 20 °C, se resolvieron las ecuaciones del modelo a través de una aproximación de Boussinesq, la cual simplifica la resolución del problema [Pérez-Rábago *et al.* 2006].

Por otra parte, las paredes del cuerpo exterior del calorímetro, su cara frontal, así como el sistema de sujeción, se suponen adiabáticas, por lo tanto, se consideró la energía radiativa incidente como la única transferencia de calor del dispositivo. Para la modelación de la transferencia de calor del aire dentro de la cavidad, se consideró éste volumen en contacto con un volumen extendido al exterior, el cual es aproximadamente 100 veces mayor que el volumen de la cavidad. Ambos volúmenes se comunican a través de la abertura del propio dispositivo como se muestra en la figura 2.1. Cabe señalar que la transferencia de calor que ocurre entre la pared y el aire es por convección natural.

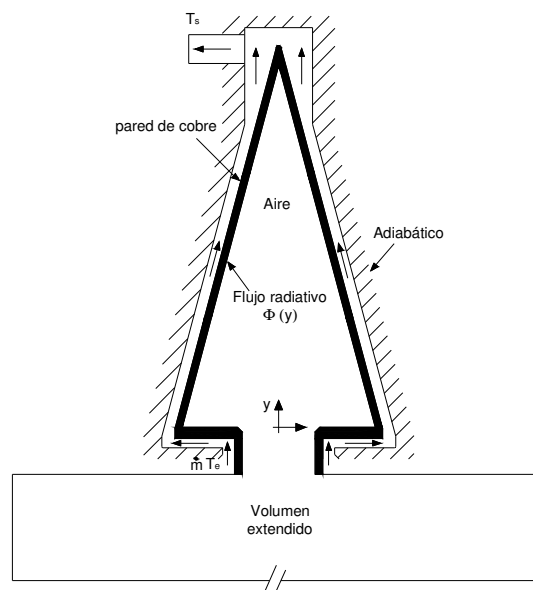


Figura 2.1: Esquema de las condiciones a la frontera para el calorímetro CAVICAL y el dominio del aire atmosférico.

La distribución de flujo radiativo incidente en la pared interior del receptor se determina a través del análisis con trazado de rayos empleando el software comercial CIRCE [Romero, 1994]. Para este análisis se consideraron dos estudios de caso, el primero considerando la concentración con el grupo de espejos central del DEFRAC (A) y en el segundo caso con todos los espejos (T). Estas distribuciones de radiación se consideran como la distribución de potencia que llega a la abertura y que posteriormente se redistribuye en la pared del cono receptor. Las condiciones iniciales de la modelación de estos dos casos se muestran en la tabla 2.1. La figura 2.2 muestra la distribución de flujo radiativo sobre la pared interior del cono receptor. En esta misma figura el eje ordenado corresponde al eje y indicado en la figura 2.1.

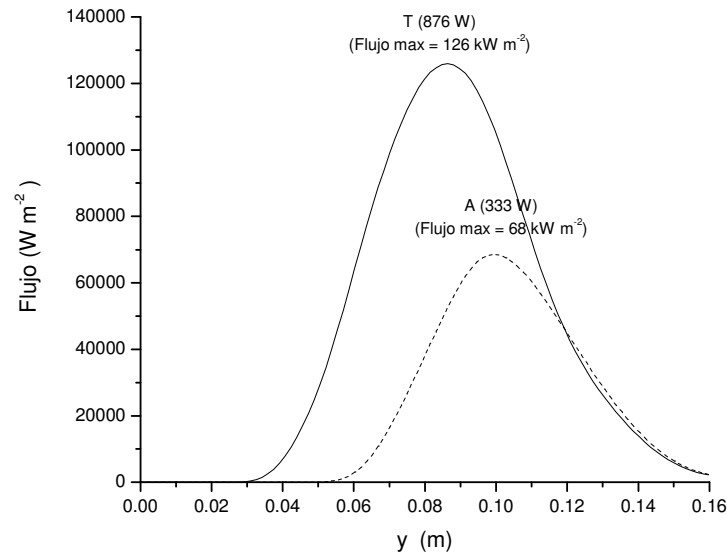


Figura 2.2: Distribución de flujo radiativo. Casos A y T, se muestra la distribución de la potencia incidente en la pared del receptor.

Tabla 2.1: Condiciones iniciales para la modelación.

Parámetros	Caso	
	A	T
Radiación solar incidente, G_b (W m^{-2})	938	824
Potencia incidente, Q_{in} (W)	348	958
Flujo másico $\dot{m}$ (kg s^{-1})	9.33×10^{-3}	9.83×10^{-3}
Temperatura del agua de entrada, T_e (C)	26.6	26.1

El calorímetro fue modelado con el método de volumen finito donde se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes de forma simultánea para la condición de estado permanente. La figura 2.3 muestra la solución de la distribución de temperaturas calculada para el caso T. En esta figura se muestra el mapa de temperaturas tanto en la pared del receptor, el agua de refrigeración y el aire confinado en la cavidad. Es importante mencionar que dentro de la cámara de aire de la cavidad, se observan tres fenómenos que resulta importante ser tomados en cuenta: el

primero, existe un equilibrio térmico entre el aire y las pared en la zona del vértice, lo que produce una estratificación de la temperatura, la segunda zona donde existe un calentamiento del aire por la pared es el punto medio, debido a que es en esta zona donde se obtiene el máximo de radiación incidente, y por último, en la base del cono se observa que el aire calienta las paredes, lo que provoca la formación de celdas convectivas en el interior de la cavidad.

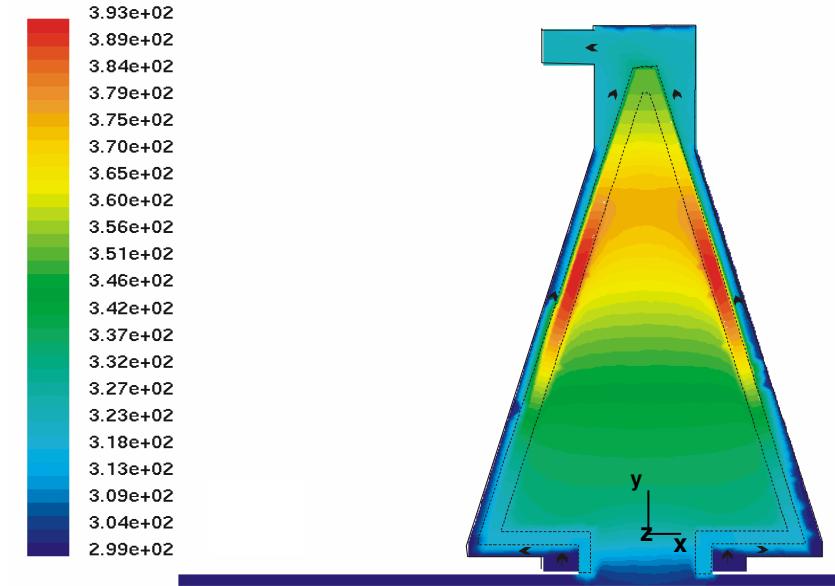


Figura 2.3: Esquema de un corte transversal de CAVICAL, donde se muestra la distribución de temperaturas en su interior en grados K para una concentración con todos los espejos.

Para la validación del modelo teórico, se comparan los resultados experimentales de la distribución de temperatura medida en la pared del receptor, para el experimento A, y la distribución del modelo, con las condiciones de radiación directa de 938 W m^{-2} , un flujo másico de 0.01 kg s^{-1} y la temperatura de entrada de 275.8 K (figura 2.4). Cabe señalar que en dicho experimento la potencia absorbida por el agua fue de 333 W .

Con el modelo numérico de transferencia de calor, se determinaron las zonas con mayor concentración térmica, para cada una de las diferentes condiciones de concentración a la que fue sometido el dispositivo. Es importante mencionar que por primera vez se realizó un balance de las pérdidas térmicas, tanto convectivas como conductivas, y posteriormente se llevó a cabo la evaluación de la eficiencia térmica.

Como se menciona anteriormente, el modelo fue validado a través de la comparación entre los perfiles de temperatura obtenidos experimentalmente y la

distribución de temperaturas calculada a través del modelo teórico. Las diferencias entre ambas distribuciones (teórica y experimental) fueron menores de 2 °C, como se ilustra en la figura 2.4., lo que representa una diferencia menor que 6%.

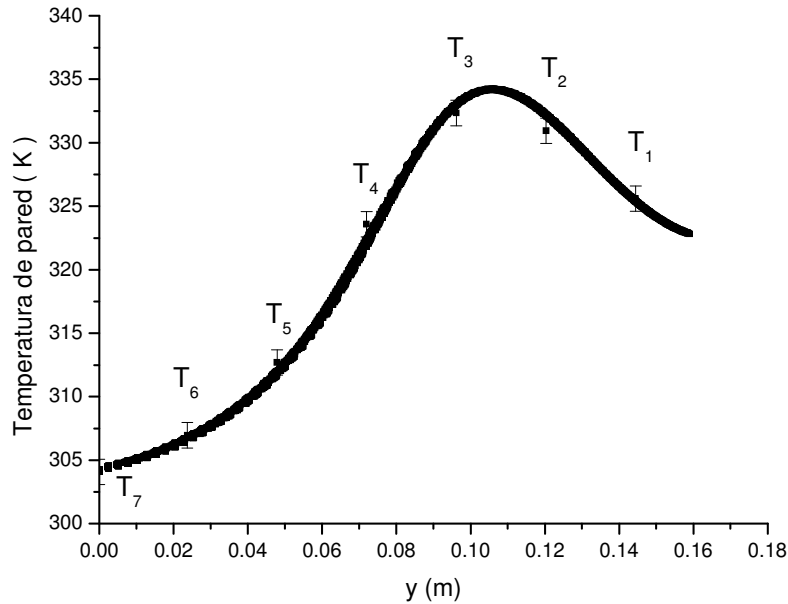


Figura 2.4: Comparativo de la distribución de temperaturas en la pared del receptor, donde se representa con la línea continúa los resultados de la simulación y los puntos con la banda de error de $\pm 1^\circ\text{C}$ representan las mediciones experimentales. Los parámetros son: $G_b = 938 \text{ W m}^{-2}$, $Q_c = 333 \text{ W}$, $m = 0.01 \text{ kg s}^{-1}$, $T_e = 275.8 \text{ K}$, $T_s = 307.3 \text{ K}$.

Por último, en la tabla 2.2 se presenta el balance de energía para cada uno de los experimentos. En cada uno de los casos se observa la evaluación de las pérdidas de la cavidad hacia el medio ambiente, así como su coeficiente convectivo. Con estos resultados se puede concluir que para el caso del DEFRAC las pérdidas térmicas no son mayores que 0.4% de la potencia incidente [Pérez-Rábago *et al.*, 2006].

Tabla 2.2: Balance teórico de energía para los cuatro casos.

Parámetros	Caso			
	A	B	C	T
Potencia incidente, $\dot{Q}_{in}$ (W)	333	327	273	876
Transferencia de potencia en el agua, $\dot{Q}_c$ (W)	332	326	271	873
Pérdidas convectivas (W)	0.72	0.72	0.76	3.38
% de pérdidas	0.22	0.22	0.27	0.39
Coeficiente convectivo de calor en la pared interior de la cavidad ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)	51.1	51.2	51.0	54.7

Por otra parte, para conocer la factibilidad de diseñar un nuevo dispositivo basado la experiencia lograda y la arquitectura de CAVICAL, se realizó una Campaña

Experimental, con la finalidad de encontrar la función de correlación de la densidad radiativa incidente y la respuesta térmica en la pared.

2.1.2 Caracterización de CAVICAL en un Horno Solar

Para la caracterización de CAVICAL, se buscó la función que correlaciona la densidad de radiación que incide a través de la abertura y los incrementos de temperatura en la pared del cono receptor. Esta experimentación se llevó a cabo en el HS-PSA. La descripción completa de los experimentos se presenta en el apéndice A1. A continuación se presentan únicamente los resultados más relevantes y sus conclusiones que dieron inicio al desarrollo del nuevo calorímetro.

Considerando las características de operación del HS-PSA y la manera como se adaptó el calorímetro en la zona focal del concentrador, se propusieron tres metodologías para la caracterización del dispositivo, buscando la correlación entre la radiación incidente en el receptor y los incrementos de temperatura en la pared del cono receptor, las cuales son:

- a) *Incremento de potencia radiativa incidente de forma gradual*: donde el centro de la abertura de CAVICAL se colocó en el punto focal del concentrador, se orientó el helióstato para tener la mancha solar en la zona focal y se inició la adquisición de datos. Las pruebas se comenzaron con el 10% de la abertura del atenuador durante un periodo de 10 minutos, garantizando que el calorímetro alcanzó el estado permanente. Posteriormente la abertura del atenuador se fue incrementando en intervalos de 10% hasta llegar al 100%.
- b) *Incremento de potencia radiativa incidente por choque*: se repitió el mismo arreglo experimental que se menciona anteriormente, pero en este caso iniciando con el 20% de la abertura del atenuador y se mantuvo así hasta lograr el estado permanente. Posteriormente se cerró completamente el atenuador, dejando que todas las temperaturas se igualaran con la temperatura de agua de refrigeración. Este procedimiento se repitió hasta llegar al 100%.
- c) *Incremento de potencia radiativa incidente por choque y captura de imágenes en CCD*: Para este caso se colocó en la parte superior del calorímetro un blanco lambertiano, el cual permitió obtener imágenes CCD de toda la mancha solar concentrada. Dichas imágenes permiten inferir la distribución de radiación concentrada en toda la imagen [Neumann, 1996]. Se repitió el mismo procedimiento del experimento del inciso anterior aunado a la captura de imágenes.

A continuación se presentan los resultados de la evaluación del calorímetro para las condiciones de un caudal de refrigeración de 5.7 l min^{-1} , el cual se mantuvo constante para todos los experimentos. Por otra parte, el área de abertura del calorímetro se delimitó por un escudo protector 5 cm de diámetro. Tal escudo es

de alúmina de 10 mm de espesor y que resulta estable por debajo de los 1600 °C. Este escudo protegía la cara del calorímetro de la radiación incidente que llegaba fuera del área de la abertura.

Resultados experimentales con incrementos de forma gradual

El experimento se realizó para 12 niveles de potencia radiativa distintos, con incrementos progresivos del 10% de la potencia concentrada. Las condiciones del experimento se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Parámetros de la experimentación.

Radiación solar incidente, G_b	783 ± 27	W m^{-2}
Caudal de refrigeración, v_{in}	5.7 ± 0.3	l min^{-1}
Presión a la entrada, P_e	6.38 ± 0.05	Bares
Reflectancias del helióstato, $\rho_{\text{helióstato}}$	0.75	
Reflectancias del concentrador, $\rho_{\text{concentrador}}$	0.91	

Para simplificar el análisis de los resultados y disminuir las incertidumbres en los resultados, se consideró que la temperatura de entrada del flujo de refrigeración (T_e) como la temperatura de referencia para todas las mediciones, usando la expresión

$$\Delta T_i = T_i - T_e \quad (2.1)$$

es decir, se mide de manera diferencial respecto al flujo de refrigeración (T_e)

La figura 2.5 muestra el comportamiento de tres diferencias de temperatura, para el mismo número de puntos de la pared del cono receptor. Dichas diferencias se correlacionaron con respecto a la densidad de radiación concentrada (Φ), la cual incidió para cada uno de los niveles de potencia. Estos tres puntos corresponden: al vértice del cono ΔT_2 , y los otros dos puntos corresponden al centro del cono ΔT_6 y ΔT_7 , como se indica en la figura 2.4. En los tres casos que se presentan, se observa un comportamiento lineal para el rango de flujo radiativo concentrado entre 50 y 2000 kW m^{-2} . Para ello, se realizó una regresión lineal para cada uno de los casos, la cual se ajusta a una ecuación de la forma:

$$\Phi = [A \pm \delta A] + [B \pm \delta B](\Delta T_i) \quad (2.2)$$

En figura 2.5 se observa como todas las mediciones quedan dentro de la banda de incertidumbre de la regresión lineal, tanto para las mediciones de incremento como decremento de la densidad radiativa incidente. En la tabla 2.4 se presenta el resumen de las tres regresiones lineales con sus respectivas bandas de incertidumbres.

En cada una de las regresiones para las diferencias de temperatura se observa que en los tres puntos la regresión pasa cerca del origen, el cero queda dentro de las bandas de incertidumbre, es decir el límite de confianza de los resultados queda dentro del origen de las regresiones. Esto se debe a la inercia térmica que el dispositivo tiene y se requiere romper para iniciar la medición. Con esto se estableció como el umbral de medición de CAVIRAD de 50 kW m^{-2} .

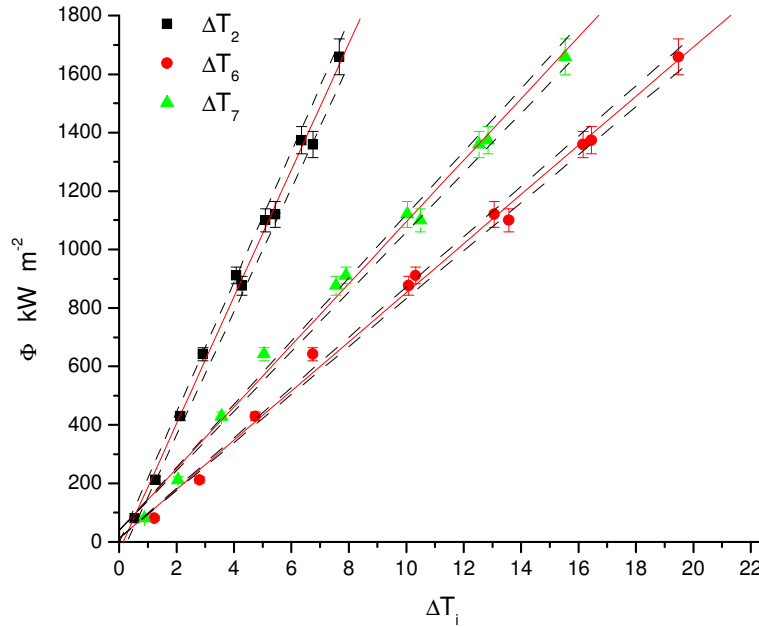


Figura 2.5: Respuesta de los ΔT_i a los incrementos de potencia.

Tabla 2.4: Parámetros de la regresión lineal para $\Phi [\text{kW m}^{-2}]$.

para	$A \pm \delta A$ kW m^{-2}	$B \pm \delta B$ $\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-1}$	R^2
ΔT_2	-30 ± 27	217 ± 6	0.997
ΔT_6	12 ± 22	84 ± 2	0.997
ΔT_7	39 ± 26	105 ± 3	0.996

Resultados experimentales con incrementos por choque

Como se indica en la metodología antes mencionada, se realizaron 5 pruebas de este tipo para diferentes niveles de densidad radiativa incidente. Se procuró que las condiciones experimentales fueran lo más parecidas a las pruebas con incrementos de potencia de forma gradual, tanto la radiación directa (G_b) como el caudal de refrigeración (v_{in}). Estas condiciones se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Parámetros de la experimentación.

Radiación solar incidente, G_b	874 ± 6	W m^{-2}
Caudal de refrigeración, v_{in}	5.5 ± 0.2	L min^{-1}
Presión a la entrada, P_e	6.47 ± 0.05	Bares
Reflectancias del helióstato, $\rho_{\text{helióstato}}$	0.75	
Reflectancias del concentrador, $\rho_{\text{concentrador}}$	0.91	

En la figura 2.6 se muestra el comportamiento de las tres diferencias de temperatura de los mismos puntos que en el experimento anterior en función de la radiación incidente en la cavidad. En esta misma figura se incluye la regresión lineal para cada uno de los ΔT_i , incluyendo su banda de error.

En la tabla 2.6 se presenta el resumen de las tres regresiones lineales con sus respectivas bandas de incertidumbre. Al igual que la prueba anterior cada una de las regresiones para las ΔT_i pasa cerca del origen, sin embargo en este caso el punto del vértice ΔT_2 se presenta muy desviado del origen.

En todos los experimentos que se realizaron con CAVICAL se observa que todas las temperaturas de la pared presentan comportamiento lineal como función de la radiación incidente, en la cavidad, dentro del rango de 50 a 2000 kW m^{-2} .

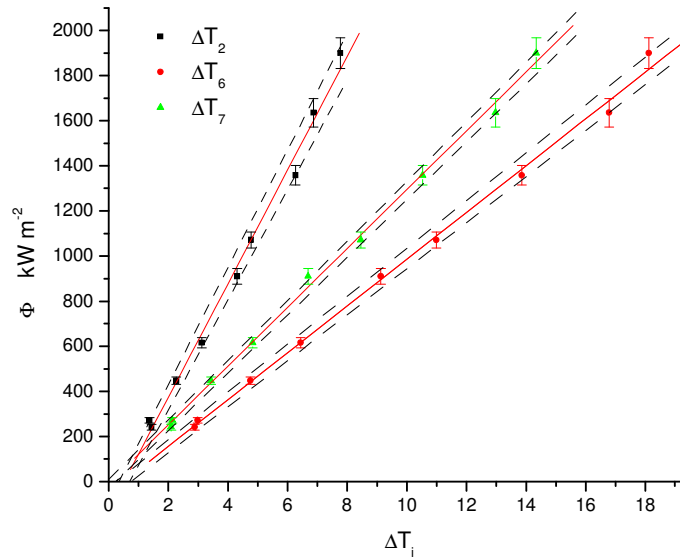
Figura 2.6: Respuesta de los ΔT_i a los incrementos de potencia.

Tabla 2.6: Parámetros de la experimentación.

	$A \pm \delta A$ kW m^{-2}	$B \pm \delta B$ $\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-1}$	R^2
ΔT_2	-130 ± 40	252 ± 8	0.999
ΔT_6	-51 ± 25	104 ± 2	0.998
ΔT_7	-10 ± 20	130 ± 2	0.996

En el análisis de las respuestas de los incrementos de temperatura frente a la densidad de radiación incidente en el calorímetro para las dos metodologías de experimentación se observaron diferencias de hasta un 19%. Esto se debió a que la inercia térmica de toda la cadena experimental del Horno (sistema de refrigeración, el aire de la zona focal) actúa como un capacitor térmico, almacenando energía que modifica la magnitud de la respuesta térmica, es decir se introduce un error sistemático en los experimentos.

Resultados experimentales con CAVICAL e imágenes CCD

En este experimento se realizaron 6 pruebas para diferentes niveles de flujo radiativo concentrado. Las condiciones experimentales de radiación directa (G_b) y caudal de refrigeración (v_{in}) fueron permanentes a lo largo del experimento. Estas condiciones se presentan en la tabla 2.7.

Tabla 2.7: Parámetros de la experimentación.

Radiación solar incidente, G_b	928 ± 8	W m^{-2}
Caudal de refrigeración, V_{in}	6.0 ± 0.1	l min^{-1}
Presión a la entrada, P_e	6.44 ± 0.07	Bares
Reflectancias del helióstato, $\rho_{\text{helióstato}}$	0.91	
Reflectancias del concentrador, $\rho_{\text{concentrador}}$	0.93	

En la figura 2.7 se muestra la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del agua de refrigeración ΔT_{agua} . Se observa que se alcanza el estado estacionario para cada una de las mediciones en menos de 1 minuto.

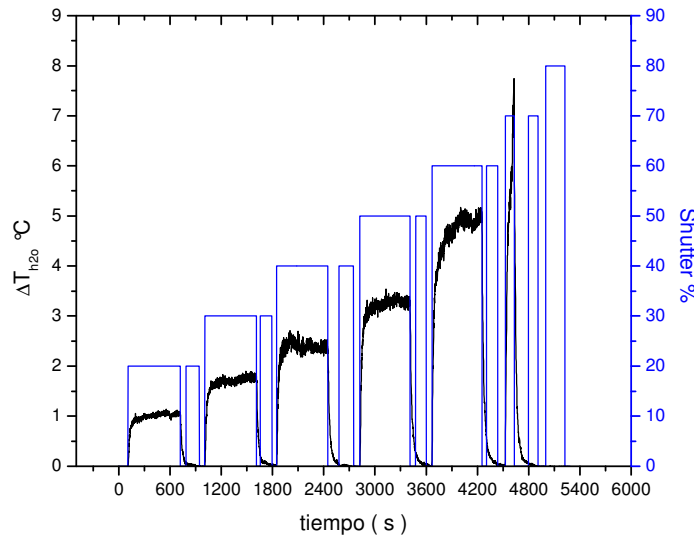


Figura 2.7: Comportamiento de las temperaturas del agua de refrigeración.

La figura 2.8 muestra el comportamiento de ΔT_i durante el experimento considerando el porcentaje de apertura del atenuador para cada prueba. En esta

grafica se observa que a partir del 40% no existe estabilidad en las temperaturas de la pared. Es importante mencionar que a partir de esta potencia el escudo protector de alumina comenzó a deteriorarse, permitiendo que la radiación concentrada incidiera en la cara del calorímetro como se observa en la figura 2.9. En esta figura se muestran las imágenes CCD tanto para el 20 como para el 60% de la abertura del atenuador.

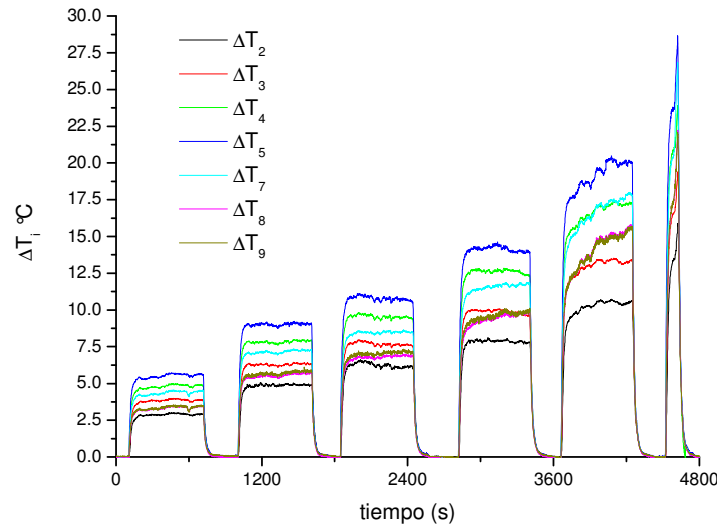


Figura 2.8: Comportamiento de ΔT_i para todo el experimento.

En la figura 2.10 se muestran las imágenes de la mancha solar concentrada que incidió tanto en el blanco lambertiano para una abertura del atenuador de un 70%, así como en la abertura de CAVICAL con la misma potencia concentrada.

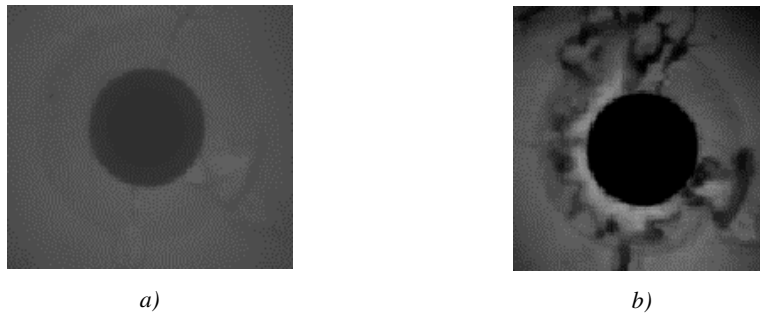


Figura 2.9: Imágenes CCD del escudo protector a) con 20% de la abertura del atenuador del HS y b) con 60 % de la abertura del atenuador del HS.

En la misma figura 2.10 se observa la distribución de radiación que incide en ambos casos del 20 al 70% de la abertura. En la tabla 2.8 se muestra el cálculo de la densidad de radiación concentrada evaluada tanto por CAVICAL como por la

metodología con el las imágenes CCD, en esta tabla se observa que la diferencia en ambas mediciones resulto ser mayor que 40%.

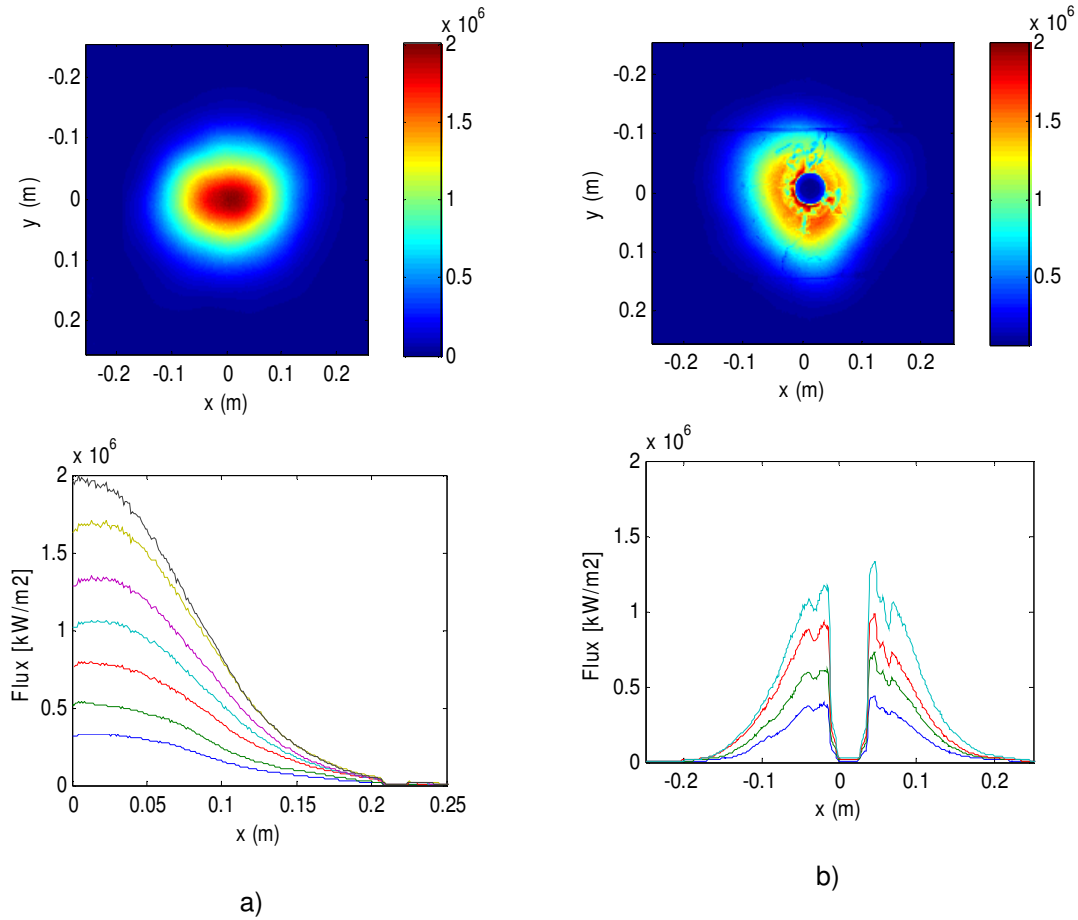


Figura 2.10: Distribución de la radiación a) con 70% de la abertura del atenuador del HS incidiendo en el blanco lambertiano y b) con 70 % de la abertura del atenuador del HS incidiendo en la abertura de CAVIRAD.

Tabla 2.8: Mediciones realizadas tanto con CAVICAL como por la técnica de imágenes CCD de la densidad de radiación concentrada.

Para	$\Phi_{CAVICAL}$ kW m^{-2}	Φ_{CCD} kW m^{-2}	Desviación con respecto a la CCD
20 %	601	333	-45 %
30 %	1011	543	-46 %
40 %	1384	806	-42 %
50 %	1901	1078	-43 %
60 %	2761	1361	-51 %
70%		1710	
80 %		2004	

Para dar una explicación de la sobrestimación de la densidad de radiación concentrada que se presentó durante la evaluación con CAVICAL, se realizó un análisis de trazado de rayos incidente, tanto en el cono interior como en el borde de la abertura del calorímetro, mediante CIRCE2 [Romero, 1994]. En la figura 2.11 se muestra la distribución de radiación para el caso en el cual el atenuador del HS se encuentra abierto completamente. Con este trazado de rayos se puede estimar la razón de potencia radiativa que llega tanto a la cara del calorímetro como al cono receptor, y con ello se evaluó la fracción de potencia absorbida por cada uno de ellos.

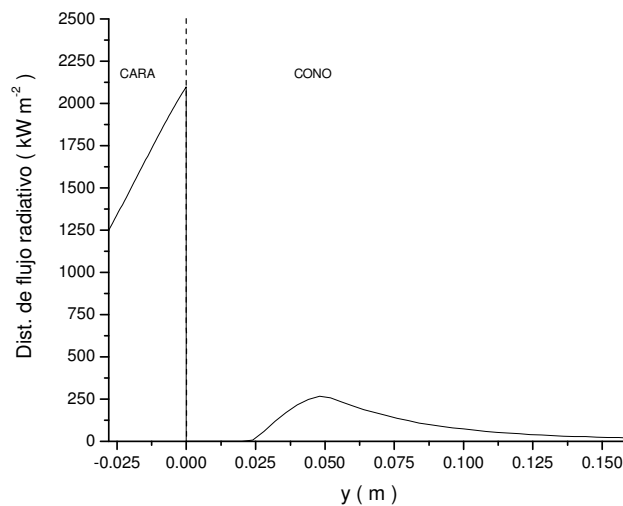


Figura 2.11: Distribución de radiación tanto en el cono de la cavidad como en la cara del calorímetro.

La tabla 2.9 muestra la cantidad de potencia radiativa que entra a través de la abertura y la potencia incidente sobre la cara del calorímetro.

Tabla 2.9: Estimación con trazados de rayos de la potencia radiativa incidente en cada prueba.

Abertura del atenuador	$Q_{in, cono}$ [W]	$Q_{in, cara}$ [W]	Q_c [W]	% Absorbido por la cara
20%	393	717	495	26 %
30%	592	1080	833	41 %
40%	797	1454	1141	43 %
50%	992	1910	1568	58 %

Comparando los resultados de la sobrestimación en la medición de CAVICAL que se muestran en la tabla 2.8, con el cálculo de la potencia absorbida por la cara del calorímetro mediante el trazado de rayos que se presenta en la tabla 2.9, se puede concluir que la mayor parte de la radiación que llegaba con un ángulo de

incidencia muy cerrado (menor a los 25°) incidió en la cara del calorímetro sobrestimando la medición hasta en un 40%.

2.2 Radiómetro HyCal

Los radiómetros HyCal son los más usados para la medición del flujo radiativo concentrado. Por ello, resulta importante estudiar a profundidad tanto el funcionamiento del dispositivo como la implementación de una metodología alternativa de calibración, a través de calorimetría. Estos radiómetros tienen varias características que los hacen particularmente atractivos para la medición de flujo radiativo solar altamente concentrado ya que son fáciles de operar, presentan un tiempo de respuesta corto y una configuración robusta que les permite operar en condiciones de alto flujo concentrado durante periodos de tiempos muy prolongados.

A continuación se presenta un procedimiento alternativo para la calibración de estos radiómetros, a través de un balance energético de la potencia absorbida por el agua de refrigeración bajo la técnica de calorimetría de agua fría.

2.2.1 Calibración calorimétrica del radiómetro HyCal

Los métodos estándar de calibración de los sensores HyCal se clasifican en dos: por transferencia y de manera absoluta. El primer método emplea un cuerpo negro, de doble abertura, como fuente radiativa. En este procedimiento se colocan tanto “el sensor a calibrar” como “el sensor patrón” en cada una de las aberturas. La pared del cuerpo negro se calienta a través de una resistencia eléctrica para conseguir una temperatura de la cavidad de manera homogénea y constante durante todo el proceso de calibración. Los rangos de temperatura que se emplean para la calibración se encuentran dentro del intervalo de 600 a 1200 K. Se fijan varias temperaturas dependiendo del número de puntos con el que se desea realizar la calibración. Por otra parte, las señales del sensor a calibrar se correlacionan directamente a las mediciones del sensor patrón. El segundo método, la calibración absoluta, conceptualmente resulta ser muy simple, consiste en emplear un cuerpo negro de una sola abertura y colocar el sensor en ésta. La irradiancia que incide en la superficie del sensor se puede evaluar conociendo la temperatura del cuerpo negro, la geometría del recinto y las emisividades superficiales tanto del cuerpo negro como de la superficie del sensor. En esta calibración no hay referencias a ningún radiómetro estándar o patrón [Murthy *et al.*, 1997]. Esta calibración es válida para los casos en los que el instrumento mide el flujo radiativo emitido por una fuente que se encuentra en un rango de emisividad similar a donde fue calibrado el sensor.

Sin embargo, el espectro radiativo de la fuente de calibración de los radiómetros (600 a 1200 K) es distinto al solar (6000 K), además, es sabido que la absortancia espectral de cualquier superficie no es constante para todo el espectro. Por esta razón se introduce un error sistemático en la medición de la radiación solar concentrada, si el instrumento se calibra de la forma como se menciono anteriormente, dependiendo del tipo de superficie utilizada: para el caso de los sensores que utilizan la pintura absorbidora Zynolyte el error sistemático resulta ser de un 3 % y en el caso de grafito coloidal hasta un 27% [Ballestrín *et al.*, 2003].

Debido a que aproximadamente el 98% del sensor HyCal es cobre, la excelente difusividad térmica de este material permite emplear al dispositivo como calorímetro, ya que en un tiempo de respuesta menor que un segundo. Por tal motivo, se considera la calorimetría como un método alternativo la calibración del dispositivo [Ballestrín *et al.*, 2004].

La figura 2.12 muestra un esquema del arreglo experimental para la calibración del sensor HyCal a través de la técnica de calorimetría. En esta figura se observa al dispositivo embebido en una caja con aislamiento térmico, el cual resiste altas temperaturas (1600 K), donde sólo se expone la cara frontal del sensor. Dicho arreglo se coloca a 36 mm frente a la fuente radiativa. Por otra parte, se instrumenta el radiómetro con dos termopares tipo “T”, colocado entre la entrada y la salida del agua de refrigeración, conectados de manera diferencial, para medir el salto térmico. Por otra parte se conecta en serie a la entrada del agua de refrigeración un medidor de flujo volumétrico de alta precisión, el cual tiene una incertidumbre de 0.25%. Por otra parte, para hacer un estimado de las pérdidas convectivas, se instrumenta la cara del sensor con un termopar tipo “T” el cual midió el incremento en la temperatura del aire que se encuentra en contacto con la cara del sensor. Por último, se midió la temperatura de la placa de grafito a través de un pirómetro colocado del lado opuesto del sensor, con la finalidad de controlar la potencia radiativa emitida por esta fuente.

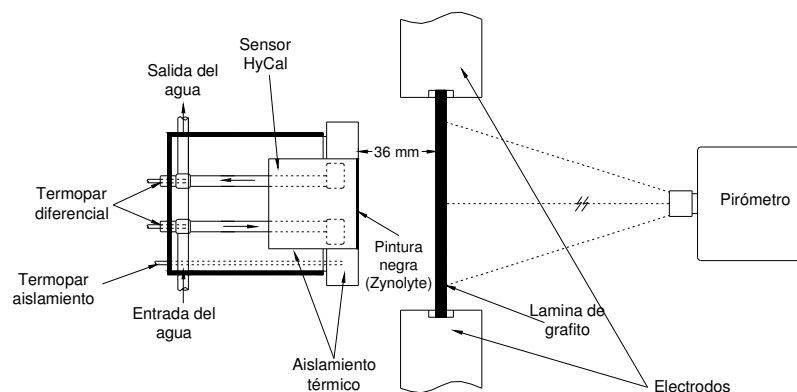


Figura 2.12: Instrumentación del sensor HyCal para su calibración a través de calorimetría.

Cuando la placa de grafito alcanza una temperatura constante, se acerca el radiómetro a una distancia de 36 mm por un periodo no mayor que 10 segundos, con la finalidad de que el sensor llegue al estado estacionario sin que el aislamiento almacenar energía. Posteriormente se retira el arreglo, se incrementa la potencia radiativa de la placa de grafito hasta alcanzar el estado permanente y se repite el procedimiento.

La figura 2.13 muestra un comparativo entre la respuesta del sensor empleando la constante de calibración hecha por el fabricante (VATTEL) y la medición realizada a través del balance térmico del agua de refrigeración (CIEMAT).

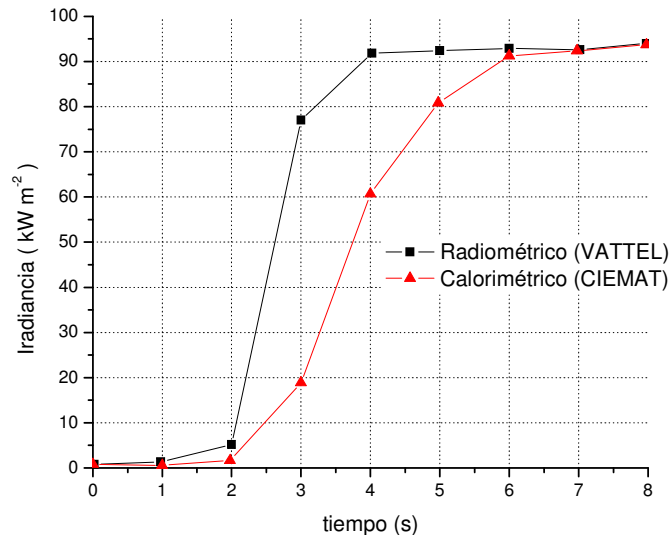


Figura 2.13: Comparación de las respuestas entre los métodos de calibración a través de un balance térmico y de manera radiométrica [Ballestrín et al., 2004].

Los resultados de esta calibración fueron consistentes con la calibración que se hace por el fabricante a través de la técnica de radiometría, tomando como referencia un cuerpo negro a 850 °C. Con esta calibración se obtuvo la constante de calibración del dispositivo con una incertidumbre menor que 1% [Ballestrín et al., 2004]. Se debe notar que en esta metodología de calibración se reduce a una tercera parte de la incertidumbre proporcionada por el propio fabricante.

Con el estudio calorimétrico del sensor HyCal se adquirió un dominio tanto de la técnica de calorimetría como del funcionamiento del transductor del dispositivo. Ambas características resultan ser fundamentales para el diseño del nuevo calorímetro-radiómetro. Sin embargo el procedimiento de calibración del dispositivo, el cual se realiza dentro de un ambiente controlado, resulta ser muy distinto al entorno donde se mide la radiación concentrada como es una torre central e incluso en un horno solar. Por esta razón se requiere extrapolar la incertidumbre del dispositivo a través de una modelación de la transferencia de calor que ocurre en la cara del dispositivo. El modelo tiene la finalidad de cuantificar las pérdidas térmicas que se pueden producir en condiciones reales de operación.

2.2.2 Modelación de la transferencia de calor del radiómetro HyCal

Las condiciones reales de operación de los radiómetros HyCal empleados para la medición de la radiación solar altamente concentrada de manera directa, son muy distintas a las que ocurren en el proceso de calibración del dispositivo. Esto se debe a que la calibración se efectúa dentro de un laboratorio con condiciones controladas de: temperatura, humedad, caudal de refrigeración y sin corrientes de aire (velocidad del aire frente al radiómetro $\varpi = 0 \text{ km h}^{-1}$). Por otra parte, la medición del flujo solar concentrado se efectúa, casi siempre, a la intemperie, a una altura de varias decenas de metros, donde existen ráfagas de viento. Además, resulta muy complicado controlar el caudal de refrigeración del dispositivo, el cual fluctúa entre 1 y 4 l min⁻¹, sin olvidar las variaciones de la temperatura ambiente. Para hacer un análisis de cómo repercuten cada uno de estos parámetros en la medición final, tanto por separado cómo en conjunto, se realizó una modelación, de la transferencia de calor en el dispositivo, donde el modelo reprodujo tanto las condiciones de calibración como las de operación en la medición de radiación solar concentrada.

Los parámetros tomados en cuenta para la modelación fueron: caudal y temperatura del agua de refrigeración, temperatura atmosférica y velocidad del viento frente al sensor. Este modelo fue desarrollado con FLUENT. Las ecuaciones de masa, momento y energía fueron resueltas de manera simultánea para los dos fluidos que intervienen en el problema como son el flujo de agua de refrigeración y el aire confinado en el volumen extendido frente a la cara del sensor. Las ecuaciones de difusión de calor fueron aplicadas tanto para el cuerpo del dispositivo que es de cobre como para el disco de constantan [Pérez-Rábago *et al.*, 2005].

Para realizar la modelación se seleccionaron las dimensiones del dispositivo más estándar, las cuales corresponden al sensor HyCal de una pulgada de diámetro (2.52 cm) con un rango de medición de 0 a 1200 kW m⁻². El cual tiene una resolución de 0 a 10 mV y la constante de calibración típica de este dispositivo es $\Gamma = 113 \pm 3 \text{ kW m}^{-2}\text{mV}^{-1}$. Por otra parte, la absortancia de la superficie para este dispositivo se considero de 95% para el espectro solar [Ballestrin *et al.*, 2004].

En la figura 2.14.a se muestra un esquema del problema, en el cual se observa que el sensor, aislado en su periferia, fue colocado de manera horizontal frente a un volumen extendido. El volumen extendido simula la atmósfera frente a la cara del dispositivo y se consideró 500 veces mayor que el volumen del sensor. El flujo radiativo incide perpendicular a la cara del receptor donde se absorbe por la superficie y se conduce a través del disco de constantan y el cuerpo de cobre, hasta que es extraída por convección forzada por el agua de refrigeración. El volumen extendido permite al modelo cerrar las ecuaciones de la transferencia de calor entre el radiómetro y la atmósfera. De esta manera, el volumen de aire es suficientemente grande para no exista ninguna interferencia en el desarrollo de las capas límite.

Cabe señalar que a pesar que el diámetro del disco de constantan es de unos cuantos milímetros, el enmallado fue tan pequeño y se utilizaron 2×10^5 nodos para garantizar una adecuada resolución en esta zona, como se observa en la figura 2.14.b.

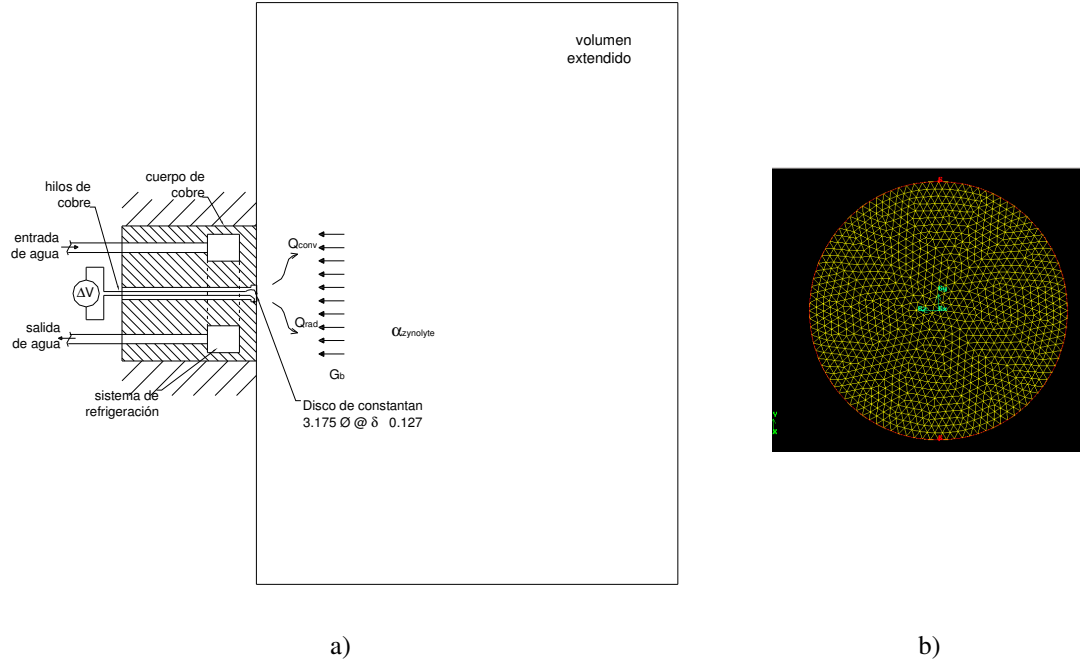


Figura 2.14: a) Esquema de la vista lateral de la sección cerrada del dominio extendido del aire frente al sensor y b) Vista frontal del enmallado del disco de constantan.

La figura 2.15 muestra la solución numérica de la distribución de temperaturas evaluada para el radiómetro HyCal y el volumen extendido. En esta figura se muestra el mapa de temperaturas tanto del radiómetro, el agua de refrigeración y el aire confinado en el volumen extendido. En esta figura se observa la formación de la capa límite frente a la cara del sensor, así como la distribución de temperaturas en el disco de constantan.

Para la validación del modelo numérico, se estableció un caso con condiciones de operación típicas, las cuales son: radiación incidente (1039 Kw m^{-2}), temperatura a la entrada del agua ($T_{in} = 300 \text{ K}$), temperatura atmósfera ($T_a = 300\text{K}$), caudal de refrigeración ($v = 1.5 \text{ l min}^{-1}$) y velocidad del viento frente al sensor ($\varpi = 1 \text{ km h}^{-1}$). En la figura 2.16 se presenta la distribución de temperaturas en la superficie del sensor, expuesta a la radiación altamente concentrada, donde se distingue la zona del disco de constantan, en la cual se produce una distribución parabólica. La diferencia de temperaturas entre el centro y la periferia es $\Delta T_{co} = 233 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el salto de temperatura esperado para la misma potencia radiativa es de $\Delta T_{co} = 214 \text{ }^{\circ}\text{C}$, donde la diferencia entre el modelo y la medición calibrada es del 8.8%. Este resultado se puede considerar adecuado como una primera aproximación.

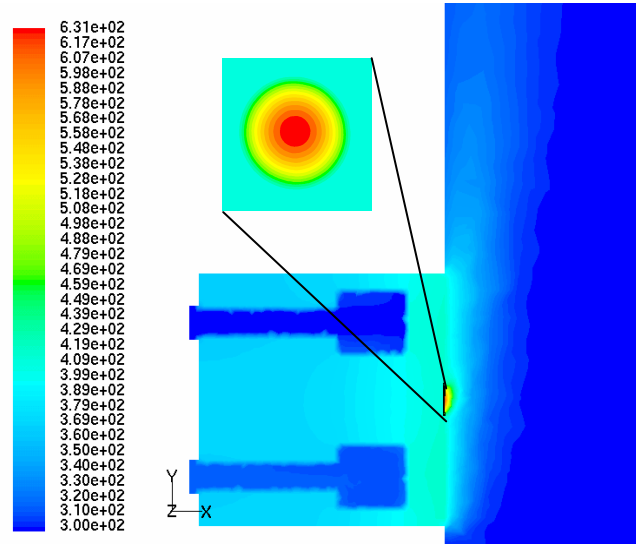


Figura 2.15: Vista de la sección transversal de la distribución de temperatura tanto en el HyCal como en el aire que se encuentra próximo a este. En el recuadro se muestra la distribución de temperatura para el disco de constantan.

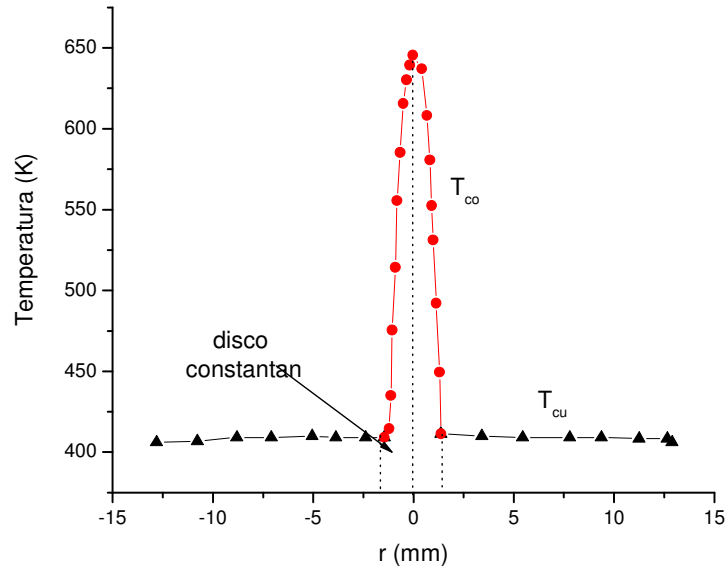


Figura 2.16: Distribución de temperatura en la superficie del HyCal

Posteriormente para continuar con la validación del modelo, se establecen los parámetros similares a las condiciones de calibración del dispositivo, los cuales son: temperatura a la entrada del agua ($T_{in} = 300$ K), temperatura atmósfera ($T_a = 300$ K), caudal de refrigeración ($\dot{v} = 1.5$ l min⁻¹) y velocidad del viento frente al sensor ($\varpi = 1$ km h⁻¹), y se hace variar la potencia radiativa absorbida ($\alpha\Phi$) de 69

a 1039 kW m^{-2} . De esta modelación se prestó atención a la diferencia de temperaturas (ΔT_{co}) que se produce entre el centro y la periferia del disco de constantan. Este incremento de temperatura se correlaciona con la FEM (ΔV_{co}) producida por el termopar diferencial tipo T. En la figura 2.17 se muestra la relación entre la potencia absorbida ($\alpha\Phi$) por la cara del radiómetro y la respuesta ΔV_{co} . Con los puntos obtenidos de la modelación se realizó un ajuste lineal de la forma

$$\alpha\Phi = [\Theta \pm \delta\Theta] + [\Gamma \pm \delta\Gamma](\Delta V_{co}) \quad (2.3)$$

donde Θ es la ordenada al origen, que para este caso resultó ser cero y Γ es la pendiente de la recta de los datos en la modelación. En la tabla 2.11 se muestra el comparativo entre la pendiente de la regresión lineal y la constante de calibración del instrumento.

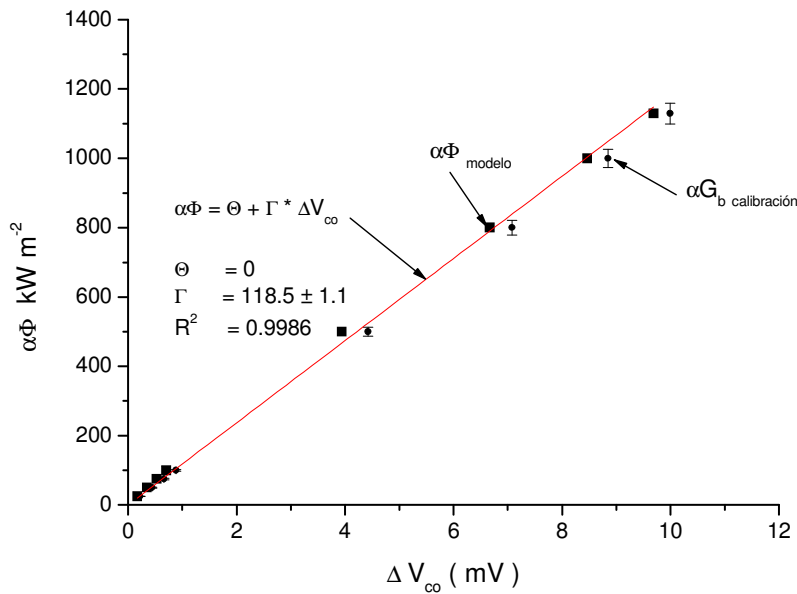


Figura 2.17: Potencia incidente vs ΔV_{co} . (▼) Datos con base en la calibración experimental (■) Datos con base en la modelación numérica

Tabla 2.11: Comparativo entre la constante de calibración y la regresión lineal de la modelación.

	$\Theta \pm \delta\Theta$ $\text{kW m}^{-2}\text{m}$	$\Gamma \pm \delta\Gamma$ $\text{kW m}^{-2}\text{mV}^{-1}$	R^2
Modelo	0	118.5 ± 1.1	0.999
Calibración	0	113.0 ± 3.0	1.000

Fueron aplicadas las pruebas estadísticas F y T entre el resultado de la regresión lineal de la modelación y la constante de calibración del instrumento, donde no se encontró diferencia significativa entre ambas pendientes (para un nivel de certidumbre del 95 %) [Box, 1991]. Con estas pruebas se validó el modelo

numérico para el rango de 69 a 1039 kW m⁻². Por otra parte, se realizó una cuantificación de las pérdidas térmicas que se producen en la cara del sensor para el rango de potencia radiativa. En la figura 2.18 se presenta la distribución de las pérdidas convectivas Q_{conv} , radiativas Q_{rad} y totales Q_{total} , así como el porcentaje de estas pérdidas frente a la potencia total absorbida. En esta figura se observa que las pérdidas convectivas representan el 80% de las pérdidas totales dentro del rango de calibración (de 69 a 100 kW m⁻²), sin embargo para el rango de operación (de 800 a 1039 kW m⁻²) las pérdidas radiativas adquieren importancia hasta llegar a representar un 45% de las pérdidas totales. Con esta modelación se puede concluir que las pérdidas térmicas contribuyen de 1 a 1.4% en el error sistemático de la medición.

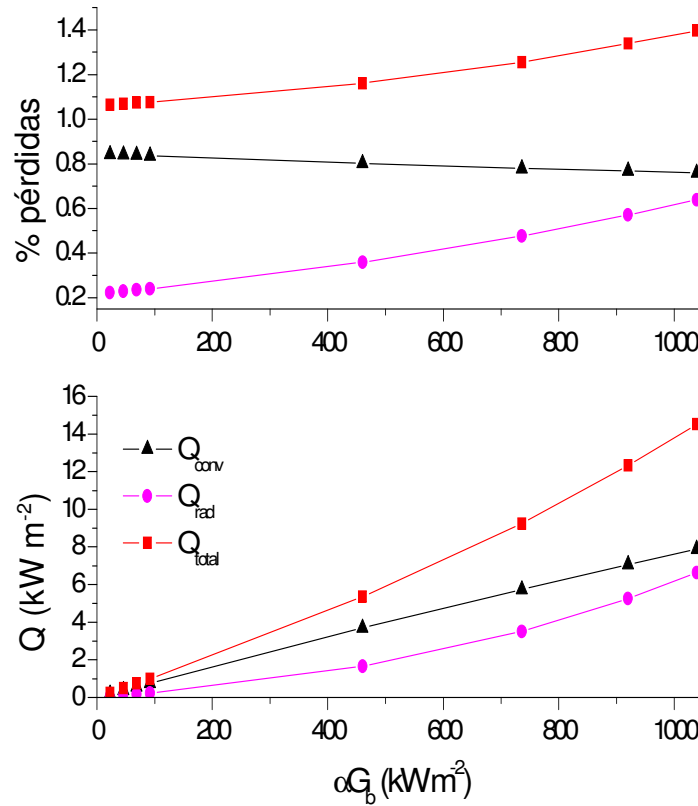


Figura 2.18: Pérdidas térmicas en función de la potencia absorbida (αG_b); pérdidas convectivas (Q_{conv}), radiativas (Q_{rad}) y totales ($Q_{total} = Q_{conv} + Q_{rad}$)

Una vez validado el modelo, se realizó un análisis paramétrico fijando todos los parámetros, excepto el parámetro que se desea analizar. El cual se hizo variar desde las condiciones controladas del laboratorio hasta las extremas de operación, como se observa en la tabla 2.11. En todos los caso a excepción del efecto de la velocidad del viento pegando en la cara del radiómetro, las contribuciones en las pérdidas no resultaban mayores que 1.4%.

Tabla 2.11: Rango de variación de los parámetros de la modelación.

Parámetro		Valor fijo	Rango	Unidades
Potencia radiativa absorbida	αG_b		23 a 1039	kW m^{-2}
Temperatura a la entrada del agua	T_{in}	300	283.2 a 313.2	
Temperatura atmósfera	T_a	300	283.2 a 313.2	
Caudal de refrigeración	$\dot{v}$	1	0.5 a 4	l min^{-1}
Velocidad del viento	ω	1	1 a 60	km h^{-1}

Para analizar la contribución de la velocidad del viento en la medición del radiómetro, se estableció que el flujo del aire choca de manera frontal a la cara del dispositivo, con rangos que van, de 1 a 60 km h^{-1} . En la figura 2.19 se muestra la cuantificación el porcentaje de las pérdidas convectivas, radiativas y la suma de ambas, para tres rangos de potencia radiativa absorbida por el dispositivo ($\alpha G_b = 69, 460$ y 1039 kW m^{-2}).

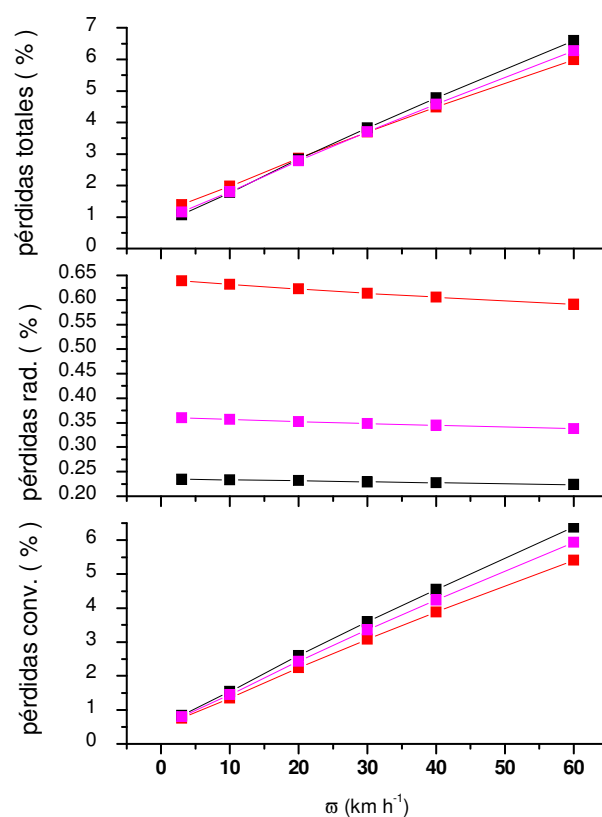


Figura 2.19: Porcentajes de las pérdidas térmicas en función de la velocidad del viento, para tres rangos de potencia absorbida $\alpha G_b = 69, 460$ y 1039 kW m^{-2} .

En una planta de torre central es común que se presenten regimenes de velocidad de viento de 0 a 30 km h⁻¹ por lo que con base en modelación se puede concluir que simplemente por este factor se estaría sobrestimando la lectura de estos radiómetros hasta en un 2.5%.

Con los estudios realizados con CAVICAL se determinó que las pérdidas térmicas son menores que el 0.4%, por lo tanto, se esperaba que si se diseña el nuevo calorímetro con una geometría similar, pero de un menor tamaño, la magnitud de las pérdidas tendrían que ser por fuerza del mismo orden de magnitud o menores. Por otra parte, al validar el modelo de CAVICAL con los resultados experimentales se propuso realizar un modelo similar aplicado al nuevo calorímetro. Con la experiencia ganada con los experimentos del calorímetro en el HS-PSA se obtuvo la certeza de que la respuesta del incremento de temperatura en la pared presenta una respuesta lineal con los incrementos de la densidad de radiación incidente. Por otra parte, con los experimentos con el radiómetro HyCal, se obtuvo la metodología para la calibración de nuevo calorímetro, la cual se realizara en el mismo contexto de medición. Y por último, con la modelación de HyCal se llegó a ver la importancia de que la calibración del nuevo dispositivo, se realice en el contexto experimental. Con todos estos resultados se obtuvieron los criterios con los cuales se realizó el diseño de nuevo calorímetro, el cual se denominó CAVIRAD. En el siguiente capítulo se presenta la metodología que se siguió para determinar los parámetros óptimos de diseño para CAVIRAD.

Capítulo 3

Obtención de los parámetros de diseño del calorímetro - radiómetro (CAVIRAD)

Con base en los criterios de diseño que se obtuvieron con los estudios preliminares, en éste capítulo se presenta el problema físico del dispositivo, las consideraciones requeridas para realizar la medición del flujo radiativo concentrado, así como el análisis de las características ópticas y térmicas de la cavidad cónica en función de los parámetros de diseño. Por otra parte, se presenta el análisis de los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en el interior del dispositivo y con ello determinar criterios de diseño para el calorímetro - radiómetro CAVIRAD.

3.1. Problema físico en la medición con CAVIRAD

Los sistemas de concentración solar requieren de receptores con una excelente captación de la potencia radiativa incidente, y con mayor razón si estos van a ser empleados para medir esta radiación. Para lograr la adecuada captación de energía radiativa concentrada se han diseñado receptores en forma de cavidad, en los cuales por sus características geométricas se consigue absorber casi en su totalidad la potencia radiativa incidente y reducir al mismo tiempo las pérdidas térmicas al medio ambiente. Dichas pérdidas resultan ser menores que las que se producen en una superficie extendida de área equivalente [Hinojosa *et al.*, 2005]. El problema del tamaño de la abertura de la cavidad es el compromiso entre la cantidad de energía radiativa incidente y las pérdidas térmicas que salen a través de la misma [Steinfeld *et al.*, 1992; Hahm *et al.*, 1999]. Sin embargo, si se emplea esta cavidad como un dispositivo de medición de la densidad radiativa incidente en un área determinada, los criterios de diseño tendrían que ser minimizar las pérdidas térmicas y maximizar la absorción de la radiación incidente que pasa a través de la abertura, sin importar demasiado la cantidad de potencia radiativa que entra a través de la abertura.

La potencia radiativa incidente ($\dot{Q}_{in}$) en un área determinada (A_a) se define como la integral de área del flujo radiativo incidente (ϕ_b), tal que,

$$\dot{Q}_{in} = \int_{A_a} \phi_b dA \quad (3.1)$$

La densidad de radiación concentrada se delimita en un área definida, es decir el área de la abertura de la cavidad (A_a), la cual corresponde a la zona que se desea medir. Por esta razón, se acopla al calorímetro otro dispositivo, denominado diafragma refrigerado, el cual aísla al sensor de toda la radiación concentrada que incide por todas partes, dejando pasar solamente la energía radiativa que entra a través de una ventana o abertura del propio diafragma. Por otra parte, la potencia absorbida por el calorímetro ($\dot{Q}_{sun}$) se expresa como:

$$\dot{Q}_{sun} = \alpha_{ap} \dot{Q}_{in} \quad (3.2)$$

donde α_{ap} es la absortancia aparente de la cavidad y que se puede determinar de manera teórica, por ejemplo, a través de un modelo Monte Carlo en función de sus parámetros geométricos y considerando la cavidad como un cuerpo gris.

La figura 3.1 muestra un esquema del calorímetro, donde se define el volumen de control en el que se llevó a cabo el balance térmico del dispositivo. En esta misma figura se observa la manera como incide la radiación concentrada (G_b) en la cara frontal del diafragma refrigerado, donde una fracción de la energía es reflejada hacia el exterior de manera difusa por la misma cara del diafragma y el resto de la energía es absorbida por sus paredes y extraída por convección forzada por el agua de refrigeración $\dot{Q}_{out \text{ diafragma}}$. Solamente la radiación concentrada que pasa a través de la abertura del diafragma será absorbida por el propio calorímetro $\dot{Q}_{sun}$.

El diafragma refrigerado aísla térmicamente al calorímetro del resto de la radiación incidente en el dispositivo, ya que este dispositivo permite el paso de la radiación al calorímetro a través de la abertura sin que exista ningún contacto térmico entre estos dos componentes. El balance de energía que se realiza dentro del volumen de control es:

$$\dot{Q}_{sun} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{out} \quad (3.3)$$

donde $\dot{Q}_{out}$ son las pérdidas térmicas, convectivas y radiativas, del calorímetro que salen por la abertura y $\dot{Q}_c$ es la potencia térmica extraída por el agua de refrigeración. Esta última se estima mediante:

$$\dot{Q}_c = \rho_{agua} C_p \dot{V} \Delta T \quad (3.4)$$

la diferencia de temperaturas entre la entrada y salida del flujo de refrigeración ΔT , en estado estacionario, se mide de manera diferencial en las fronteras del volumen de control para dicho flujo. Por otra parte, la densidad (ρ_{agua}) y el calor específico (C_p) del agua, se evalúan en función de la temperatura media logarítmica entre la entrada y la salida. Con esta suposición se reducen la propagación de errores en el cálculo de la potencia absorbida por el dispositivo, debido a que las variaciones en el C_p y ρ_{agua} para los incrementos de temperatura que se producen son de unos cuantos grados centígrados, sin que exista cambio de fase.

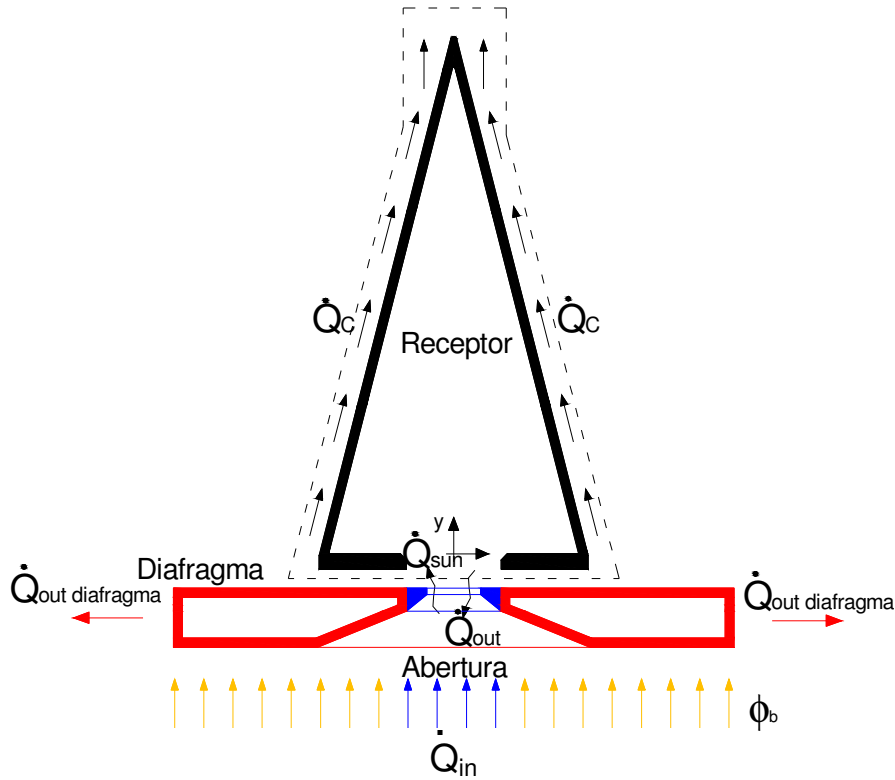


Figura 3.1. Esquema del calorímetro de cavidad con flujos de calor.

Por último, se define la densidad de flujo radiativo incidente Φ_{sun} como la razón entre el balance térmico en el calorímetro y el área de la abertura del diafragma

$$\Phi_{sun} = \frac{\dot{Q}_{sun}}{A_{ab}} \quad (3.5)$$

Como se mencionó anteriormente, uno de los propósitos de diseñar este dispositivo en forma de cavidad fue conseguir que su absorptancia aparente (α_a) sea lo más próxima a la de un cuerpo negro ($\alpha_a \approx 1$). Si bien este valor depende de las propiedades ópticas de la superficie interior de la cavidad, también de manera significativa de sus características geométricas. Por ello, es importante

seleccionar tanto el tipo de geometría, como sus dimensiones, para conseguir la máxima absorptancia aparente, con la menor inercia térmica y el mínimo de pérdidas térmicas hacia el ambiente.

Las geometrías más estudiadas para la construcción de receptores solares de cavidad son: esférica [Leibfried y Ortjohann, 1995], cónica [Sparrow y Jonsson, 1963], cilíndrica [Sparrow *et al.*, 1974] y las geometrías híbridas, basadas en la combinación de las anteriores [Hinojosa, 2004]. Las esferas son de la geometrías más utilizada para la fabricación de cuerpos negros, sin embargo, la misma geometría dificulta el flujo de refrigeración a través de la pared opuesta a la cavidad, sin olvidar desde luego las dificultades que se tienen en la manufactura de esta geometría.

Por otra parte, se puede considerar que el cono es una buena aproximación a las propiedades de absorptancia aparente que tiene una esfera. En esta geometría se producen un gran número de reflexiones en su interior antes de que puedan salir por la abertura de la cavidad y por tanto absorbidas por la misma. Además, la forma cónica permite una mejor transferencia de calor entre la pared receptora y el flujo de agua de refrigeración en la pared interior de la cavidad. Por otra parte, la cavidad reduce dramáticamente las pérdidas convectivas hacia el medio [Pérez-Rábago, 2003]. Por ello, se considera adecuado seleccionar un cono para el diseño del nuevo calorímetro.

Una vez que se decidió qué tipo de geometría se iba a emplear para la construcción del radiómetro, se definieron los parámetros que iban a entrar en juego en su diseño.

3.2. Parámetros geométricos

La cavidad cónica receptora está constituida por dos piezas o segmentos principales: el cono receptor y la base del cono que se denomina *baffle*. Este consiste en un disco de radio exterior igual al radio de la base del cono R_o y con una abertura central de radio R_a . El área de la abertura define la cantidad de potencia radiativa que entra a la cavidad y la cual va a ser evaluada. Por esta razón, el parámetro R_a se considera como la variable de partida para el diseño del dispositivo. Por otra parte, para integrar este parámetro a los parámetros de diseño del cono, se define la razón de baffle ξ la cual es la proporción entre la dimensión radial del baffle con respecto al radio de la abertura del cono.

$$\xi = \frac{R_o - R_a}{R_o} \quad (3.6)$$

Se considera como el tercer parámetro importante para definir la geometría de la cavidad al ángulo de abertura del cono (ω). Con estos tres parámetros como base se puede definir cualquier tipo de cavidad cónica, como se observa en la figura 3.2.

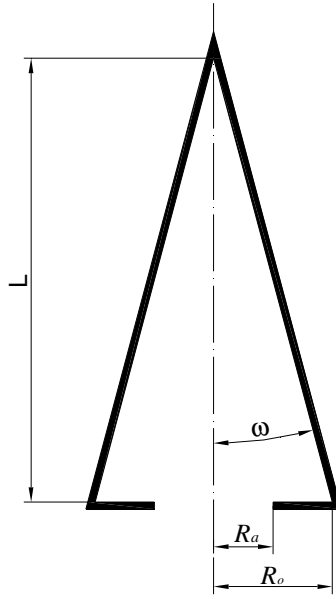


Figura 3.2. Esquema de la geometría de la cavidad cónica.

La altura del cono (L) se expresa como una relación trigonométrica entre la relación de baffle ξ y el ángulo de abertura del cono ω , como se observa en la figura 3.2.

$$L = \frac{R_a}{(1 - \xi) \tan \omega} \quad (3.7)$$

Con esta expresión se observa que la longitud del receptor se incrementa de manera geométrica conforme disminuye el ángulo de abertura del cono, y esto se matiza en mayor medida conforme se incrementa la razón de baffle, considerando un radio de abertura fijo para todos los casos, por ejemplo $R_a = 0.5$ cm, como se observa en la figura 3.3.

Para que el dispositivo tenga un rápido tiempo de respuesta, invariablemente este debe tener la menor inercia térmica posible, por lo tanto, se requiere que el cono tenga la menor longitud posible. Más precisamente, se requiere expresar los parámetros de diseño ω , ξ y R_a en función de la masa del cono. Considerando que el espesor de la pared de la cavidad δ es constante, tanto para el cono como para el baffle, se sustituyen los parámetros de diseño en una expresión que define el volumen de metal con que está hecha la cavidad.

$$V_{cu} = \left\{ \frac{\pi}{3} \left[\frac{R_a \cos \omega + \delta(1 - \xi)}{(1 - \xi) \cos \omega} \right]^2 * \left[\frac{R_a \sin \omega + \delta(1 - \xi) \tan \omega}{(1 - \xi) \tan \omega \sin \omega} \right] \right\} + \left\{ \frac{\pi \delta R_a^2 (2\xi - \xi^2)}{(1 - \xi)^2} \right\} - \left\{ \frac{\pi R_a^3}{3(1 - \xi)^3 \tan \omega} \right\} \quad (3.8)$$

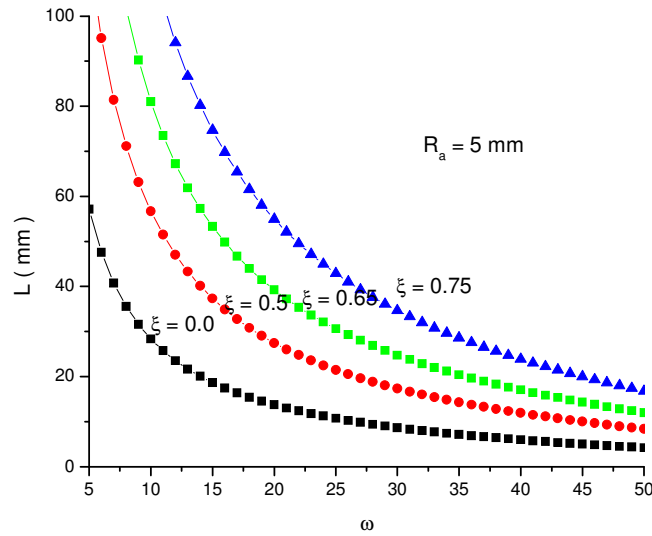


Figura 3.3. Gráfica de L en función de ω , para diferentes ξ y $R_a = 5$ mm.

Suponiendo un espesor de pared $\delta = 1.5$ mm, que el radio de abertura es el mismo que el caso anterior $R_a = 5$ mm y considerando que el material de la cavidad es cobre ($\rho_{cu} = 8.9$ g/cm³), se muestra en la figura 3.4 la masa del dispositivo en función de los parámetros de diseño ω y ξ . En esta figura se observa un incremento significativo del peso de la cavidad de manera conforme que disminuye ω , además entre mayor sea ξ mayor será este incremento.

Es importante recordar que uno de los propósitos con el nuevo calorímetro es que alcance al equilibrio térmico en el menor tiempo posible y con la mayor absorptancia. Bajo este criterio de diseño, se establece un fuerte compromiso entre las propiedades ópticas del sistema y su inercia térmica. Para ello, se requiere que la cavidad tenga la menor cantidad de masa posible y que con esta misma geometría se tenga la mayor absorptancia aparente.

A continuación se muestra el análisis de la emitancia aparente de la cavidad ε_a en función de sus parámetros geométricos, el cual se desarrolló durante el trabajo de investigación de la maestría [Pérez-Rábago, 2003].

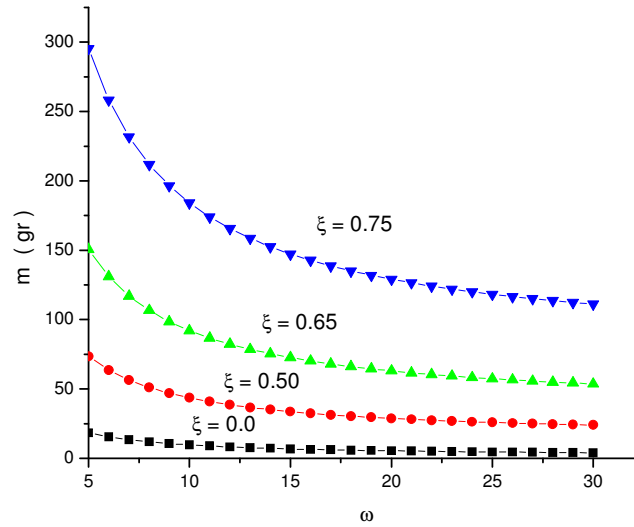


Figura 3.4. Gráfica de la masa de la cavidad (m) en función del ángulo de abertura de la cavidad (ω) para $R_a = 5$ mm.

3.3. Análisis de la absorptancia aparente de la cavidad

Heinisch *et al.* (1973) hicieron el análisis radiativo de una cavidad cónica con baffle (figura 3.5) utilizando un método de Monte Carlo con el que evaluaron las propiedades ópticas en función de los parámetros geométricos. Este análisis evalúa especialmente la emitancia aparente (ε_a) en función de la razón de baffle (ξ) y el ángulo de abertura del cono (ω). La ε_a se define como la relación entre la energía emitida por la abertura de la cavidad y la energía que la misma abertura emitiera, suponiendo que esta se tratara de un cuerpo negro a la temperatura promedio de pared T_{ω} , esto es:

$$\varepsilon_a = \frac{E_{out}}{A_a \sigma T_w^4} \quad (3.9)$$

Con base en el trabajo desarrollado por Heinisch *et al.* (1973) se llevó a cabo una modelación matemática de la cavidad cónica considerando una serie de simplificaciones del problema, como por ejemplo, suponer la misma emitancia en toda la superficie interior de la cavidad y una temperatura uniforme [Pérez-Rábago, 2003].

El programa para calcular la ε_a se desarrolló en una plataforma Linux con un compilador C, el cual fue modificado para cada una de las condiciones específicas que se modelaron, es decir, con el mismo algoritmo se empleó para calcular la ε_a en función del ángulo de abertura, relación de baffle o bien la altura del cono. La figura 3.5 presenta los resultados de la simulación del modelo MC-HSS, calculando la emitancia aparente ε_a en función de la relación de baffle ξ , para las

emitancias de pared de $\epsilon = 0.3, 0.5, 0.7$ y 0.9 , y para el ángulo de abertura ω de 15° .

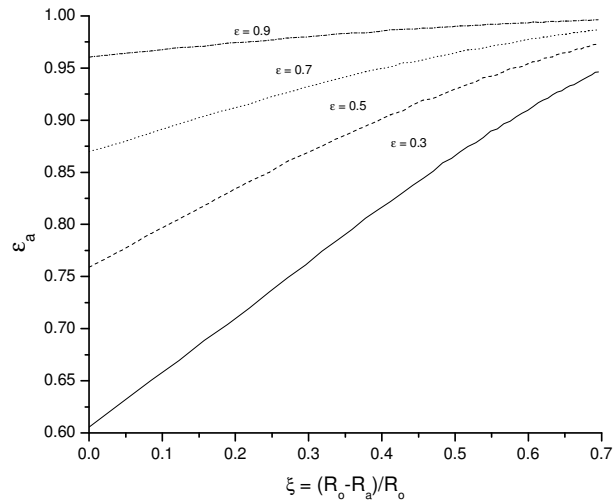


Figura 3.5. Gráfica de la ϵ_a en función de ξ calculada con Monte Carlo para un ángulo de apertura ω de 15° .

La figura 3.6 presenta los mismos cálculos que la figura 3.5 pero con el ángulo de abertura del cono $\omega = 30^\circ$. En estas gráficas se observa que de manera independiente al ángulo de abertura de la cavidad, la relación de baffle, incrementa de manera sustancial la emitancia aparente. Esto se debe a que el baffle también contribuye a absorber parte de la radiación que entra en la cavidad. Conforme se incrementa la relación de baffle la emitancia se aproxima a la emitancia aparente de un cuerpo negro.

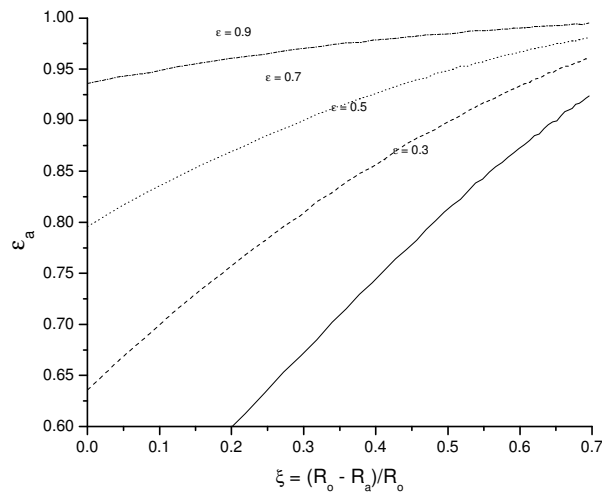


Figura 3.6. Gráfica de la ϵ_a en función de ξ calculada con Monte Carlo para un ángulo de apertura ω de 30° .

Haciendo un comparativo entre la figura 3.5 y 3.6 se observa que al ser menor el ángulo de abertura del cono, es decir, la dependencia de ε_a con ε disminuye. Sólomente con estas dos graficas, se puede tomar un criterio de reducir el ángulo de abertura del cono y aumentando la relación de baffle. Sin embargo se requiere encontrar el compromiso de estos parámetros con la inercia térmica de la cavidad.

Es importante relacionar los parámetros geométricos con sus respectivos valores de ε_a , para comparar las propiedades geométricas en función de las propiedades ópticas. La figura 3.7 muestra ε_a en función de la longitud de la cavidad, para diferentes ξ . En esta gráfica se observa que si se desean cavidades que tengan una ε_a por encima de 0.98, la relación de baffle tendrá que ser mayor que 0.5. Por otra parte, para diseñar un instrumento con un rápido tiempo de respuesta, se requiere que el dispositivo sea lo más pequeño posible, por ello es importante evaluar la masa del cono receptor en función de los parámetros geométricos de diseño y a su vez relacionarlos a los valores de ε_a para cada caso.

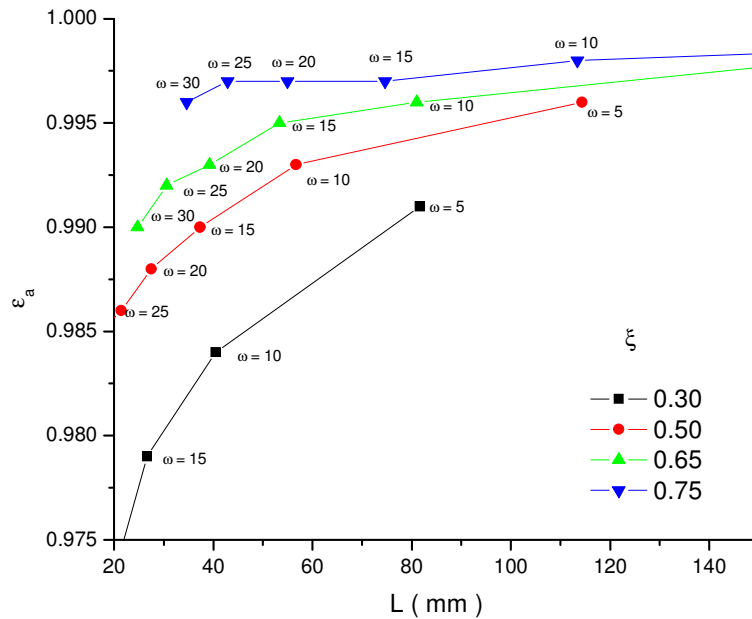


Figura 3.7. Gráfica de ε_a en función de la geometría, representada en este caso por la L , para diferentes ξ .

En la figura 3.8 se muestra el valor de ε_a correspondiente a cada geometría relacionándolas a su respectiva masa (m), considerando diferentes relaciones de baffle y fijando el área de abertura en $R_a = 0.5$ cm, donde se observa, que para obtener una emitancia aparente mayor a 0.99 la masa del receptor no podrá ser menor que 250 gramos. Ahora bien, el incremento en el peso a partir de este punto, no garantiza un incremento en la emitancia aparente significativo.

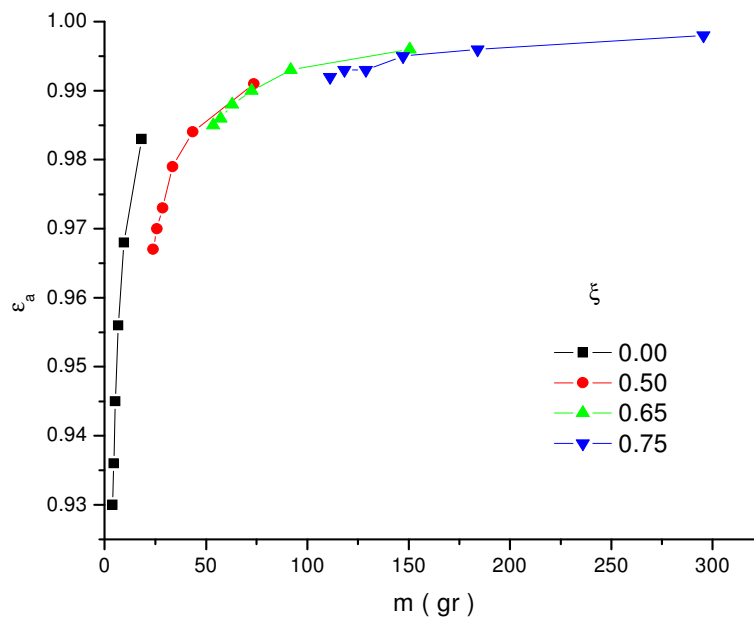


Figura 3.8. Gráfica de ϵ_a en función de la geometría, representada en este caso por la m , para diferentes ξ .

Con estos análisis se obtienen los rangos entre los cuales se deben seleccionar los parámetros de diseño del cono receptor, pero no así una sola geometría. Con este estudio se pueden concluir que los rangos entre los cuales se consigue una emitancia aparente menor que 0.99 y donde el peso del cono receptor es menor que 80 gramos, los parámetros de diseño deben de estar dentro de los rangos que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Rangos de los parámetros de diseño del cono receptor.

Parámetro	Rango
ξ	0.5 a 0.75
ω	10° a 20°
R_a	0.5 a 1.0 cm

Dentro de estos rangos se tienen un número infinito de combinaciones, las cuales tendrían características muy similares de absorptancia aparente (α_a mayor a 0.99) e inercia térmica. Estableciendo los parámetros de la tabla 3.1 como las cotas máximas, se escogieron cuatro grupos de geometrías, dependiendo de su relación de bafle y diámetro de abertura, y en cada grupo de geometría se hizo variar el ángulo de abertura del cono en 10, 15 y 20°. Para cada una de estas geometrías se analizó la distribución de radiación incidente en la pared de cada una de las cavidades mediante de trazado de rayos, el cual se presenta en la sección 3.4.

3.4. Análisis de la distribución radiativa en las paredes de la cavidad

Dentro de los rangos de los parámetros se seleccionaron doce geometrías distintas, agrupadas en cuatro familias (nombras del 1 al 4), las cuales se obtuvieron de la combinación del radio de abertura de la cavidad R_a (0.5 y 1.0 cm) y la relación de bafle ξ (0.5 y 0.75). Por otra parte, en cada una de estas familias se consideró como parámetro variable del diseño al ángulo de la abertura del cono ω , considerando tres ángulos distintos: 10, 15 y 20°. Esto se llevó a cabo en cada una de las familias se diferencia el ángulo con las letras A, B y C, las cuales corresponden a cada uno de los ángulos de abertura respectivamente. Las dimensiones de cada una de estas geometrías se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Geometrías propuestas a modelar.

Familia	1			2			3			4			
Volumen	A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3	A4	B4	C4	
R_a Radio Abertura	5						10						mm
ξ Relación de bafle	0.75			0.50			0.75			0.50			
ω Ángulo	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	
R_o Radio Interior	20.0			10.0			40.0			20.0			mm
L Longitud	113.4	74.6	54.9	56.7	37.3	27.5	226.9	149.3	109.9	113.4	74.6	54.9	mm
m Masa	129.3	92.4	74.2	33.8	23.8	18.9	499.6	357.7	287.3	125.9	89.0	70.8	gr.

Como se puede observar en la tabla 3.2, el caso de las familias 1 y 4, tienen las mismas longitudes y sus masas son muy similares, debido a que la relación entre ξ y R_a son proporcionales entre si. Por otra parte, en la figura 3.9 se observa que la familia 2 resulta ser el grupo de conos más pequeño. Pero por otra parte, es importante tomar en cuenta el hecho que al reducir el área de la abertura de la cavidad, se sacrifica potencia térmica útil para realizar la medición calorimétrica.

Para conocer la cantidad de potencia térmica que podría incidir en cada una de estas geometrías y cuál sería la distribución de flujo radiativo en la pared interior, se realizó un análisis de trazado de rayos para cada una de las doce geometrías. Esta técnica consiste en tomar la distribución de la intensidad de flujo radiativo del cono solar y proyectarla en cada uno de los espejos o facetas del concentrador. La imagen solar proyectada en las facetas se convoluciona con el cono de error de la superficie reflejante, proyectándola hacia la pared del cono receptor. Este análisis se realizó con CIRCE2 [Romero, 1994].

Para hacer el análisis de la potencia radiativa incidente, así como su distribución en la pared interior de cada una de las geometrías propuestas, se tomó como referencia el sistema de concentración del Horno Solar de Almería (HS). Para la modelación se consideró que el centro de cada una de las cavidades se ubicaba en el centro de la zona focal con un flujo radiativo incidente de 1000 kW m^{-2} .

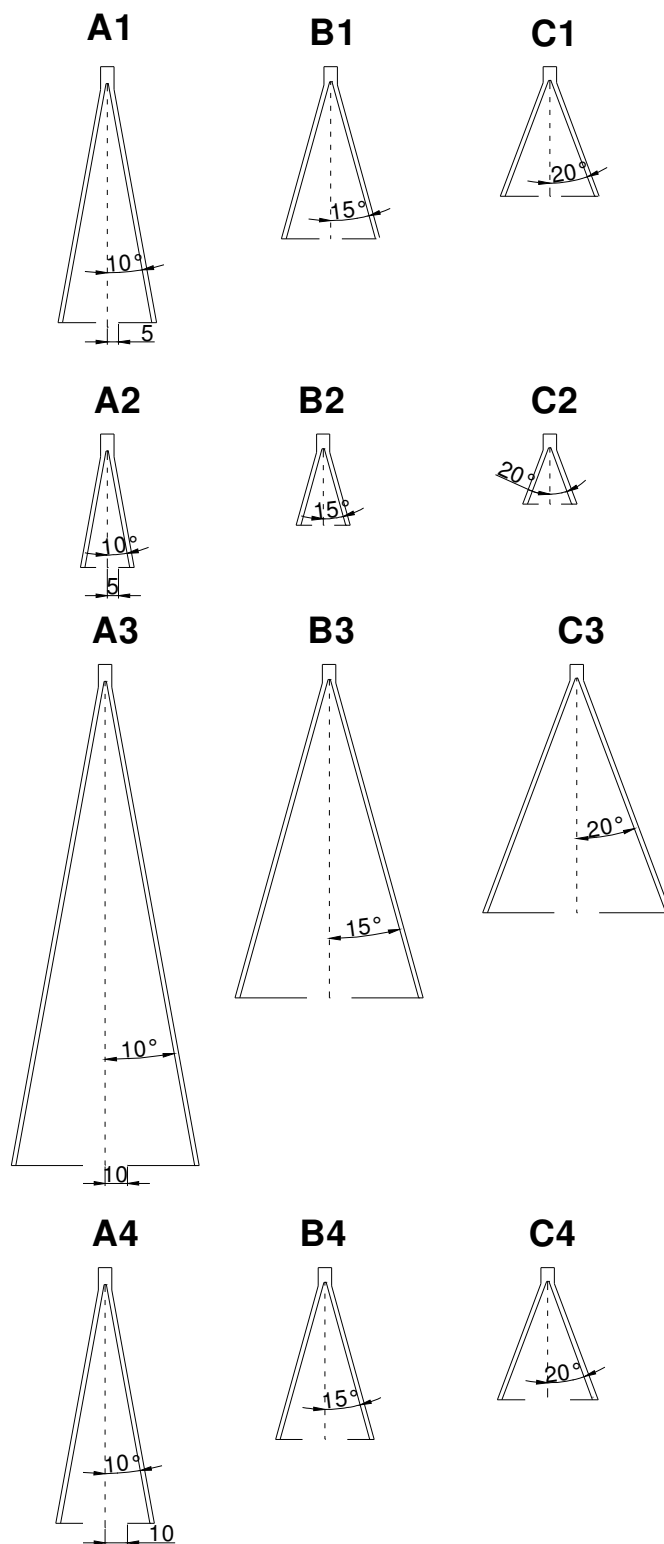


Figura 3.9. Diagramas de los diferentes casos de cavidades.

Los parámetros del sistema de concentración del HS tomados en cuenta para el análisis del trazado de rayos en las cavidades propuestas fueron:

- La superficie del concentrador compuesta por 89 espejos (facetas esféricas) distribuidas en un arreglo en una estructura en forma de paraboloides, con un área total de 98.5 m².
- La distancia focal del HS, $L_f = 7.45$ m.
- Tanto los errores de superficie, alineación de las facetas, así como los errores de seguimiento, se agrupan en una σ de 3.6 mrad, la cual fue determinada de manera experimental.

Las reflectividades tanto del heliostato como del propio concentrador se consideran de 0.9.

La figura 3.10 muestra las distribuciones de flujo radiativo (Φ) de cada geometría agrupadas en las cuatro familias. En estas gráficas se puede observar que para la misma relación de baffle, es decir el conjunto de familias 1-3 y 2-4, las magnitudes de los picos máximos de radiación, son similares para el mismo ángulo de apertura del cono. Sin embargo, la potencia total concentrada para las familias en las cuales el radio de apertura de la cavidad es de 10 mm (familias 3 y 4) resultan ser de 3 a 3.7 veces las potencias absorbidas por las cavidades con el radio de 5 mm (familias 1 y 2).

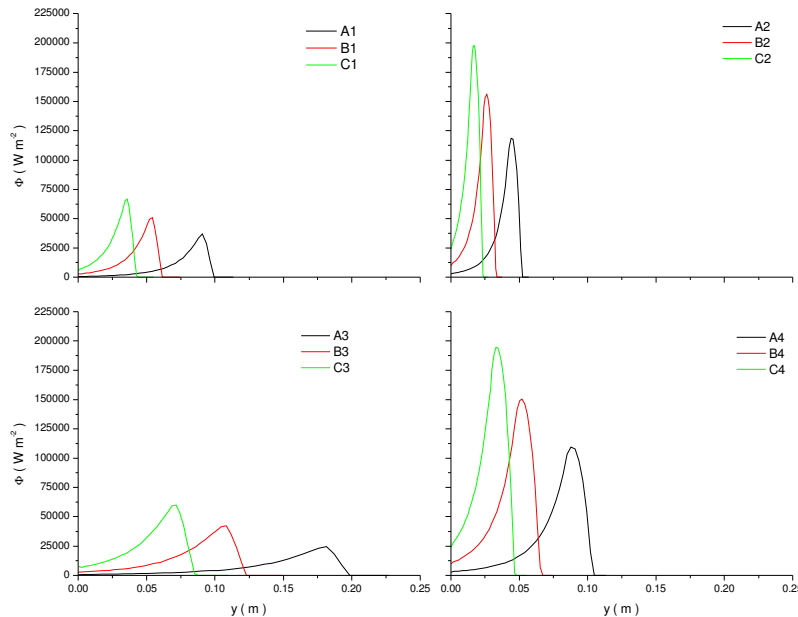


Figura 3.10. Distribución de flujo radiativo para los doce casos a modelar.

Por otra parte, la potencia incidente de la cavidad para ambos casos no es la misma, debido a que para los casos en los que el diámetro de abertura de la cavidad es de 10 mm acepta mayor cantidad de potencia concentrada, como se puede observar en la figura en la figura 3.11, donde se observa la magnitud de potencia que incide en cada una de las geometrías. Sin embargo, en esta misma figura se observa como para los casos con aberturas de 0.5 cm de diámetro, la potencia incidente es prácticamente constante, además, para los caso de la abertura de 1.0 cm donde se tienen geometrías más grades las variaciones en la potencia concentrada son más significativas, debido a la longitud del cono y por tanto a la ubicación espacial del bafle en la zona focal.

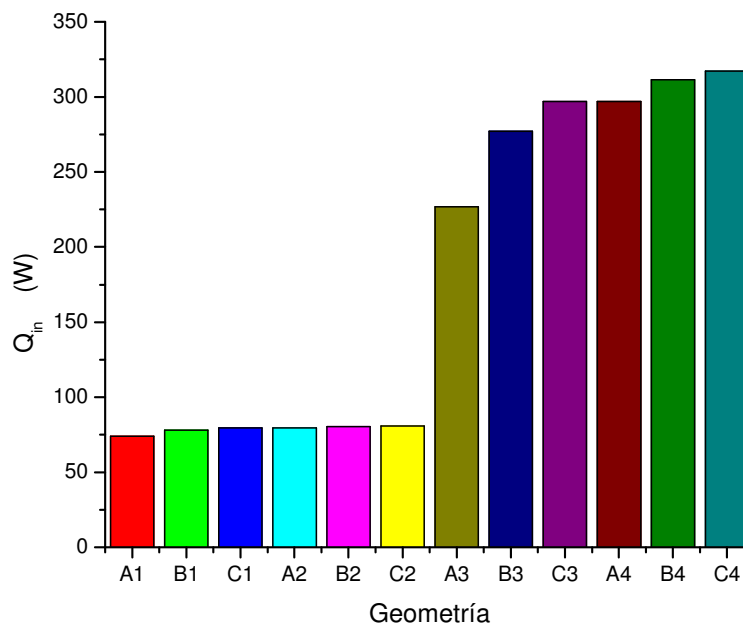


Figura 3.11. Potencia radiativa incidente para cada uno de las cavidades.

En la figura 3.12 se presentan las magnitudes de los picos de distribución de radiación incidente en el interior de cada cavidad. En esta figura se observa que las familias 2 y 4 son las que presentan los máximos picos y coincide que en ambos caso la relación de bafle es de 0.5. Por otra parte se observa que para los casos de las familias 1 y 4 las cuales tiene las mismas dimensiones, pero con diferente relación de bafle, la familia 1 recibe menor potencia radiativa, así como menor magnitud en el pico en la distribución radiativa en el interior de la cavidad.

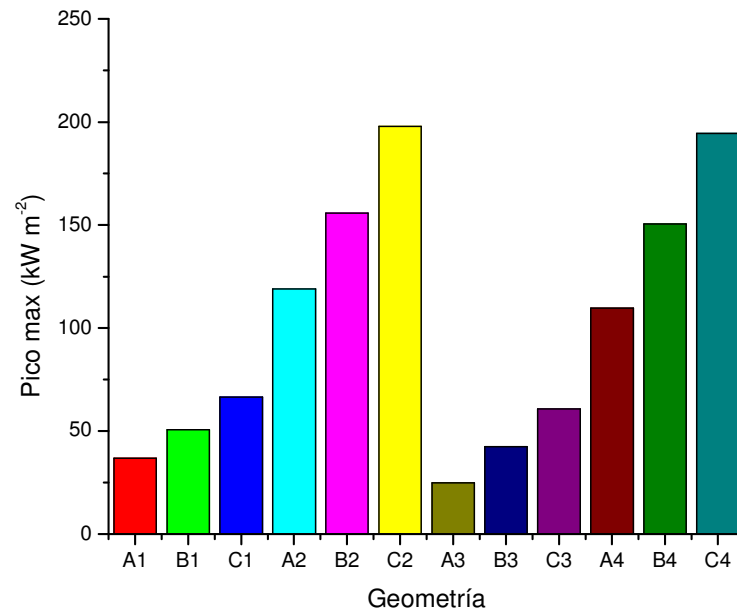


Figura 3.12. Pico máximo de radiación incidente para cada uno de los cavidades cónicas.

Por último, se analiza la densidad de potencia radiativa incidente por unidad de masa del cono receptor (Φ_{masa}) para cada una de las doce geometrías propuestas, como se observa en la figura 3.13.

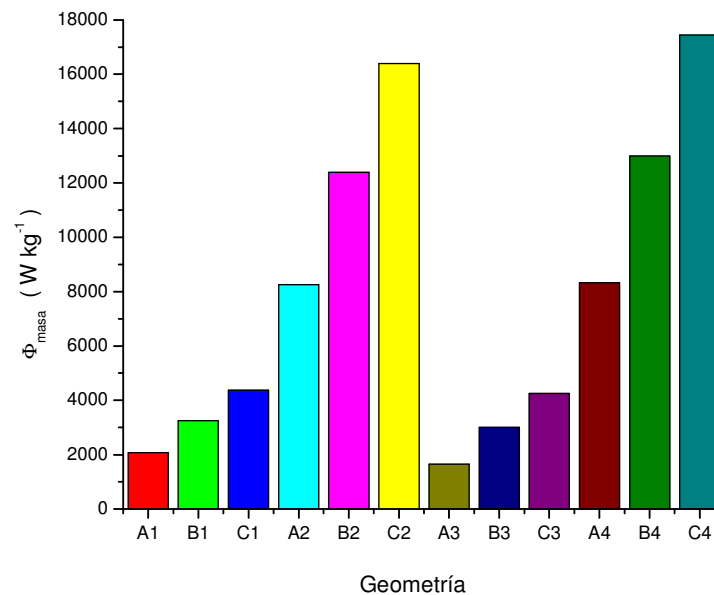


Figura 3.13. Densidad de potencia concentrada por unidad de masa del cono receptor.

En este caso las geometrías B2, C2, B4 y C4 son las que presentan la mayor densidad de potencia incidente por unidad de masa, con lo que se puede afirmar son estas las que cuenta con la mayor cantidad de energía para realizar la medición con la menor cantidad de masa. En otras palabras con estas geometrías se va a tener la mayor respuesta de temperatura con el menor tiempo.

Por otra parte, si consideramos que las dimensiones de las geometrías de las familias 1 y 4 son similares, el conjunto de doce geometrías se puede reducir a solo seis de ellas.

De igual manera que el caso del análisis de la transferencia de calor para el calorímetro CAVICAL, el cual se presentó en el capítulo 2, se realizó un modelo de la transferencia de calor para las geometrías B1, C1, B2, C2, B4 y C4, con la mayor densidad de potencia por unidad de masa. En este modelo se resolvieron las ecuaciones de masa, momento y energía de manera simultánea para el flujo de agua en el interior del calorímetro y el aire en la cavidad, así como las ecuaciones de difusión de calor para la pared del cono receptor.

3.5. Análisis de la transferencia de calor en el calorímetro

El análisis de la transferencia de calor en el calorímetro se realizó a través de un modelo de la transferencia de calor similar al realizado con CAVICAL. Este modelo fue desarrollado con FLUENT. Cabe señalar que la geometría de la nueva cavidad, el baffle y el intersticio por donde circula el agua de refrigeración, debido a su simetría de revolución, se pudo simplificar considerando un eje de simetría axisimétrico, lo que permitió simplificar el problema a dos dimensiones, como se muestra en la figura 3.14. Es importante mencionar que existe simetría radial tanto en la geometría del dispositivo como en la distribución de flujo radiativo incidente. En esta figura se muestra la dirección del agua de refrigeración, la cual fluye del vértice hacia la base del cono. Las ecuaciones de masa, momento y energía se resolvieron considerando a la gravedad en dirección del eje x positivo. Por otra parte, las condiciones de temperatura, presión y caudal del agua de refrigeración a la entrada del calorímetro se consideraron constantes, las propiedades físicas como densidad, viscosidad y conductividad térmica se calcularon en función de las temperaturas de cada nodo en cuestión. Al igual que el caso de CAVICAL se consideró que en el agua de refrigeración del dispositivo no se producirán cambios de fase y los saltos de temperatura que se esperan son menores a 20 °C. Se resolvieron las ecuaciones del modelo a través de la aproximación de Boussinesq [Pérez-Rábago *et al.*, 2006]. Por otra parte, las paredes del cuerpo exterior del calorímetro, su cara frontal, así como el sistema de sujeción, se consideran adiabáticas, por lo cual, se consideró la potencia radiativa incidente como la única fuente térmica del dispositivo. Para la modelación de la transferencia de calor del aire dentro de la cavidad, se consideró la cavidad del receptor en contacto con un volumen extendido, el cual es aproximadamente 100 veces mayor que el de la cavidad. Ambos volúmenes se comunican a través de la abertura del propio dispositivo, como se indica en la figura 3.14.

Los parámetros que se tomaron en cuenta para realizar las corridas de la modelación para cada una de las geometrías fueron las siguientes:

- Se realiza la modelación para cada una de las seis geometrías, con la mayor densidad de potencia radiativa por unidad de masa (B1, C1, B2, C2, B4 y C4) para cinco casos de densidad de radiación incidente y para cinco caudales de refrigeración.
- Se hace variar el caudal de refrigeración (ν) de 1, 2.5, 5, 7.5, 10 y 15 l min⁻¹.
- La temperatura inicial del calorímetro, se iguala a la temperatura de entrada del flujo (300 K), la cual se encuentra en equilibrio térmico con el ambiente.
- La densidad de flujo radiativo que entra a través de la abertura de la cavidad (Φ_{sun}) se supone de 1000, 2500, 5000, 7500 y 10000 kW m⁻², lo cual abarca todo el rango a lo que se desea operar el dispositivo, que va de 1000 a 10000 kW m⁻².

La distribución del flujo incidente en la pared interior del cono receptor, se evaluó para cada caso de Φ_{sun} y geometrías propuestas. Las cuales se aproximaron a una expresión de amplitud de la función máxima Gaussiana, buscando que la distribución no tuviera una desviación por encima del 95%.

$$\Phi_{sun} = \Phi_o + A \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \tau_o}{\omega}\right)^2\right) \quad (3.10)$$

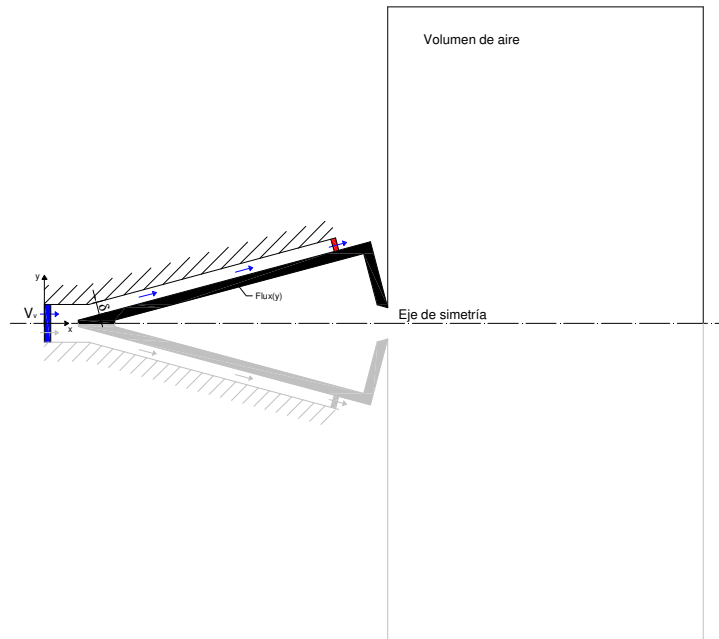


Figura 3.14. Esquema de las condiciones a la frontera para el calorímetro.

En la figura 3.15 se presenta la distribución de radiación que incide en la pared interior del cono receptor, en este caso para la geometría B4 con la aproximación a una función gaussiana.

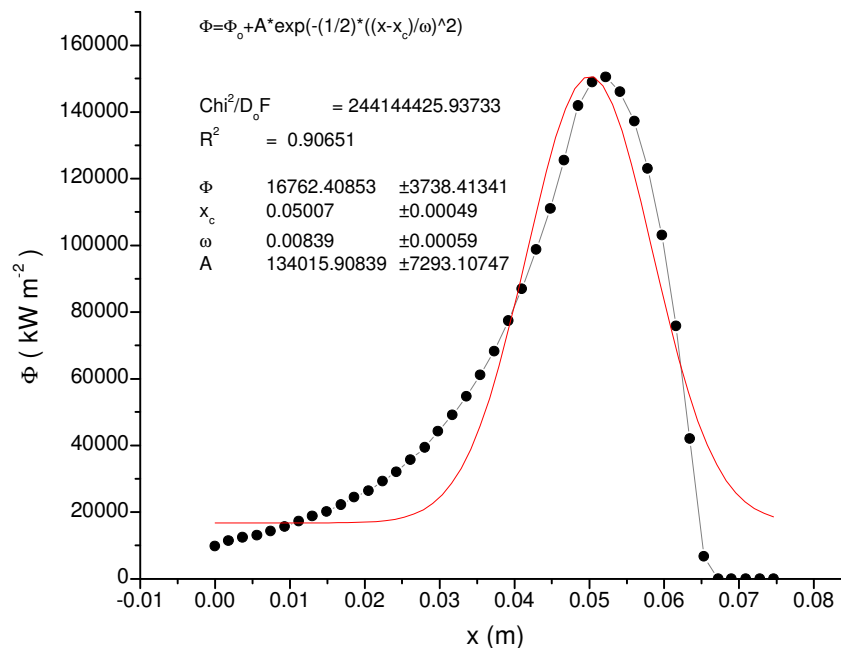


Figura 3.15. Distribución de flujo radiativo para la geometría del caso B4 (puntos-línea) y aproximación Gaussiana (línea).

A continuación se presentan los resultados de la modelación para el caso de la misma geometría B4. Para este resultado se consideró el caso donde el flujo incidente en la cavidad de 1000 kW m^{-2} con un caudal de refrigeración de 1 l min^{-1} . En la figura 3.16 se presenta la distribución de temperaturas tanto en la pared del receptor, el agua de refrigeración y el aire confinado en la cavidad. Dentro de la cámara de aire se observan tres fenómenos que resulta importante tomar en cuenta: el primero, existe un equilibrio térmico entre el aire y la pared en la zona del vértice, lo que produce una estratificación de la temperatura, la segunda zona donde existe un calentamiento del aire por la pared es el punto medio, debido a que es en esta zona donde se da el máximo de radiación incidente, y por último, en la base del cono, se observa que el aire calienta las paredes, lo que provoca celdas convectivas que atrapan al aire en el interior de la cavidad y el aire que se encuentra próximo a la abertura se incrementa tan solo 1°C , con lo que se reducen considerablemente las pérdidas convectivas.

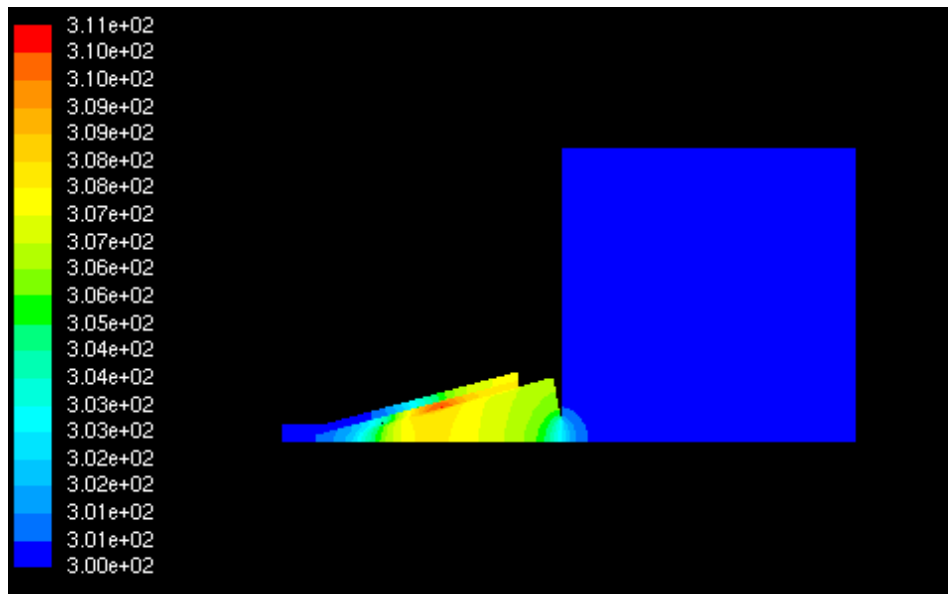


Figura 3.16. Distribución de temperaturas(K) en la pared del calorímetro de la geometría B4 para una densidad de flujo radiativo de 1000 kW m^{-2} , con un caudal de refrigeración de 1 l min^{-1} .

En la figura 3.17 se observa como los máximos tanto de temperatura como de flujo radiativo coinciden en la misma zona, sin embargo, las formas de ambas distribuciones son distintas debido a los procesos de difusión en la pared del cono.

Por otra parte la transferencia de calor entre la pared interna de la cavidad y el aire alojado en ésta presentan un efecto capacitivo el cual modifica la forma de distribución de temperaturas con respecto a la del flujo incidente.

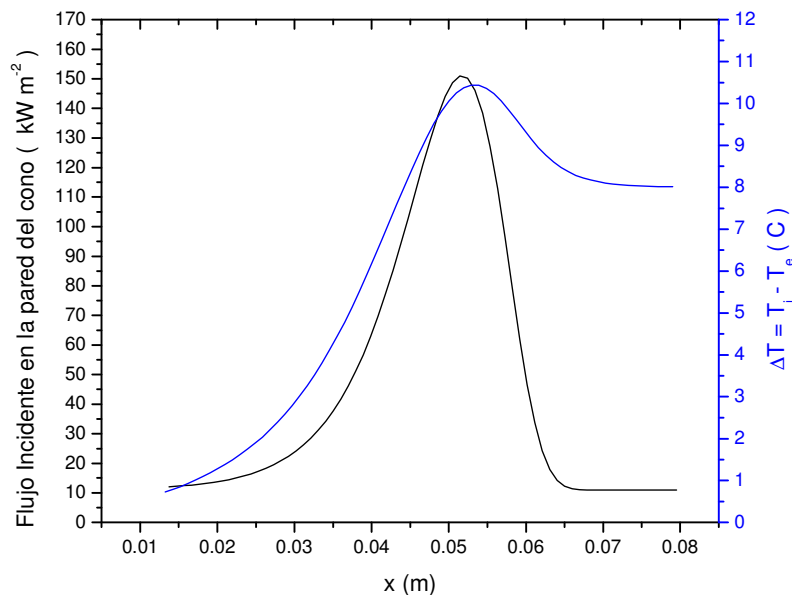


Figura 3.17. Distribución de la diferencia de temperatura longitudinalmente para la geometría del caso B4 (línea azul) y la distribución del flujo radiativo incidente (línea negra).

Por otro lado, en esta misma figura se observa que la zona de la base del cono se produce un estancamiento de temperatura, debido a que es precisamente aquí donde la cavidad concentra la mayor parte de su masa.

Considerando la base del cono receptor como un punto de referencia, en la modelación se hace variar el caudal de refrigeración ν de 1 a 15 l min⁻¹ y la densidad de radiación incidente en la cavidad Φ_{sun} de 1000 a 10000 kW m⁻². En la figura 3.18 se muestra la regresión lineal para el caso de esta modelación.

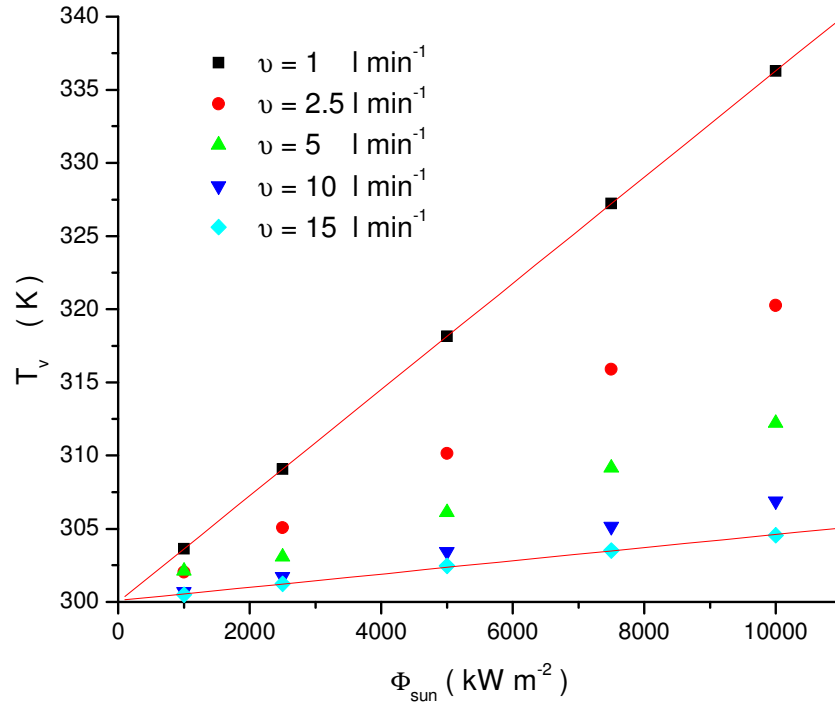


Figura 3.18. Relación de temperaturas en el vértice de la cavidad para diferentes caudales y flujos de radiación incidentes, para la geometría del caso B4.

Por otra parte, en la figura 3.19 se observa la dependencia del caudal de refrigeración en la diferencia de temperatura, en este caso para el máximo de la distribución de temperatura en la pared del receptor ΔT_{max} , donde se comprueba que al aumentar el flujo de refrigeración, la respuesta térmica disminuye. Sin embargo, para un rango de 1 a 2.5 l min⁻¹ la variación puede ser menor que 5%, con lo que a este rango se le puede determinar como el rango óptimo de operación.

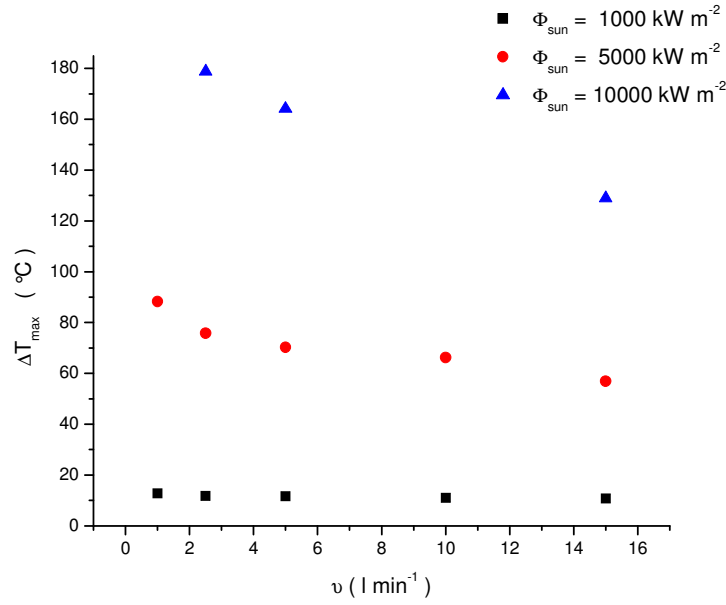


Figura 3.19. Incrementos de la temperatura del vértice del cono receptor para diferentes casos de caudal y flujo incidente para la geometría del caso B4.

Por último, en la tabla 3.3 se presenta el resumen del análisis paramétrico de la modelación, donde se presenta: la masa del cono (m), la potencia absorbida por el agua de refrigeración Q_c , la temperatura promedio de la pared del cono $T_{\omega, promedio}$, la temperatura máxima en la cavidad $T_{\omega, max}$, El coeficiente convectivo en el flujo de refrigeración.

Tabla 3.3. Resumen de la modelación.

		B1	C1	B2	C2	B4	C4	
m	Masa del cono	75.53	57.28	20.44	15.54	75.53	57.28	g
Q_c	Potencia absorbida	68.42	69.66	70.44	70.87	254.4	342.2	W
$T_{\omega, promedio}$	Temperatura promedio	301.76	302.82	303.12	303.97	307.6	309.7	K
$T_{\omega, max}$	Temperatura máxima	303.06	304.5	310.2	311.5	312.9	312.7	K
h_{agua}	Coeficiente convectivo	9.78×10^6	6.72×10^6	18.70×10^6	15.81×10^6	19.2×10^6	13.80×10^6	Wm ⁻² K ⁻¹

3.6. Tiempo de respuesta

Para determinar el tiempo de respuesta del calorímetro, se propuso un modelo de transferencia de calor simplificado, el cual consistió en el análisis del método de resistencia interna despreciable. Para ello se considero que cuando el calorímetro alcanza el estado estable, la potencia incidentes $\dot{Q}_{in}$ es igual a la potencia absorbida por el agua de refrigeración $\dot{Q}_c$ más las pérdidas al medio ambiente $\dot{Q}_{out}$.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{out} \quad (3.11)$$

Sin embargo, el estado transitorio se puede considerar como

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_c = m_{cu} (C_p)_{cu} \frac{dT_{\omega}}{dt} \quad (3.12)$$

donde la potencia extraída por el agua de refrigeración $\dot{Q}_c$ se expresa a través de la ley de convección de Newton de la siguiente manera

$$\dot{Q}_c = hA_{\omega} (T_{\omega} - T_f) \quad (3.13)$$

Sustituyendo la ecuación 3.13 en la ecuación 3.12 y agrupando términos, se obtiene una ecuación diferencial no homogénea, a saber,

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{m_{cu} (C_p)_{cu}} + \frac{hA_{\omega} T_f}{m_{cu} (C_p)_{cu}} = \frac{dT_{\omega}}{dt} + \frac{hA_{\omega} T_{\omega}}{m_{cu} (C_p)_{cu}} \quad (3.14)$$

La solución de la ecuación diferencial es

$$T_{\omega} = \frac{\dot{Q}_{in} + hA_{\omega} T_f}{hA_{\omega}} - \left(\frac{\dot{Q}_{in}}{hA_{\omega}} \right) \exp \left(- \frac{hA_{\omega}}{m_{cu} C_p} t \right) \quad (3.15)$$

El tiempo requerido para llegar al estado permanente del sistema se define como

$$\tau = \frac{m_{cu} C_p}{hA_{\omega}} \quad (3.16)$$

La figura 3.20 muestra la respuesta del tiempo de respuesta para las seis geometrías. En esta figura se observa que el tiempo de respuesta para las geometrías B4 presenta el menor tiempo de respuesta. Considerando que las geometrías B tienen una mayor absortividad aparente y presentan el menor tiempo de respuesta que la geometría C que las geometrías de las familias 1 y 4 son similares, se puede concluir que la geometría óptima es la B4. Con base en esta geometría se propuso el diseño de las componentes del calorímetro.

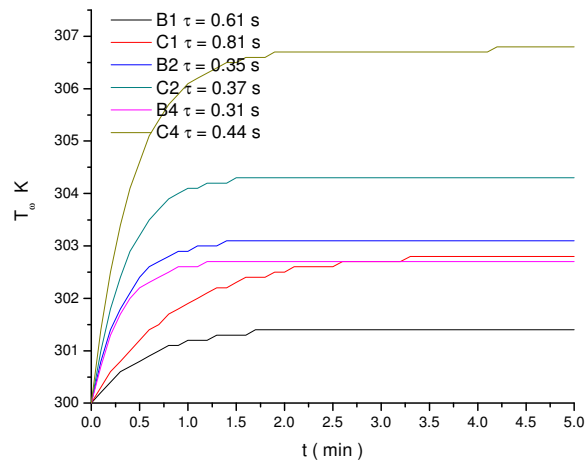


Figura 3.20. Distribución de la temperatura promedio en función del tiempo.

3.7. Dimensiones propuestas para CAVIRAD

Con base en el estudio paramétrico, la modelación de la transferencia de calor en la cavidad y la determinación de la constante de tiempo para cada uno de las geometrías propuestas, se toman la geometría B4 como los parámetros de diseño óptimos para la construcción del receptor cónico de CAVIRAD. Los parámetros del cono receptor se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Parámetros de diseño del cono receptor.

Parámetro	Rango
R_a	5, 7.5 y 10 mm
ξ	0.5 y 0.75
R_o	20 mm
ω	15°
L	74.6 mm

Al plantear el problema físico del dispositivo se determinaron las ecuaciones básicas para el cálculo de la densidad de flujo radiativo concentrado. Por otra parte, al analizar los parámetros geométricos en función tanto de sus propiedades ópticas como de su peso, se determinaron las cotas dentro de las cuales la cavidad presenta una emitancia aparente por encima de 0.99 y con una masa menor a 250 gramos. Con estas cotas se determinaron una serie de cuatro familias de geometrías. Con las doce geometrías se realizó el trazado de rayos y se determinó la densidad de potencia concentra en función de la masa, donde se seleccionaron las seis geometrías con la mayor densidad. Y por último, con estas

geometrías se realizó un modelo de transferencia de calor para cada una de ellas donde se determinaron las zonas de mayor temperatura y sus respectivos coeficientes convectivos que permitieron determinar el tiempo de respuesta para y así seleccionar la geometría que presento el menor tiempo posible.

En el siguiente capítulo se presenta el desarrollo del diseño y construcción de CAVIRAD con base en los parámetros de diseño seleccionados en este capítulo.

Capítulo 4

Diseño del calorímetro / radiómetro (CAVIRAD)

En este capítulo se presenta la descripción de cada uno de los sistemas del dispositivo y de sus componentes, la manera como se ensambla, así como del funcionamiento tanto del calorímetro como del diafragma refrigerado.

4.1. Componentes del dispositivo

Los componentes principales del dispositivo se pueden agrupar en cuatro sistemas principales dependiendo el tipo de función que desempeñan.

El diafragma refrigerado: Es un dispositivo que permite aislar al calorímetro de la radiación incidente, dejando pasar solamente la energía que entrará a través de la abertura, el resto de la energía es reflejada al exterior o absorbida por el agua de refrigeración. El circuito de refrigeración del diafragma es independiente al de la cavidad, con lo cual la energía absorbida por el diafragma, no se considera en el balance energético del calorímetro.

Abertura del diafragma: Es el orificio, tanto del diafragma como de la cavidad, a través del cual pasa la radiación concentrada. Es importante señalar, que la densidad de flujo radiativo evaluado con el dispositivo, es la razón entre el balance energético del calorímetro Q_{sun} medido y el área de la abertura del diafragma A_a .

Calorímetro de cavidad: Es la parte principal del instrumento, en el se realiza el balance energético entre la radiación absorbida por la cavidad y la energía extraída por el fluido de refrigeración. El calorímetro de cavidad cuenta con un cono receptor, donde es absorbida casi en su totalidad la radiación que entra a través de la abertura. La cavidad cónica se encuentra acoplada al cuerpo principal del calorímetro, formando un intersticio entre ambos elementos a través del cual fluye el agua que refrigera la pared del cono.

Transductor: Pueden ser uno o varios sensores de temperatura como termopares T o PT100, conectados de manera diferencial con respecto a la temperatura de entrada del flujo de refrigeración T_e , que se colocan en puntos estratégicos de la pared del cono.

4.2 Descripción general del dispositivo

La metodología para la construcción del calorímetro-radiómetro de cavidad cónica, denominado como CAVIRAD, desde el diseño hasta la puesta en operación fue:

- Definir los parámetros de diseño con base en el análisis de la emitancia aparente, la distribución de flujo radiativo, la modelación térmica del dispositivo y el análisis del tiempo de respuesta.
- Seleccionar los materiales empleados para la construcción del dispositivo con base en la funcionalidad de cada una de los componentes.
- Desarrollar los planos de construcción del calorímetro con base en los parámetros geométricos de diseño y tomando en cuenta las características de operación de cada uno de los componente del dispositivo.

La figura 4.1 muestra un esquema de CAVIRAD con sus principales componentes: el cono receptor con bafle, el diafragma refrigerado y la ventana de la abertura. Por otra parte, se muestra la dirección de los dos flujos de refrigeración: el del calorímetro $\nu_{\text{calorímetro}}$ y el del diafragma $\nu_{\text{diafragma}}$. Ambos flujos son independientes, por lo que la energía absorbida por el diafragma no se transfiere al calorímetro y viceversa, de esta manera sólo permite el paso del flujo radiativo a través de la ventana. Con ello, se garantiza que el diafragma aísla al calorímetro del resto de la energía radiativa incidente en el dispositivo.

La energía radiativa concentrada que incide en el calorímetro, es absorbida por el cono receptor del calorímetro casi en su totalidad ($\alpha_u = 0.99$) y se transfiere al interior del calorímetro por conducción. El agua de refrigeración, que circula a través del intersticio, extrae por convección forzada la energía absorbida. Esta agua entra al calorímetro por el vértice del cono. El flujo de refrigeración recorre todo el receptor, del vértice a la base, donde sale a través de tres salidas distribuidas en la cámara de la base.

4.3 Otras consideraciones de diseño

Además de los parámetros de diseño del cono receptor, el cual es la parte central del dispositivo, existen otros aspectos que requieren ser tomados en cuenta para un óptimo desempeño de CAVIRAD. Estos aspectos contemplan la operación e instrumentación del dispositivo. Los cuales se pueden clasificar de la siguiente manera de acuerdo con el tipo de problemática que resuelven:

1. Materiales a emplear para la construcción de cada componente.
2. Flujo de refrigeración tanto del calorímetro como del diafragma.

3. Ventanas del diafragma.
4. Ángulo de abertura del dispositivo.

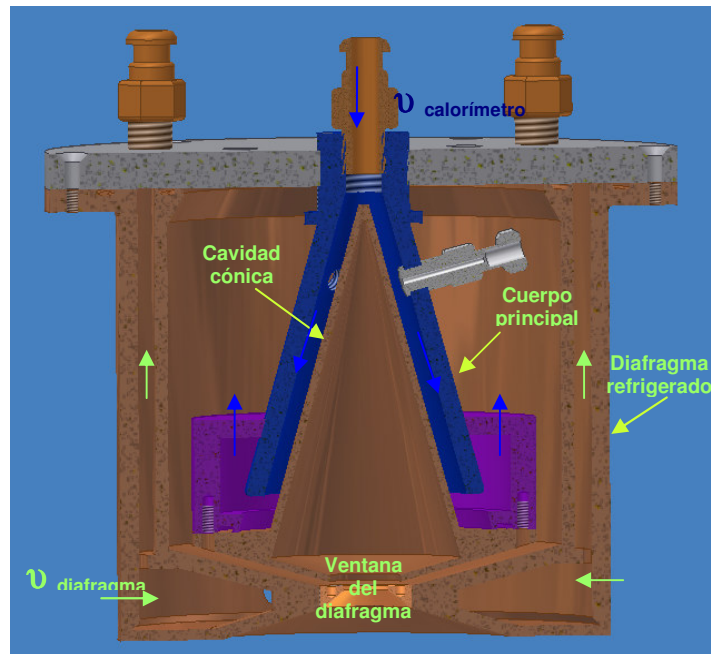


Figura 4.1. Esquema de los sistemas de refrigeración de CAVIRAD.

Materiales

La construcción de las diferentes piezas que constituyen al calorímetro requiere la selección de materiales adecuados a la función de cada componente. Por ello se identifican tres tipos principales de componentes: las sometidas a corrosión, las que requieren una alta conductividad térmica y las componentes que requieren ser aisladas térmicamente.

Debido a que el cuerpo principal del calorímetro tiene la función de conducir el agua de refrigeración. Se requiere que el material seleccionado para su fabricación sea resistente a la corrosión y tenga una baja conductividad térmica. Esto último ayudará a que el calorímetro sea lo más adiabático posible. Para ello se seleccionó el acero inoxidable AISI 316, debido a que es un material resistente a la corrosión, fácil de ser maquinado y es 26.9 veces menos conductor del calor que el cobre [Incropera, 1999].

Para seleccionar el material empleado para la construcción del cono receptor, se emplean otros criterios. El primero y más importante, para esta pieza se requiere de una alta conductividad térmica a través de su pared, esto con la finalidad de que no exista una concentración de energía que produzca un incremento de la temperatura de manera puntual. El segundo criterio fue que el material debe contar con una alta difusividad térmica que permita la rápida transferencia de calor

y de esa manera reducir el tiempo de respuesta del dispositivo. El material seleccionado para construir este dispositivo que cumple con estas características y se encuentra comercialmente fue el cobre. Cabe señalar que también se consideró el costo del material en su selección.

Los criterios que se tomaron para la selección del material del diafragma refrigerado fueron similares a los del cono receptor, ya que se deseaba que la radiación incidente en la cara frontal del diafragma fuera reflejada al medio ambiente o bien absorbida por sus paredes. Esto no representaría ningún problema, debido a que la energía absorbida sería extraída fuera del dispositivo por el agua de refrigeración. Para ello este dispositivo requería de una muy buena conductividad térmica.

La tapadera del diafragma que es la pieza que une el cuerpo del calorímetro al diafragma, debe tener una baja conductividad térmica para aislar ambos sistemas. Se propuso esta pieza que fuera de Nylamid Polyamida (Nylon).

Tipo de flujo de refrigeración

Se hace pasar el agua de refrigeración, en un flujo cónico, a lo largo de la pared del receptor del vértice a la base, donde se extrae a través de una cámara que homogeniza la salida, para garantizar un flujo desarrollado y homogéneo en todo el calorímetro.

Ventana del diafragma

La ventana del diafragma es un disco de cobre que se coloca al centro del dispositivo, el cual actúa como tamiz de la radiación que inciden en la cara del diafragma, dejando pasar a través de la abertura únicamente la potencia radiativa del área de dicha abertura. Esta ventana puede ser remplazada por otra de un área diferente, con lo cual el dispositivo tiene una gran versatilidad, debido a que se puede variar con el área que define la densidad de radiación concentrada a ser medida.

4.4 Descripción de los componentes de CAVIRAD

Las partes principales que constituyen el calorímetro son: cuerpo principal, cono receptor, tapadera del diafragma, diafragma refrigerado y ventanas del diafragma intercambiables. De las cuales se presenta a continuación:

Cuerpo principal

El cuerpo principal del calorímetro fue construido en dos piezas de acero inoxidable AISI 316, las cuales fueron soldadas entre sí: el cono y la cámara distribuidora del flujo de refrigeración. El cuerpo principal consiste de un cilindro hueco que tiene una abertura de 0.78 cm de diámetro en la parte superior. Esta abertura tiene rosca interna de 1/8" NPT para poder ser acoplada a diferentes

conectores o válvulas. En la base de este cilindro se abre un cono con un ángulo de apertura de 15° con una altura de 6.3 cm y un diámetro en la base de 5.15 cm y un espesor de pared de 4 mm. El ángulo de apertura del cono del cuerpo principal es el mismo que el del receptor cónico del calorímetro; como ya se ha mencionado anteriormente, entre ambos se forma la cámara de enfriamiento del receptor. Todas las paredes del cuerpo del receptor se construyeron con un espesor constante de 4 mm. La figura 4.2 muestra un corte transversal de esta pieza y una foto de la pieza terminada, la cual se ensambla al resto del calorímetro. Para evitar fugas del agua de refrigeración, la cámara cuenta con un canal, en la cara en contacto con el cono receptor, para alojar un sello de fluoro-elastómero (VITON) de 0.16 cm ($1/16$) de espesor que resiste temperaturas hasta de 204°C .

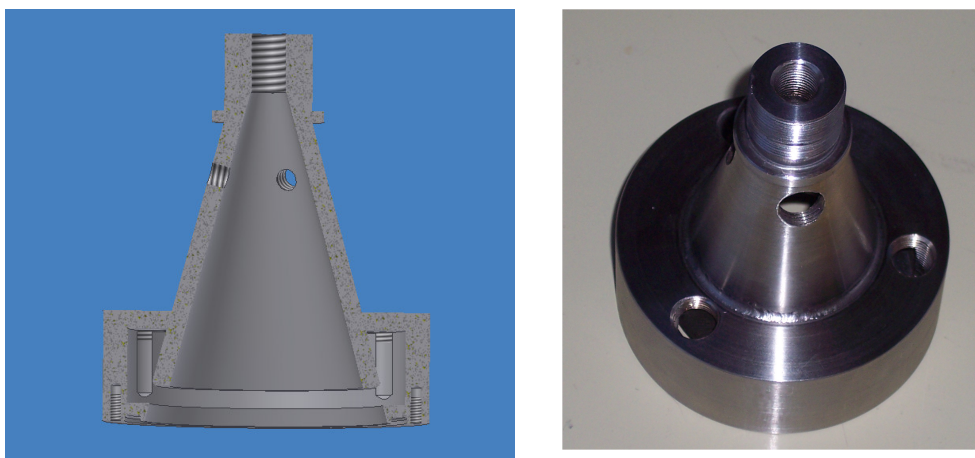


Figura 4.2. Corte trasversal y fotografía del cuerpo principal del calorímetro.

Cono receptor

La figura 4.3 muestra una vista en 3D y fotografía del cono receptor. Esta es la pieza fundamental del calorímetro, la cual se construyó con base en el análisis paramétrico de diseño. El material empleado para su construcción fue cobre y las paredes tienen un espesor uniforme de 1.5 mm. Este elemento se construyó de dos partes, las cuales fueron soldadas entre si con plata. Una de estas dos piezas es el “baffle”, el cual es un disco con diámetro de 7.4 cm y que tiene un agujero circular en su centro con diámetro de apertura de 1.5 cm (máximo diámetro de la ventana del diafragma). La parte inferior del baffle tiene una conicidad de 148.2° la cual le permite asentar dentro del diafragma sin que exista contacto entre el cono receptor y el diafragma refrigerado. La periferia del baffle cuenta con bridas para sujetar al receptor al cuerpo del calorímetro con tornillos, como se observa en la figura 4.1.



Figura 4.3. Corte trasversal y fotografía del cono receptor.

Tapadera del diafragma

La figura 4.4 muestra un esquema y una fotografía de la tapadera posterior del diafragma, la cual, tiene la doble finalidad de sostener al calorímetro y cerrar herméticamente la cámara de refrigeración del diafragma. Esta pieza consiste en un disco de acero inoxidable con un espesor de 5 mm y cuenta con tres salidas para el flujo de refrigeración distribuidas de manera equidistante las cuales coinciden con el intersticio del diafragma como se puede observar en la figura 4.1.



Figura 4.4. Fotografía de la tapadera del diafragma.

Diafragma refrigerado

La figura 4.5 muestra esquema y fotografía del diafragma refrigerado, el cual consiste básicamente en un recipiente cilíndrico, con doble pared. Entre ambas paredes se forma un intersticio de 5 mm, por donde fluye el agua de refrigeración. Dentro de este diafragma se aloja el calorímetro sin que exista contacto con las paredes. En la base del diafragma se tiene una abertura con rosca, a través de la cual, se acopla la ventana, la cual define el área de la abertura del dispositivo. Una vez acoplado el calorímetro a la tapadera del diafragma y este a su vez dentro del diafragma se puede ajustar la posición del calorímetro dentro del diafragma, para que en combinación con la ventana se ajuste el ángulo de aceptación del dispositivo.

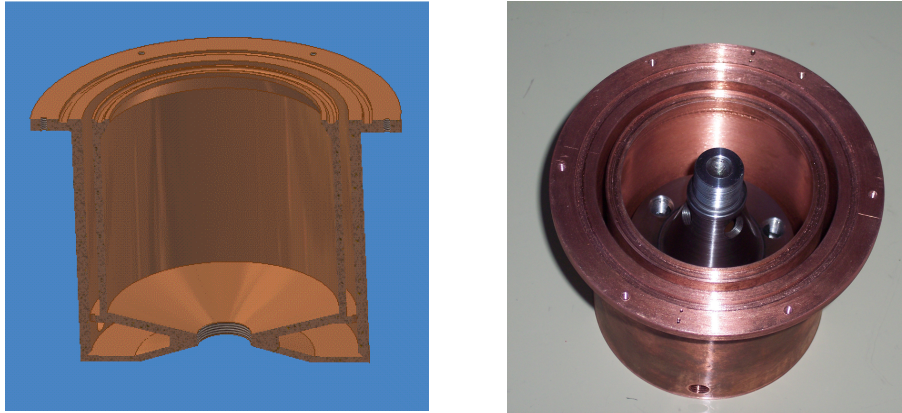


Figura 4.5. Corte transversal y fotografía del diafragma refrigerado, donde se muestra el cuerpo principal ya colocado adentro del diafragma.

Ventana del diafragma

La figura 4.6 muestra esquema y fotografía de la ventana del diafragma, la cual consiste básicamente de un disco de cobre con una abertura central, que define el área de abertura del dispositivo. Esta área determina la potencia que va a entrar al calorímetro para ser medida. Por ello se fabricaron cuatro ventanas con diferentes diámetros de abertura: 5, 7.5, 10 y 15 mm. Cabe destacar que a través de la exposición de la ventana al flujo radiativo concentrado, ésta sufrió oxidación. La capa de óxido del cobre tiene una alta absorptancia ($\alpha \cong 0.8$).

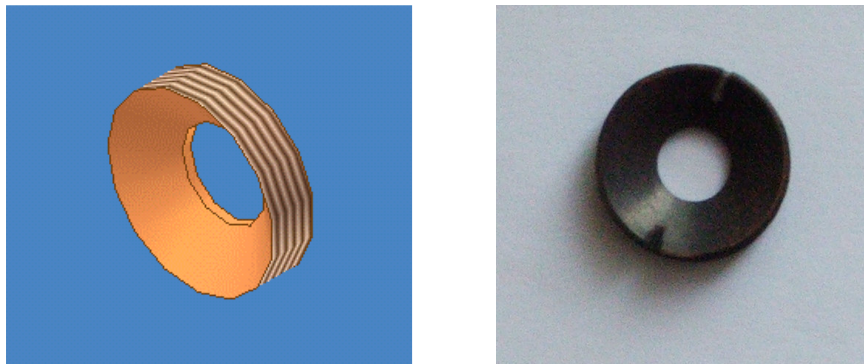


Figura 4.6. Esquema y fotografía de la ventana del diafragma.

Una vez que se determinaron las componentes del dispositivo, la funcionalidad de cada una de ellas y sus características, se hace una selección de materiales y de criterios de operación de CAVIRAD. En el siguiente capítulo se plantea el arreglo experimental y la metodología a seguir para la prueba y caracterización del dispositivo.

Capítulo 5

Diseño Experimental y Operación del Sistema

En este capítulo se presenta la instrumentación y el montaje de CAVIRAD en el concentrador de foco puntual DEFRAC. Por otra parte se presenta la puesta en operación para realizar la caracterización de dicho dispositivo en condiciones definidas de operación.

5.1 Instrumentación y montaje

Para realizar la prueba y caracterización de CAVIRAD se instrumentó y montó el dispositivo en el concentrador de foco puntual DEFRAC. Fue necesario instrumentar la pared del cono receptor para conocer los incrementos de temperatura que se producen en el interior del cono receptor durante la medición de la radiación altamente concentrada.

Instrumentación del dispositivo con termopares

Para emplear a CAVIRAD tanto como calorímetro como radiómetro se requiere instrumentar, tanto la pared del cono receptor, así como los ductos de entrada y salida de agua de refrigeración, con termopares tipo “T”. Los termopares que se emplean para medir la distribución de temperatura en el cono receptor se colocan en la pared que se encuentra en contacto con el agua de refrigeración. El calibre de los termopares empleados para los experimentos fue del número 30, el cual por ser un calibre delgado, tiene una inercia térmica baja y por tanto un tiempo de respuesta rápido menor que un segundo. Además, por sus características estos termopares son adecuados para medir temperaturas en superficie planas sujetos a flujos pequeños [Hernández *et al.*, 2001]. El rango de medición para estos termopares es de -200 a 400 °C. La instrumentación de CAVIRAD se hizo de la siguiente manera:

1. La medición del incremento de temperatura entre la entrada y la salida del agua de refrigeración, se realizó con dos termopares, etiquetados como T_e y T_s respectivamente. Ambos termopares se colocaron a través de un pasamuros

dentro de una conexión en T, a la mitad del diámetro de los ductos, con esto se garantizó que la medición que se realizó de cada una de la temperaturas fue lo más próxima a la temperatura promedio de la diferencia entre ambas, ver figura 5.1.

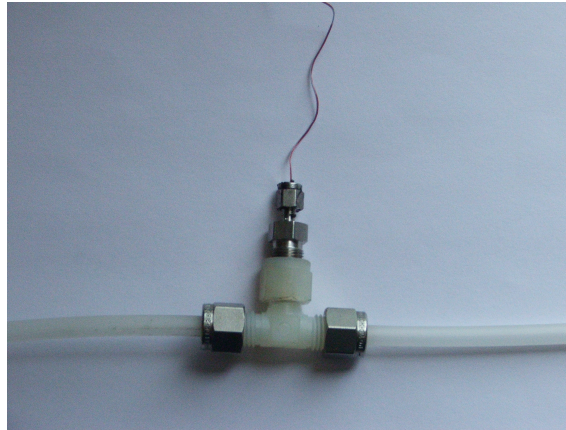


Figura 5.1. Pasa muros de los termopares de entrada y salida de CAVIRAD.

2. La medición de los incrementos de temperatura de la pared del cono receptor se realizó colocando tres termopares tipo “T” en pequeños pozos en la pared que se encuentra en contacto con el agua de refrigeración. Los termopares se colocaron de la siguiente manera: T_v en el vértice, T_m en el punto medio, que corresponde a la mitad de la longitud del cono, y T_{bi} en la base, como se muestra en el esquema de la figura 5.2. Para determinar los saltos de temperatura en la base del receptor, se colocó un cuarto termopar embebido en el bafle del receptor T_{be} . Para prevenir cualquier tipo de sobre calentamiento en el dispositivo, se instrumenta con un termopar cercano a la abertura del diafragma T_d , el cual manda una alarma para detener la experimentación cuando este sobrepasa los 200 °C.
3. La medición de la temperatura del medio ambiente (T_a) se realizó de igual manera con un termopar tipo “T”, del mismo calibre que los anteriores, cabe señalar que para la ubicación de este termopar se buscó que la radiación no lo tocara y se encontrara lo más próximo al calorímetro.

Sistema de adquisición de temperaturas y radiación

Para el registro automático de los datos que se obtienen durante las pruebas experimentales se empleó un sistema de adquisición de datos, el cual consiste en una tarjeta multiplexora de 20 canales HP 349001A, una unidad adquisidora de datos Agilent 34970 A y controlada con un software HP BenchLink Data Logger, el cual almacenó los datos en una PC conforme se fueron generando. Este equipo de adquisición de datos tiene las ventajas de convertir la señal de los termopares

de milivolts a valor digital con 2 cifras significativas de temperatura ya que el sistema aplica de manera interna el polinomio de transformación. Los valores de las temperaturas, el flujo volumétrico y la radiación directa se fueron almacenando en una base de datos cada segundo.

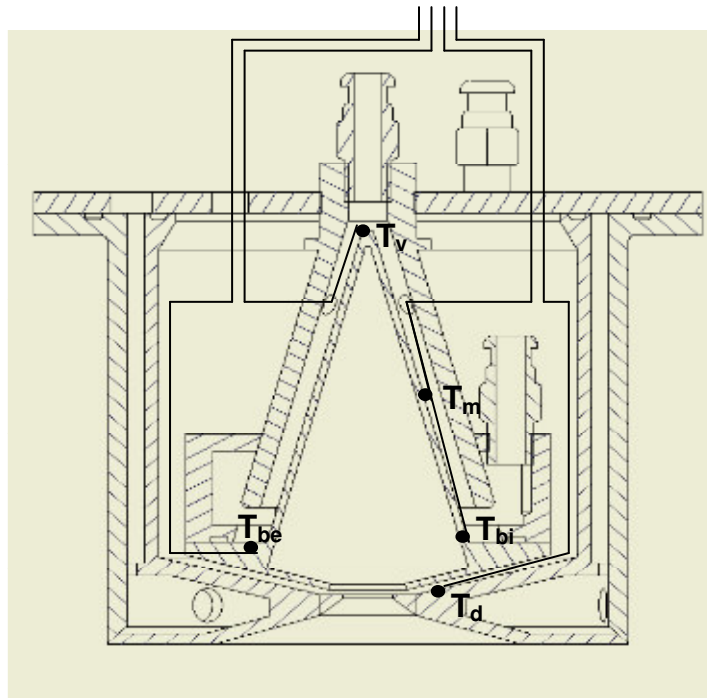


Figura 5.2. Vista esquemática de la instrumentación de CAVICAL.

Pirheliómetro

Para conocer la cantidad de radiación Solar disponible que llegó al DEFRAC durante la experimentación se midió el flujo radiativo directo G_d incidente en el plano de los espejos concentradores. Esta medición se realizó con un pirheliómetro, el cual consiste en una termopila que se encuentra dentro de un cilindro con diafragma que permiten entrar radiación solar directa. Para hacer la medición durante todo el tiempo de experimentación, se acopla este dispositivo a una montura ecuatorial con seguimiento constante del Sol. El equipo empleado fue un pirheliómetro con seguimiento modelo NIP marca Eppley (con número de serie 31821E6), el cual hasta su última calibración en enero del 2006 tenía la constante $8.33 \times 10^{-6} \text{ V m}^2 \text{ W}^{-1}$ (figura 5.3).

Ensamble del calorímetro

Con todas las piezas del calorímetro listas y fijados previamente todos los termopares en su sitio, tanto en la pared del cono receptor como a la entrada y salida del flujo de refrigeración del calorímetro (ver la figura 5.2), se ensambla el calorímetro de la siguiente manera:

1. Con cuidado de no maltratar los termopares, se colocan los sellos en cada una de las piezas del calorímetro fijándolos con silicón.
2. Se atornilla el receptor cónico a la cámara receptora del flujo con presión para evitar fugas y garantizar que el sello empalme bien.
3. Una vez que se tienen el calorímetro ensamblado, se introduce en el diafragma refrigerado.



Figura 5.3. Pirheliómetro con el equipo de seguimiento del Sol.

El calorímetro armado se puede ver en la figura 5.4, donde se encuentra dentro del diafragma refrigerado, listo para realizar las pruebas experimentales.

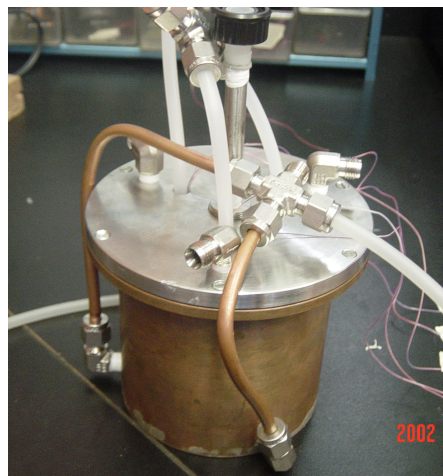


Figura 5.4. CAVIRAD armado e instrumentado listo para hacer experimentación.

Flujo de agua en el calorímetro

Debido a que una de las variables más importantes durante la experimentación es el flujo másico del agua de refrigeración, es importante que tanto este flujo, así como su temperatura a la entrada, sean constantes durante todo el experimento. Para lograr estas dos condiciones se usó un tanque aislado, elevado a una altura de 5 metros (altura mayor a la requerida para superar la altura física del experimento que es de aproximadamente 3 metros) y las pérdidas hidráulicas a través de todas las mangueras y conexiones. Cabe mencionar que para mantener la misma altura hidráulica, y con ello garantizar la misma presión a la salida del calorímetro se hace circular agua al tanque elevado continuamente hasta el límite donde éste bordea el agua excedente.

5.2 Operación del sistema experimental

Cuando se realizan estudios de radiación solar con un concentrador de altos flujos radiativos como el DEFRAC, se requiere integrar una serie de sistemas y procedimientos para la instrumentación y operación del equipo. Para tener la radiación solar concentrada por el DEFRAC dentro de la cavidad se requieren los siguientes procedimientos:

- a) Selección del día, orientación y alineación del DEFRAC
- b) Seguimiento del movimiento aparente del Sol por el DEFRAC
- c) Alineación de los espejos

Selección del día, orientación y alineación del DEFRAC

Para hacer experimentación con el DEFRAC, se requiere un día soleado, con un nivel de brillantez alto y cielo despejado, es decir, para poder realizar la experimentación se requiere un flujo radiativo directo mayor que 800 W m^{-2} al menos durante 5 minutos. Esto permite alcanzar un estado estacionario en el experimento.

El DEFRAC, como todo sistema de concentración solar de foco puntual, aprovecha sólo la componente directa de la radiación solar. Por ello se requiere que el sistema esté orientado de tal manera que los rayos solares siempre incidan paralelos al eje óptico del dispositivo. El eje principal del DEFRAC es perpendicular al plano del marco hexagonal que soporta a los 18 espejos, por lo cual este plano hexagonal debe estar siempre perpendicular a los rayos solares. Cada espejo sobre este marco hexagonal tiene una orientación fija, de forma tal que el centro de la imagen solar que proyecta sobre el receptor debe coincidir con los centros de las imágenes de los otros espejos. El DEFRAC tiene montura ecuatorial, esto implica que para conseguir el seguimiento solar debe de orientarse de tal manera que el eje principal quede paralelo al eje de rotación de la Tierra. La inclinación del eje principal con respecto a la horizontal es igual a la latitud del CIE, de $\phi = 18^\circ 50'$. Basta con orientar el concentrador en la dirección del eje norte-sur

geográfico para que el eje terrestre y el principal del DEFRAC queden paralelos (figura 1.2).

La inclinación del plano que forma la trayectoria del Sol a lo largo de un día, a la cual se le denomina declinación δ , es constante. Sin embargo esta inclinación depende del día del año. Con lo cual se requiere ajustar el plano de los espejos para tener una orientación perpendicular a la dirección del Sol. Para ello se ajusta el ángulo del marco hexagonal con respecto al plano del marco principal al ángulo de declinación δ para el día de la experimentación.

Seguimiento del DEFRAC

Para mantener el plano hexagonal del DEFRAC perpendicular a la dirección del Sol durante toda la experimentación, se requiere girar el marco principal sobre su eje por medio del sistema de seguimiento. Este sistema consiste en un servo motor de corriente directa, el cual está acoplado a un reductor de velocidad con relación 100:1. El sistema es controlado por una computadora y tiene dos velocidades de operación; una manual, la cual permite mover al marco principal rápidamente en ambas direcciones, y otra velocidad, automática, la cual hace girar al marco principal por medio de ciclos de arranque y paro marcados por la computadora. El resultado es el giro del marco principal con una velocidad angular Ω de 15° h^{-1} , velocidad necesaria para el seguimiento del movimiento aparente del sol [Pérez-Rábago, 2003].

Para alinear al DEFRAC con el Sol, se orienta el marco principal manualmente en ambos sentidos hasta hacer que la sombra que proyecta el disco superior del receptor sobre el disco inferior del concentrador se encuentre en el centro. Con ello se garantiza que el eje óptico del sistema sea paralelo a la dirección de Sol, como se observa en la figura 5.5a.

Para centrar esta sombra en el disco inferior, se tiene que tomar en cuenta que ambos discos son del mismo diámetro y dado que la distancia entre ambos discos es de 2.95 m y considerando que el cono solar es de $16''$, la proyección de la imagen del disco superior sobre el inferior se reduce en 2.6 cm con respecto al disco inferior, como se observa en la figura 5.5b.

Una vez orientado y alineado hacia el Sol el DEFRAC, se inicia el seguimiento del movimiento aparente con la velocidad automática del sistema de control. Cabe mencionar que este tipo de control es de lazo abierto, es decir, no existe retroalimentación de la posición del Sol con respecto a la inclinación del marco principal.

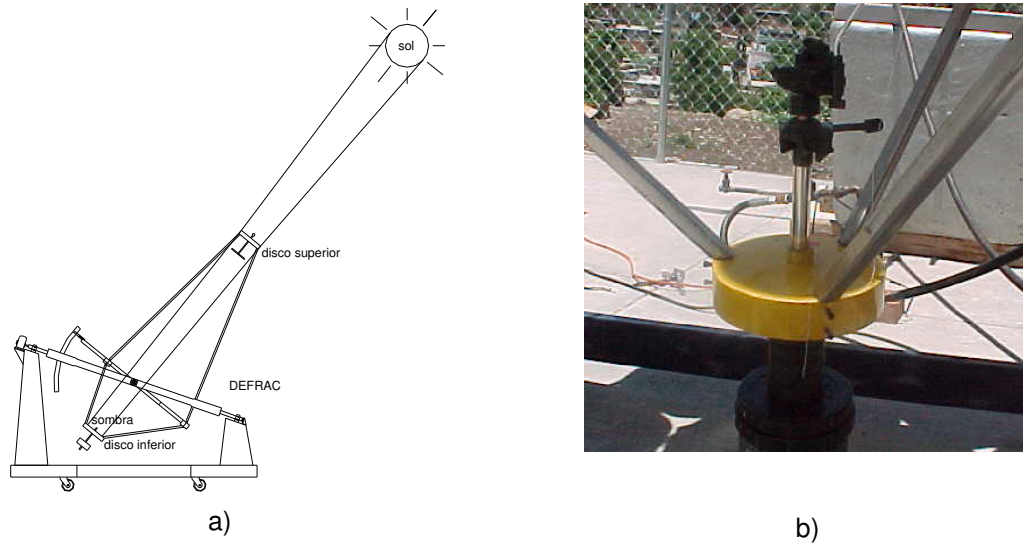


Figura 5.5. a) Proyección del disco superior en el disco inferior, b) imagen del ajuste de la sombra en el disco inferior.

Enfoque de los espejos

Debido a que existen tres diferentes distancias entre el centro de los espejos y el eje del sistema óptico del DEFRAC, se designan tres grupos de 6 espejos cada uno, llamados Grupos A, B y C [Jaramillo *et al.*, 2007]. Esta clasificación se muestra en la figura 5.6.

Se fijó la distancia de la abertura del diafragma de CAVIRAD a una distancia de 202.5 cm con respecto a la base del marco hexagonal, que es ligeramente mayor (3.7 cm) que la distancia donde coinciden los puntos focales de los tres grupos de espejos, para garantizar que el punto focal del concentrador queda dentro de la cavidad.

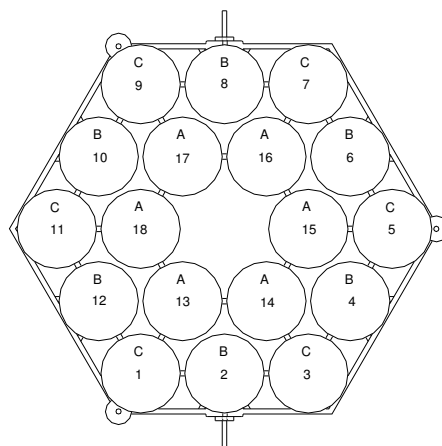


Figura 5.6. Clasificación de los espejos por su distancia al eje principal del DEFRAC.

Una vez ajustado CAVIRAD a la distancia focal del sistema, se enfoca cada uno de los espejos colocando la mancha solar en el borde de la cara del diafragma

refrigerado y centrando la imagen formada por cada uno de los espejos. Posteriormente se enfocaron y se superpusieron cada espejo a la imagen del espejo anterior, como se muestra la figura 5.7.a.

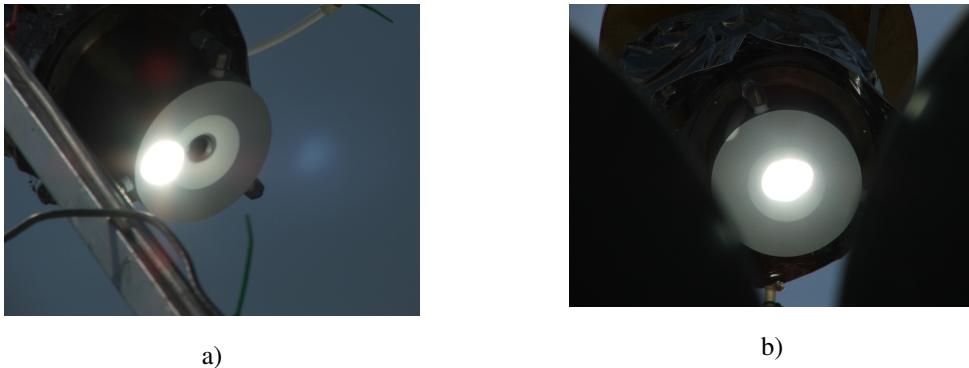


Figura 5.7. Ajuste de espejos del concentrador, a) muestra como la imagen solar se encuentra en la periferia de la abertura del diafragma b) muestra como los espejos ajustados forman una sola imagen dentro de la abertura.

5.3 Diseño experimental

Para verificar la operación del dispositivo, así como llevar a cabo su caracterización, se diseñó una serie de experimentos con diferentes parámetros a ser analizados. Se propuso un conjunto de tres tipos diferentes de experimentos que se describen a continuación.

5.4 Metodología experimental

Para determinar la potencia térmica extraída por el agua de refrigeración de la pared del receptor $\dot{Q}_c$ se miden, tanto el caudal de agua de refrigeración $\dot{V}$, como la diferencia de temperaturas entre la entrada (T_e) y salida (T_s) del flujo de refrigeración.

Para encontrar la correlación entre el flujo incidente en CAVIRAD y la distribución de temperaturas en la pared del receptor, se idearon tres tipos diferentes de experimentos:

Experimento 1 (Medición con seguimiento)

Se enfocó la mancha solar concentrada en la periferia de la abertura del diafragma. Posteriormente se desplazó el concentrador para lograr que el centro de la mancha entrara a través de la abertura y se operó el concentrador en modo de seguimiento del movimiento aparente del Sol durante un periodo de 4 minutos. Por último, se puso en reversa el sistema de seguimiento para que la mancha se colocara fuera de la ventana del diafragma. Esta misma prueba se realizó para varias dimensiones de ventanas y para diferentes caudales de refrigeración.

Experimento 2 (Medición sin seguimiento)

Se enfocó la mancha solar concentrada en la periferia oeste de la abertura del diafragma determinando el seguimiento del concentrador. La mancha solar concentrada se fue desplazando hacia el este, a la velocidad normal de rotación de la tierra, pasando por el centro de la abertura del diafragma y saliendo finalmente de la abertura en la zona este del diafragma. Durante toda la prueba se capturan los datos de temperatura de todo el instrumento, así como el caudal de refrigeración. Por último, se tomaron imágenes CCD en tres momentos de la experimentación: cuando la mancha se encontraba completamente fuera en la zona oeste del diafragma, en el centro de la abertura y por ultimo cuando la imagen se encontraba en la zona este del diafragma. Esto con objeto de correlacionar la medición de CAVIRAD con la distribución de las imágenes.

Experimento 3 (Calibración de CAVIRAD)

Se repitió el mismo procedimiento de la metodología con seguimiento, fijando un caudal de refrigeración y el diámetro de la abertura de la ventana del diafragma. El experimento se inició con la concentración de los 18 espejos del DEFRAC [Pérez-Rábago *et al.*, 2006]. Posteriormente se repitió el mismo procedimiento pero tapando dos espejos. Esto se continuó hasta llegar a concentrar sólo con 2 espejos. Con esto se obtuvieron una serie de 9 puntos con los que se puede hacer la regresión de los resultados para poder calibrar al instrumento para las mismas condiciones de caudal y área de abertura.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados experimentales con CAVIRAD con la metodología antes expuesta.

Capítulo 6

Análisis y Resultados

En este capítulo se presenta los resultados experimentales obtenidos con CAVIRAD durante la campaña experimental de pruebas y caracterización para condiciones específicas de operación. Como ya se mencionó en el capítulo anterior, para encontrar la correlación entre la densidad de radiación altamente concentrada y la diferencia de temperatura medida en CAVIRAD, se desarrollaron dos metodologías experimentales: con seguimiento aparente del Sol y sin seguimiento. Por último, para caracterizar el dispositivo, se realizó la experimentación con el seguimiento, haciendo variar el número de espejos empleados para la concentración, teniendo diferentes niveles de densidad radiativa concentrada incidiendo en la cavidad.

6.1 Experimentación con seguimiento Solar

El experimento constó de siete pruebas, las cuales se realizaron con dos diámetros diferentes de ventanas (15 y 10 mm y dos caudales de refrigeración diferentes ($v_{in} = 1.61$ y 1.01 l min^{-1}). Se realizaron cada una de las pruebas en un tiempo de 4 minutos, garantizando que el dispositivo en cada prueba alcanzó el estado estacionario.

Las condiciones para la primera prueba experimental fueron:

- Se emplearon 12 de los 18 espejos del DEFRAC (un área de 0.84 m^2).
- El caudal del agua de refrigeración fue de $v_{in} = 1.61 \pm 0.04 \text{ l min}^{-1}$
- La radiación directa fue de $G_b = 766 \pm 6 \text{ W m}^{-2}$.

La figura 6.1 muestra el comportamiento de las temperaturas medidas en el calorímetro durante la prueba experimental número 1. Las temperaturas medidas fueron tanto las de la pared del cono interior del receptor como las del flujo de

refrigeración, tanto a la entrada como a la salida del calorímetro. En esta gráfica se observa que todas las temperaturas, a excepción de la del diafragma T_d , tienden al estado estacionario en menos de 10 segundos. Por otra parte, se observa que al inicio de la experimentación, cuando aún no incide la mancha solar concentrada en la abertura del diafragma, todas las temperaturas son iguales con la temperatura de entrada del flujo de refrigeración. En el momento que la mancha Solar concentrada entra a través de la abertura del diafragma, todas las temperaturas aumentan hasta llegar al estado estacionario. En el momento que se desfoca la mancha Solar y esta sale de la abertura del diafragma. Todas las temperaturas del dispositivo tienden a igualarse nuevamente a T_e .

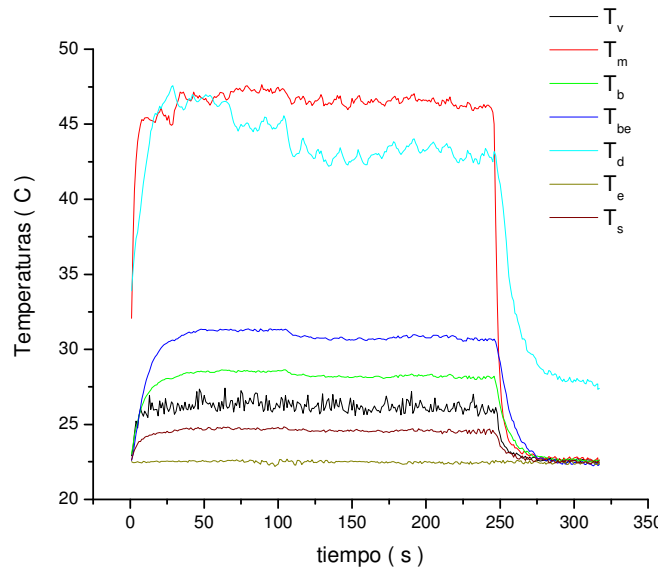


Figura 6.1: Distribución de temperaturas en el calorímetro para la prueba 1

Por otra parte, si se considera que el calorímetro se encuentra en equilibrio térmico con el agua de refrigeración, cuando no incide radiación en la abertura del dispositivo, se puede considerar la temperatura de entrada de refrigeración T_e como la temperatura de referencia y con ello expresar cada una de las temperaturas del dispositivo de la siguiente manera:

$$\Delta T_i = T_i - T_e \quad (6.1)$$

La figura 6.2 muestra el comportamiento del salto térmico en el agua de refrigeración para esta prueba, el cual alcanza el estado estacionario en un tiempo de 7.2 segundos, con una diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del flujo de refrigeración de 2.1 °C. Este tiempo de respuesta resulta ser un indicador de cual es la inercia térmica del dispositivo en conjunto para las condiciones dadas: un caudal de 1.6 l min⁻¹ y con una abertura en el diafragma de 15 mm de diámetro.

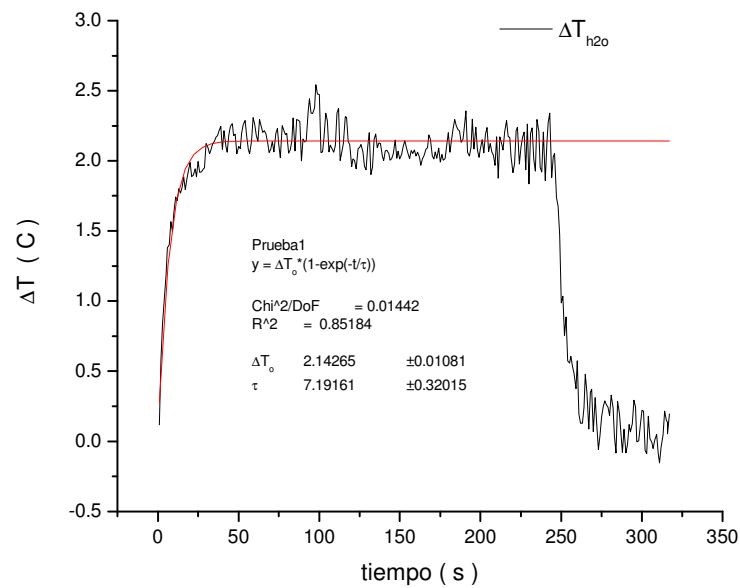


Figura 6.2: Comportamiento de los ΔT del agua de refrigeración para la prueba 1.

En la Figura 6.3 se presenta el comportamiento de las diferencias de temperaturas de los tres puntos principales de la pared del cono receptor a lo largo de esta misma prueba experimental. Los puntos que se registraron fueron: el vértice ΔT_v , el centro del cono ΔT_m y la base ΔT_b los cuales se muestran en el diagrama.

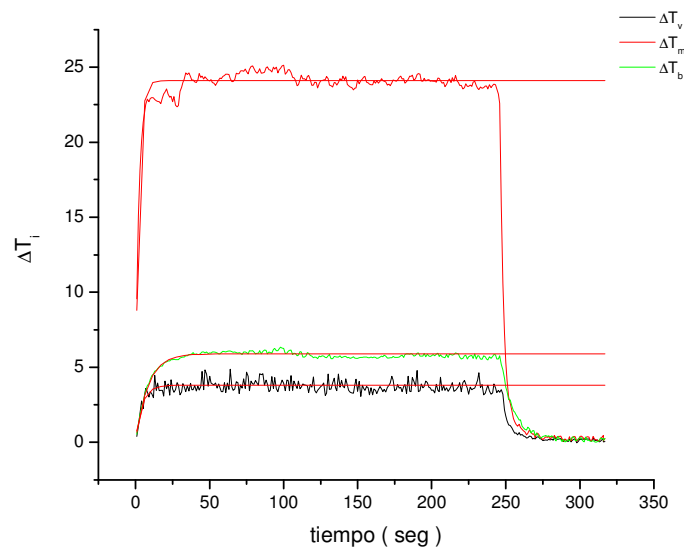


Figura 6.3: Comportamiento de los ΔT_i para la prueba 1 y ajustes exponenciales

En la gráfica 6.3 se observa la aproximación de los resultados experimentales a una ecuación exponencial de la forma:

$$\Delta T_i = \Delta T_{io} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right) \quad (6.2)$$

donde ΔT_{io} se considera como la diferencia de temperaturas en estado estacionario de la medición y τ el tiempo de respuesta. En este caso se obtiene que el tiempo de respuesta con mayor retardo del instrumento corresponda a la base del cono (8.3 segundos) y el punto medio presenta el tiempo de respuesta más rápido (2.2 segundos) con la mayor diferencia de temperaturas y la mayor desviación estándar, como se muestra en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Tiempos de respuesta de CAVIRAD

Punto de la pared	ΔT_{io}	τ
ΔT_v	3.79 ± 0.03	4.4 ± 0.4
ΔT_m	24.10 ± 0.05	2.2 ± 0.1
ΔT_b	5.89 ± 0.02	8.3 ± 0.2

Al tomar en cuenta cada uno de los tiempos de respuestas de los tres puntos con el peso de una de las tres zonas, y con ello determinar un tiempo de respuesta promedio, se obtiene un valor que resulta semejante al tiempo de respuesta obtenido a través de la calorimetría. Por otra parte, se observa que en la zona media (ΔT_m), donde incide el pico de radiación, existe una oscilación con una periodicidad de 19 segundos. Este período coincide con el movimiento del seguimiento del DEFRAC más el tiempo de respuesta de éste punto.

La Figura 6.4 muestra la densidad de radiación concentrada ϕ que entra a través del área de la abertura A_{ab} en las tres primeras pruebas (1,2 y 3), las cuales se hicieron con diámetros distintos en la abertura; 15, 10 y 7.5 mm respectivamente. La densidad de flujo concentrado se define como:

$$\phi = \frac{\dot{Q}_{sun}}{A_{ab}} \quad (6.3)$$

Si se considera que la absortividad de la cavidad es $\alpha_{ap} \cong 0.99$ y las pérdidas tanto convectivas como radiativas son prácticamente despreciables, se puede tener una primera aproximación de la energía que entra a través de la cavidad $\dot{Q}_{sun}$ a la energía que es extraída de manera calorimétrica por el agua de refrigeración:

$$\dot{Q}_{sun} = \dot{Q}_c \quad (6.4)$$

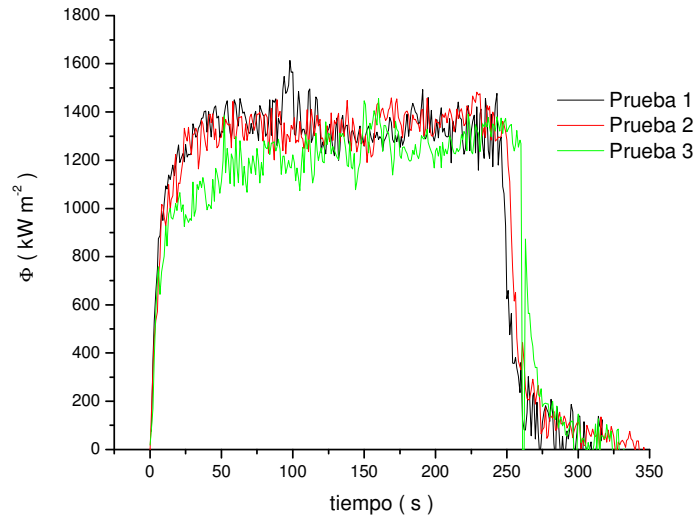


Figura 6.4: Medición del flujo radiativo concentrado para las pruebas 1,2 y 3.

En esta figura se observa que las pruebas 1 y 2 tienen un comportamiento estacionario, pero la prueba 3 presenta un retardo debido principalmente al seguimiento del DEFRAC.

La tabla 6.2 muestra el resumen de los resultados de toda la experimentación: El incremento en la temperatura del agua de refrigeración ΔT_{agua} , el tiempo de respuesta calorimétrico τ_{agua} y la densidad de flujo radiativo Φ . En esta tabla las pruebas se clasifican en tres grupos, dependiendo del área de la ventana del diafragma y del caudal de refrigeración. Con estos resultados se observa que la prueba 6 presentó discrepancias, ya que Φ presentó un incremento fuera de la incertidumbre del resto de las pruebas. Esto se debió a que los errores de seguimiento se encuentran en la banda de incertidumbre.

Tabla 6.2: Resultados calorimétricos de las mediciones realizadas con CAVIRAD

	G_b W m ⁻²	v_{in} l min ⁻¹	Ven. mm	ΔT_{agua} °C	τ_{agua} s	Q_c W	Φ kW m ⁻²
1	768 ± 6	1.61 ± 0.04	15	2.13 ± 0.15	7.19 ± 0.32	238.03 ± 12.96	1347 ± 73
2	765 ± 1	1.61 ± 0.04	15	2.10 ± 0.13	8.62 ± 0.38	234.97 ± 9.64	1330 ± 55
3	767 ± 2	1.62 ± 0.04	15	1.90 ± 0.14	9.40 ± 0.48	213.72 ± 12.00	1209 ± 68
4	789 ± 1	1.62 ± 0.04	10	0.85 ± 0.13	7.47 ± 0.60	95.79 ± 8.57	1212 ± 109
5	792 ± 2	1.62 ± 0.04	10	0.88 ± 0.12	7.92 ± 0.58	96.78 ± 8.17	1232 ± 104
6	787 ± 1	1.01 ± 0.02	10	1.69 ± 0.13	14.64 ± 0.46	118.52 ± 6.17	1509 ± 79
7	781 ± 2	1.01 ± 0.02	10	1.56 ± 0.13	11.55 ± 0.43	108.76 ± 5.60	1384.83

La tabla 6.3 muestra los promedios tanto de Φ como de τ_{agua} para los tres grupos de experimentos, en donde se observa que la constante de tiempo para los casos donde el flujo de refrigeración se mantuvo constante y cambio el área de abertura de la cavidad, las mediciones fueron las mismas. Sin embargo en el caso donde el caudal de refrigeración disminuyó en 61%, el tiempo de respuesta se incremento en un 56%.

Tabla 6.3: Promedios de Resultados calorimétricos de las mediciones realizadas con CAVIRAD

	Ven. mm	v_{in} $l\ min^{-1}$	Φ $kW\ m^{-2}$	τ_{agua} seg
1	15	1.61 ± 0.02	1295 ± 75	8.4 ± 1.1
2	10	1.62 ± 0.02	1226 ± 9	7.7 ± 0.3
3	10	1.01 ± 0.02	1447 ± 88	13.1 ± 2.2

6.2 Experimentación con calorímetro fijo

Este experimento se realizó sin seguimiento del concentrador, con un tiempo de 4 minutos aproximadamente para cada prueba, el tiempo suficiente para que la mancha solar proyectada en el diafragma tenga un desplazamiento de oeste a este, pasando por el centro de la abertura del diafragma. Las condiciones de operación para estas pruebas fueron:

- El área de concentración empleada para las pruebas experimentales fue de $1.27\ m^2$ (18 espejos).
- El caudal de refrigeración que se fijó en $v_{in} = 0.79 \pm 0.03\ l\ min^{-1}$
- La radiación directa que se tuvo fue de $G_b = 804 \pm 6\ W\ m^{-2}$.

El experimento constó de cuatro pruebas, las cuales se realizaron con una ventana del diafragma de 10 mm de diámetro.

La figura 6.5 muestra el comportamiento de las diferencias de temperaturas medidas con respecto a la temperatura T_e , tanto en la pared como en el flujo de refrigeración. En esta gráfica se observa que todas las diferencias de temperatura siguen un comportamiento con distribución normal, debido al incremento y posterior decaimiento de la energía al paso de la mancha Solar a través de la abertura del diafragma.

Empleando una expresión de amplitud de la función máxima Gaussiana, se aproximaron los resultados experimentales tanto de las diferencias de temperatura, así como del cálculo de la densidad de flujo radiativo incidente Φ a una expresión del siguiente tipo:

$$\Phi = \Phi_o + A \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \tau_o}{\omega}\right)^2\right) \quad (6.5)$$

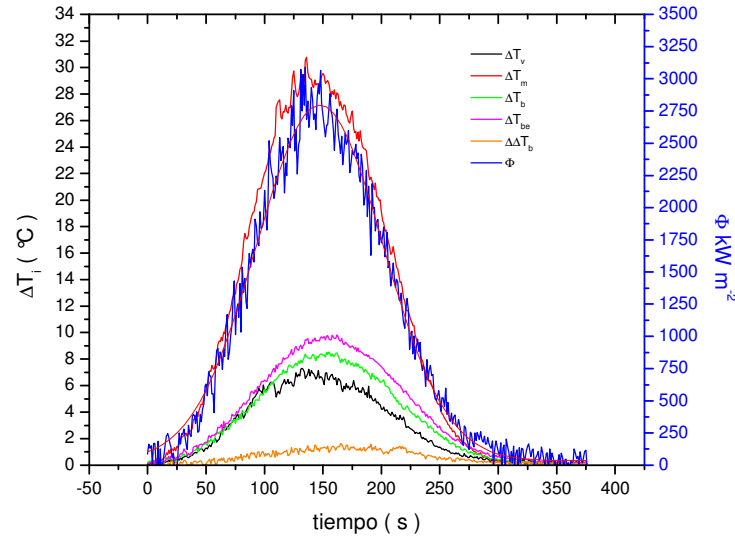


Figura 6.5: Evolución de diferencias de temperaturas en el calorímetro para el experimento con el calorímetro fijo.

Tabla 6.3: Tiempos de respuesta de CAVIRAD

Punto de la pared	
Φ_o	34.93 ± 1.18
τ_c	147.33 ± 0.33
ω	57.11 ± 1.47
A	2761 ± 17

donde Φ_o es la densidad mínima de radiación incidente en la cavidad que requiere el dispositivo para comenzar la medición, A es el pico máximo de densidad radiativa incidente en el calorímetro que registra el paso de la mancha solar por el centro de la abertura, τ_c es el tiempo en el que ocurre esto y ω el tiempo en el cual el 68% del área de la mancha solar concentra entra a través de la abertura.

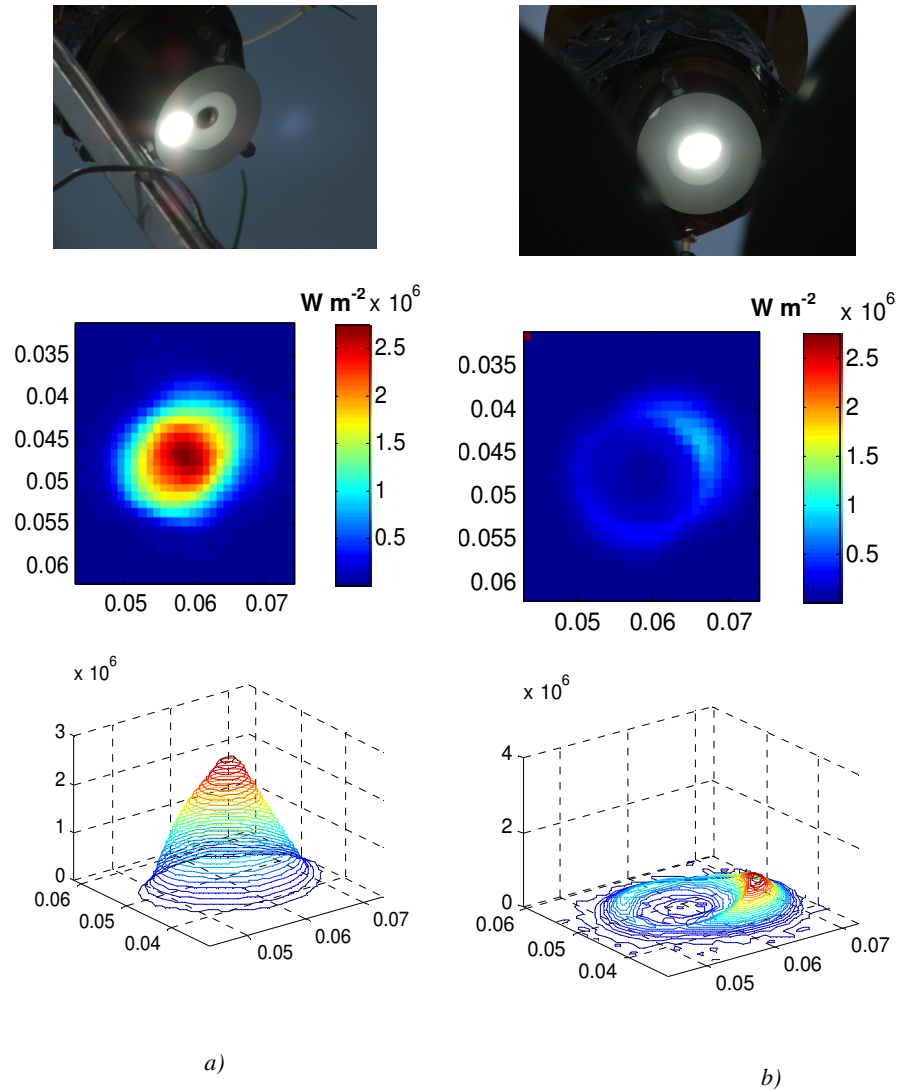


Figura 6.6: Imágenes CCD de la mancha Solar en el experimento de CAVIRAD sin seguimiento a) Fuera de la abertura del diafragma y b) La mancha Solar dentro de la abertura del diafragma.

6.3 Calibración de CAVIRAD

Para la calibración de CAVIRAD se realizaron 10 mediciones calorimétricas de la densidad de radiación concentrada por el DEFRAC. Cada una de las mediciones se realizó con un número diferente de espejos, es decir, con diferente potencia de concentración para tener el mismo número de puntos de calibración. Para conseguir el estado permanente se realizó cada una de las pruebas con una duración de 4 minutos aproximadamente. Por otra parte, se fijó la abertura del

diafragma con un diámetro de 10 mm ($7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$) y el caudal de refrigeración en $1.01 \pm 0.01 \text{ l min}^{-1}$, para determinar la calibración del dispositivo sólo para estas condiciones. Las condiciones de radiación directa que se tuvieron para realizar esta calibración fueron relativamente estables ($G_b = 778 \pm 21 \text{ W m}^{-2}$). Cabe destacar que las pruebas en las cuales se observaron problemas en el seguimiento del sol, o que simplemente se tuvieron problemas para centrar la mancha Solar en la abertura del diafragma, fueron rechazadas. En la figura 6.7 se observa que, para el caso de la diferencia de temperaturas en el vértice del cono receptor, la dispersión de las mediciones se aleja hasta en un 50% de la banda de la regresión lineal. Esta variación se debe principalmente a que la distribución de flujo es muy sensible a las perturbaciones debidas al seguimiento y por otro lado, a que esta es la zona del receptor con menos masa inercial térmica.

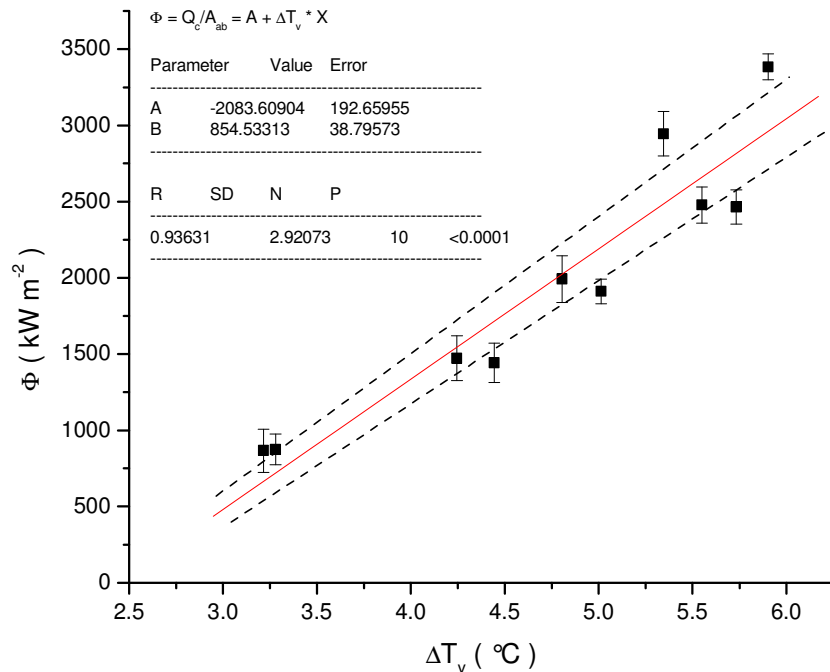


Figura 6.7: Curva de calibración de la ΔT_v en función de la densidad de radiación incidentes en el dispositivo.

Con estos resultados, no se puede considerar al vértice como una buena referencia para la medición del flujo radiativo, a menos que se tenga un sistema de seguimiento sumamente preciso. Por otra parte en la figura 6.8 se muestra la regresión lineal de las mediciones con la zona medía de la cavidad ΔT_m . En el caso de esta zona el 98% de los puntos caen dentro de la banda de error de las mediciones. Por otra parte, debido a que la zona media del calorímetro recibe

mayor cantidad de radiación, es en ésta donde se obtiene la máxima ganancia de temperatura.

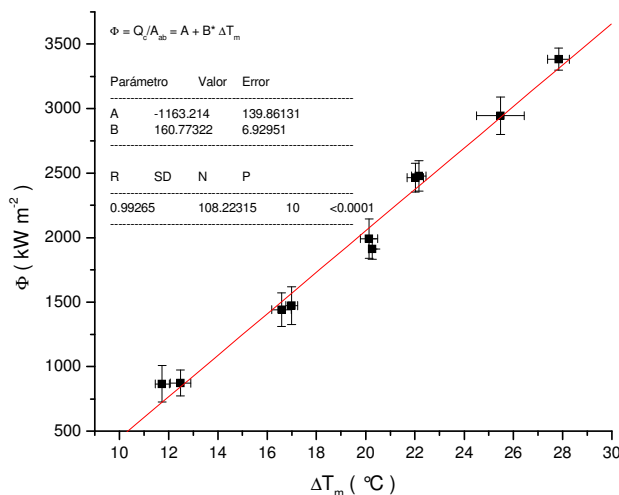


Figura 6.8: Curva de calibración de la ΔT_m en función de la densidad de radiación incidentes en el dispositivo.

A pesar de lo anterior, la calibración con la zona de la base del calorímetro es la que presenta la mejor regresión lineal, como se puede observar en la figura 6.9.

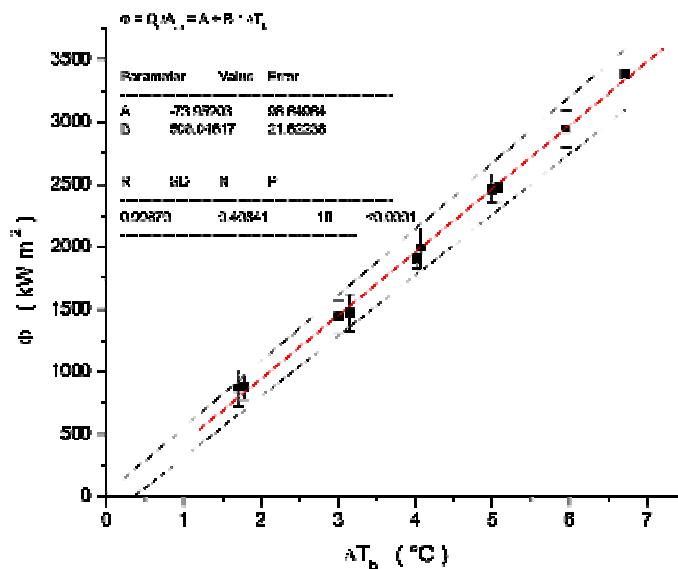


Figura 6.9: Curva de calibración de la ΔT_b en función de la densidad de radiación incidentes en el dispositivo.

Este comportamiento parece deberse a la mayor estabilidad térmica de esta zona del dispositivo. Relacionando la respuesta de la FEM con la medición del flujo radiativo concentrado de $13.390 \text{ kW m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$, como se observa en la figura 6.10, se obtiene una constante de calibración.

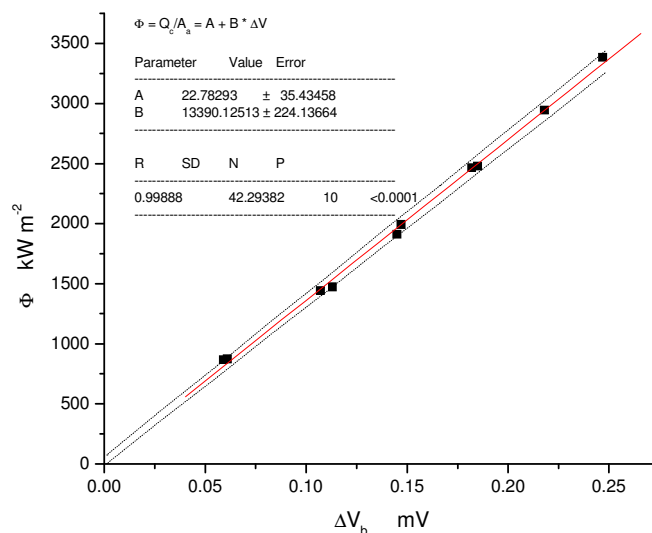


Figura 6.10: Curva de calibración del transductor en la base.

Una vez que se determinaron los tiempos de respuesta para cada uno de los puntos seleccionados, y que se encontró que son los esperados en el modelo. Por lo tanto, se puede determinar que los tiempos de respuesta de los transductores del dispositivo son competitivos frente a los que existen en el mercado, teniendo una mayor certeza en las propiedades de absorción, lo que conlleva una reducción en las incertidumbres. Sin embargo, se requiere realizar un trabajo más fino en la determinación de la propagación de errores en la medición calorimétrica, para con ello tener una constante de calibración con menor incertidumbre,

Conclusiones

En este trabajo se diseñó, construyó y caracterizó un calorímetro - radiómetro de cavidad cónica, al que se le denominó CAVIRAD. Dicho dispositivo tiene el propósito de medir el flujo radiativo altamente concentrado, que se encuentra en sistemas de concentración solar de foco puntual, como son los sistemas Platos/Stirling o de Torre Central.

Para comprender los mecanismos de transferencia de calor y la relación entre la densidad del flujo radiativo incidente, así como la respuesta térmica que ocurren tanto en un calorímetro como en un radiómetro, se realizaron estudios preliminares tanto teóricos como experimentales para ambos casos.

El calorímetro de cavidad que se selecciona para realizar el análisis teórico – experimental fue CAVICAL. Con la modelación de la transferencia de calor se encontró que las pérdidas térmicas, tanto convectivas como radiativas, del dispositivo no fueron mayores que 0.4% de la potencia incidente, con lo que se concluyó que esta podría ser una buena geometría para la construcción del nuevo calorímetro - radiómetro. Por otra parte, con CAVICAL se realizó una serie de experimentos, en el Horno Solar de la Plataforma Solar de Almería (HS-PSA), donde se encontró que los incrementos de temperatura en la pared del cono receptor eran proporcionales a la densidad de flujo radiativo incidente, obteniendo una respuesta lineal. Con estos resultados se determinó que la medición de la temperatura en zonas estratégicas relevantes de la pared del cono receptor se podrían caracterizar la respuesta de la radiación incidente.

Para el estudio con el radiómetro se seleccionó el dispositivo HyCal, el cual se utiliza en la industria para la medición de altos flujos radiativos. En estos estudios se encontró, de manera experimental, que la técnica de calorimetría de agua fría resulta una mejor alternativa para la calibración en lugar de la técnica radiométrica donde se emplea un cuerpo negro de 850 °C. Es importante indicar que se logró reducir la incertidumbre de 3% a tan sólo 1%. Así, con base en estos experimentos se comprobó que los transductores colocados en el calorímetro pueden ser calibrados con la técnica de calorimetría de agua fría. Sin embargo, los errores en la medición del flujo radiativo concentrado con los radiómetros HyCal, no son únicamente producto de la incertidumbre en su calibración; el hecho de

que las condiciones de calibración sean muy distintas al contexto donde se mide la radiación solar altamente concentrada, introduce una serie de errores sistemáticos en la medición. Para determinar cuánto representa cada uno de estos errores, se realizó un modelo teórico de la transferencia de calor en el dispositivo aplicándolo tanto a las condiciones de calibración como a las de medición en una torre central. Con ello se encontró que se estaría sobrestimando la lectura de estos radiómetros hasta en un 2.5% por efecto del viento que choca en la cara del sensor. Con esta modelación se tomó como criterio de diseño la capacidad de calibración del dispositivo en el entorno experimental.

Del análisis de los dos dispositivos se concluyó que las características más importantes que debía tener el calorímetro eran una alta emisividad aparente, masa reducida y la integración de la calibración de los transductores del dispositivo a través de la calorimetría.

Al comparar los aspectos geométricos, de dimensiones y peso del cono receptor, con las propiedades ópticas de emitancia aparente, se determinaron los rangos de los parámetros de diseño del radio de abertura de 0.5 a 1.0 cm, el ángulo de abertura del cono de 10 a 20° y la razón de baffle de 0.5 a 0.75. Dentro de estos parámetros la emitancia aparente de la cavidad será mayor que 0.99 y la masa de la cavidad menor a 250 gramos, con lo que se obtuvo un dispositivo con una eficiencia térmica por encima de 0.98 y un tiempo de respuesta menor que 10 segundos.

Con las geometrías seleccionadas se realizó una modelación de la transferencia de calor usando el software FLUENT. En los resultados de la modelación se encontró, ahora de forma teórica, que se presenta linealidad en la respuesta de temperatura en función de la densidad de flujo incidente. Sin embargo esta respuesta fue dependiente del caudal de refrigeración empleado, lo que limita la operación del dispositivo pues es necesario fijar previamente el caudal de refrigeración para su operación. Por otra parte, en la modelación se identificaron tres puntos en la pared del receptor adecuados para colocar transductores, los cuales fueron: el vértice, la base y la zona media.

Con los resultados de la modelación se calculó el tiempo de respuesta para cada geometría, encontrando que la B4 reportada en el capítulo 3 resultó con la máxima densidad de potencia concentrada por unidad de masa y el menor tiempo de respuesta. Por otra parte considerando que esta geometría es similar a la B1 simplemente modificando el diámetro de la abertura. En conclusión los parámetros propuestos para el diseño fueron: ángulo de abertura del cono 15°, radio de abertura del dispositivo de 5 a 10 mm, la razón de baffle de 0.5 a 0.75, el radio de la base del cono de 20 mm.

Una vez seleccionados los parámetros de la cavidad, el trabajo de diseño se dirigió a mejorar el diafragma refrigerado, el cual tiene la finalidad de aislar al dispositivo de la radiación incidente, permitiendo su entrada sólo en el área de la

abertura y que se delimita por la ventana del diafragma. Definidas todas las características se llevó a cabo la construcción de los dispositivos y sus pruebas experimentales.

Con los resultados experimentales se encontró el tiempo de respuesta del dispositivo de 8 segundos. Sin embargo, es importante enfatizar que los tiempos de respuesta de la zona media del cono fueron de 2 segundos y la base del cono de 11 segundos. Por otra parte, se observó que el comportamiento de la base era más estable que el vértice ya que este era más sensible a las oscilaciones de la radiación. Por último, en esta comparación se observó que en el caso del vértice la respuesta presento mayores desviaciones, y en el caso de la base los puntos presentaron la menor desviación. Cabe destacar que el punto medio fue el punto con la mayor resolución ($160 \text{ kW m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Relacionando el incremento de temperatura con la FEM de un termopar tipo T, se determinó la constante de calibración del dispositivo para condiciones de operación de 1 l min^{-1} , igual con $13.39 \text{ kW m}^{-2} \text{ mV}^{-1}$. y con ello se determino que los resultados experimentales fueron los esperados en la modelación para el diseño de CAVIRAD

Por lo anterior se concluye que el calorímetro es adecuado para ser utilizado como radiómetro, el cual presenta una versatilidad frente a los otros instrumentos, ya que se pueden tomar dos puntos distintos como referencia: el termopar de la base del cono para los casos donde se ocupe una medición que requiera estabilidad, o bien se puede seleccionar el termopar en la zona media cuando se requiera un tiempo de respuesta inferior a 3 segundos con la mayor sensibilidad.

Haciendo un comparativo entre CAVIRAD y HyCal se encuentra que con CAVIRAD a pesar de tener un mayor control en sus propiedades ópto-térmicas, presenta una resolución pobre que requiere de un sistema de amplificación de señal y con ello se puede conseguir que CAVIRAD tenga una incertidumbre menor a HyCal.

Como continuación de este trabajo de investigación, se podría realizar una comparación de calibraciones con radiómetros HyCal y con ello determinar la incertidumbre que existe entre ambos dispositivos. Y por otra parte, se requiere hacer un estudio más detallado de la sensibilidad de CAVIRAD frente a las variaciones en las condiciones de operación como caudal de refrigeración o área de abertura.

Referencias

- Acosta R., 2001. Estudio teórico experimental de la transferencia de calor en la placa absorbidora del calorímetro que actúa como receptor del DEFRAC. Tesis de Maestría, CIE-UNAM, Temixco, Mor.
- Acosta R., Pérez C.A. y Estrada C.A., 2001. Estudio Teórico Experimental del Comportamiento Térmico de la Placa Receptora del Calorímetro del DEFRAC. Memorias de la XXV Semana Nacional de Energía Solar, Vol. único, pags. 197-204. Editó ANES, ISBN 968-5219-02-8. San Luis Potosí, SLP.
- Ballestrín J., 2002. A non-water-cooled heat flux measurement system under concentrated solar radiation conditions. Solar Energy Vol. 73, pp 159-168.
- Ballestrín J. y Monterreal R., 2002. Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation. 11th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Zurich, Switzerland.
- Ballestrín J., Ulmer, S., Morales, A., Barnes, A., Langley. L.W. y Rodríguez, M., 2003. Systematic error in the measurement of very high solar irradiance, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 80. pp 375–381
- Ballestrín J., Estrada C.A., Rodríguez-Alonso M., Pérez-Rábago C. A., Langley L. W. y Barnes A., 2004, "High-heat-flux sensor calibration using calorimetry". J. Metrologia. pp 314-318.
- Box G. E., Hunter W. G. y Hunter J. S., 1991. "Statistics for Experimenters, An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building", John Wiley & Sons, Inc.
- Brakmann G., Aringhoff R., Geyer M. y Teske S., 2005, Concentrated Solar Thermal Power – Now!. Report Greenpeace International.
- Cabanillas R., 2001. Estudio de la Transferencia de Calor en una Cavidad Bidimensional Abierta. Tesis de Doctorado en Ingeniería, DEPI-UNAM.
- Campos-Enriquez J.J., Campos-Enriquez, J.O. y Urrutia-Fucugauchi, 1991, "Variación secular reciente y cartas de los campos geomagnético en México", geofísica internacional. vol. 30, no. 2.

- Caraso M. y Becker M., 1990. In Performance Evaluation Standards for Solar Central Receivers, Vol. 3, Springer-Verlag.
- Climate Change 2001:Synthesis Report, 2001, An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Cruz, F., Estrada, C.A., J. Cervantes y J.H. Quiñones, 1997. Caracterización del DEFRAC. Parte I: Estudio Térmico. Memorias de la XIX Semana Nacional de Energía Solar, pp 170-176.
- Cruz Felipe, 1997,"Diseño, construcción y pruebas de un calorímetro para el DEFRAC", Tesis de licenciatura, pp 11-17.
- Duffie J.A. y Beckman W. A., 1991. Solar engineering of thermal processes, 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- Estrada C.A., Higuera S., Oskam A. y Cervantes J.G., 1995. Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados: DEFRAC, Memorias de la XIX Semana Nacional de Energía Solar, pp 183-186.
- Estrada, C.A., Cervantes J.G., Oskam A., Cruz F. y Quiñones J.J., 1998. Thermal and Optical Characterization of a Solar Concentrator for High Radiative Flux Studies. Proceedings of the 1998 Annual Conference, American Solar Energy Society. Vol 1, pags.259-266. Editado por R. Campbell-Howe, T Cortéz and B. Wilkins-Crowder ASSES, USA.
- Ferrier A. y Rivoire B., 2000. Measurement of Concentrated Solar Radiation: The Camorimeter ASTERIX, 10th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Australia.
- Ferrier A. y Rivoire B., 2002, An Instrument for Measuring Concentrated Solar-Radiation: a Photo-Sensor Interfaced With An Integrating Sphere, J. Solar Energy, Vol. 72, No. 3, pp. 187-193.
- Gardon R., An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation, Review of Scientific Instruments, 1953, Vol. 24, No. 5, pp. 366-370.
- Grajeda, P.M., 1997. Sistema de control del DEFRAC (Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados. Tesis de licenciatura, CIE-UNAM Temixco, Morelos, México.
- Groer U. y Neumann A., 1999. Development and test of a high flux calorimeter at DLR Cologne (SunCatch), J. Phys. IV. France.
- Hahm T., Schmidt-Traub H. y Lebmann B., 1999. A Cone Concentrator for High-Temperature Solar Cavity-Receivers. Journal Solar Energy. Vol 65, pp 33-41.

- Haji-Sheikh, 1988: Handbook of numerical heat transfer, Wiley Interscience, New York, pp. 673-722.
- Harris J. A., 1981. Focal plane flux distribution produced by solar concentrating reflectors. Journal Solar Energy. Vol 27, no. 5, pp 403-411.
- Heinisch, R. P., Sparrow E.M. y Shamsundar N.: Radiant Emission from Baffled Conical Cavities, J. Opt. Soc. Am. Vol. 63, no. 2, pp. 152-158, 1973.
- Hernández G., Huelsz G., Jaramillo O.A. y Acosta R., 2001. "Evaluación térmica de un horno solar tipo caja", Memorias de la XXV Semana Nacional de Energía Solar.
- Hinojosa, J.F., R.E. Cabanillas, G. Alvarez and C.E. Estrada, 2005. Nusselt number for the natural convection and surface thermal radiation in a square tilted cavity. International Communications in Heat and Mass Transfer 32 (9), 1184-1192.
- Holman, Jack P., "Método experimental para ingenieros", 1996, cuarta edición, Editorial McGraw-Hill, pp. 51-101.
- Houghton J.T., Ding Y., 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.
- IEA. 2004. World Energy Outlook. International Energy Agency.
- Incropera P. Frank y DeWitt P. David, Introduction to Heat Transfer, 4a ed., 1999, Prentice Hall, N.Y. United States of America, pp. 912.
- Jaramillo, O. A., C. A. Estrada, C. A. Arancibia-Bulnes, C.A. Pérez-Rábago. 2007, "A calorimetric evaluation of a solar concentrator system", Solar Energy Engineering.
- Jeter S. M., 1986. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation. Journal Solar Energy. Vol 37, no. 5, pp 335-345.
- Kaluza J., Neumann A., 2001, Comparative Measurements of Different Solar Flux Gauge Types, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 123, No. 3, pp. 251-255.
- Kendall J.M., 1981. Radiometer for Achúrate ($\pm 1\%$) Measurement of Solar Irradiances Equal to 10,000 Solar Constants, JPL Publication 81'42 National Aeronautics and Space Administration.
- Kolb, G.J., Strachan J.W. y Estrada C.A., 2000. Proyecto de Torre Central para México. Revista Solar, No. 40, 16-23.

- Leibfried U. y Ortjohann J., 1995, Convective Heat Loss from Upward and Downward-facing Cavity Solar receivers: Measurements and Calculations, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 117, pp. 75-84.
- Maxwell, E.L. y D.S. Renne, Measures of Renewable Energy, National Renewable Energy Laboratory, Jan. 1994.
- Modest M. F., 1993, Radiative Heat Transfer, 2a ed., Mc Graw Hill, Inc., United States of America, pp. 799.
- Murthy A.V., Tsai B.K. y Gibson C.E., 1997. Calibration of High Heat Flux Sensors at NIST, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, pp. 479-488.
- NASA 2005. Sitio de internet "Surface meteorology and Solar Energy" (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>) del Earth Science Enterprise Program de la NASA, Estados Unidos.
- Neumann A., 1996. Procedures for flux measurements for solar receivers using video cameras and Lambertian targets. In Solar PACES Technical Report No. III – 3/97.
- Pérez-Rábago C.A., 2003. Diseño construcción y puesta en operación de un calorímetro de cavidad cónica para un concentrador solar de foco puntual (DEFRAC), Tesis de Maestría, CIE-UNAM, Temixco, Mor.
- Pérez-Rábago C.A., Estrada C. A., Marcos M.J., Ballestrin J., M. Rodríguez, 2005, "Outdoor Uncertainty on Heat Flux Measurement", ISES 2005 Solar World Congress, Orlando Florida USA.
- 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 1434–1442.
- Quiñones J.J., Estrada, C.A., Cruz, F. y Cervantes J., 1997. Caracterización del DEFRAC. Parte II: Estudio Óptico. Memorias de la XIX Semana Nacional de Energía Solar, pp 160-166.
- Ruiz V., 2000, "El Reto Energético", Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Junta de Andalucía, España.
- Romero V., 1994, "Circe2/Dekgen2: A software package for facilitated optical analysis of 3D distributed solar energy concentrator", Sandia National Laboratories, SAND91-2238.
- Secretaría de Energía de México, Programa de Desarrollo y Reestructuración del Sector Energético 1995 – 2000 (1999).

- SENER-SEMANAT, 2002, "Programa energía y medio ambiente hacia el desarrollo sustentable".
- Siegel R. y J.R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer Third Edition, Taylor & Francis Publishers, 1992.
- Sparrow, E. M., y V.K. Jonsson, 1963, Radiant Emission Characteristics of Diffuse Conical Cavities, J. Opt. Soc. Am., vol. 53, no. 7, pp. 816-821.
- Sparrow, E. M., R. P. Heinisch y N. Shamsundar, 1974, Apparent Hemispherical Emittance of Baffled Cylindrical Cavities, J. of Heat transfer, vol. 96, pp. 112-114.
- Steinfeld A., Imhof A., Fletcher E.A., 1992. High temperature solar receivers with internal infrared mirrors, 6th Int. Symp. Solar Thermal Concentrating Technologies, Mojacer Spain.
- Steinfeld A, Schubnell M., 1992. Maximizing the energy conversion efficiency of a solar cavity-reciver. 6th Int. Symp. Solar Thermal Concentrating Technologies, Mojacer Spain.
- Steinfeld A, Schubnell M., 1993. Optimus aperture size and operating temperature of a solar cavity-reciver. Journal Solar Energy. Vol. 50, No. 1, pp. 19-25.
- Stine Wm. B, McDonald C. G, 1988. Cavity receiver heat loss measurements, ASME Solar Energy Division Conference, Denver Colorado.
- Stine, W.B. y Diver, R.B., 1994. A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology, Reporte Sandia National Laboratories, SAND93-7026 UC-236, New Mexico, EUA. 1994.
- TYNER, C., et al., Concentrating solar power, Solar Paces, 2001.
- Ulmer S., Lupfert E., Pfander M. and Buck R., (2002). Calibration corrections of solar tower flux density measurements. 11th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Zurich, Switzerland.
- William B. y Richard B., 1994, "A compendium of solar dish/stirling technology (Technical report)", Publisher Sandia National Laboratories.
- Williamson D. E., 1952. Cone Channel Condenser Optics. Journal of the Optical Society of America. Vol 42, 10, pp 712-715.
- Winter, C.J., Sizmann R.L., Vant-Hull L.L., 1991. Solar Power Plants. Springer-Verlag Berling Heidelberg.

World Energy Outlook (WEO), 1996. Secretaria de Energía de Estados Unidos de Norteamérica.

Zajac A, Hecht E., 1973, "Optics", Addison-Wesley Publishing Company United States of America, pp 124 – 127.

Zarza, E., Valenzuela L., León J., Hennecke K., Eck M., Weyers H.D., Eickhoff M., 2004, Direct Steam Generation in Parabolic Troughs: Final Results and Conclusions of the DISS Project. Energy 29, pp 635 – 644.

Apéndice A1

Experimentos de CAVICAL en el Horno Solar de la PSA

Se llevó a cabo un estudio experimental con CAVICAL en el Horno Solar de la Plataforma Solar de Almería (HS), donde se estableció como principal objetivo encontrar la función de correlación entre los incrementos de temperatura en la pared del cono receptor y el flujo radiativo incidente en la cavidad del calorímetro.

Con respecto a el Horno Solar de la Plataforma Solar de Almería, cabe señalar que sus características de construcción permiten una fácil ubicación de diferentes dispositivos que son localizados en la zona focal del concentrador y que mediante el atenuador (*Shutter*) es posible controlar la cantidad de potencia radiativa que incidente en el instrumento. En la figura A1.1 se muestran los componentes principales del HS [Martinez, 1995], los cuales son:

- El helióstato es una superficie plana de 140 m^2 que refleja los rayos del Sol de manera paralela al el eje del concentrador.
- El concentrador es el dispositivo principal del HS, el cual concentra la radiación incidente proveniente del helióstato y permite incrementar la densidad de energía solar en la zona focal. La distancia focal del concentrador $L_f = 7.45 \text{ m}$.
- El atenuador (*Shutter*) regula la radiación incidente mediante el movimiento angular de las persianas y controla así la fracción de radiación que llega al concentrador.
- La mesa de ensayos donde se colocan los experimentos se localiza en la zona focal y presenta tres grados de libertad cuyo desplazamiento son: $x = 60 \text{ cm}$, $y = 70 \text{ cm}$ y $z = 50 \text{ cm}$.

Para llevar a cabo la campaña experimental de CAVICAL se instrumentó la pared interior del cono receptor con 9 termopares “tipo T” distribuidos equidistantemente, como se observa en la figura A1.2. Además, se colocaron termopares, del mismo tipo, tanto a la entrada como a la salida del flujo de refrigeración del calorímetro para obtener la diferencia de temperatura y realizar así un balance energético mediante calor sensible.

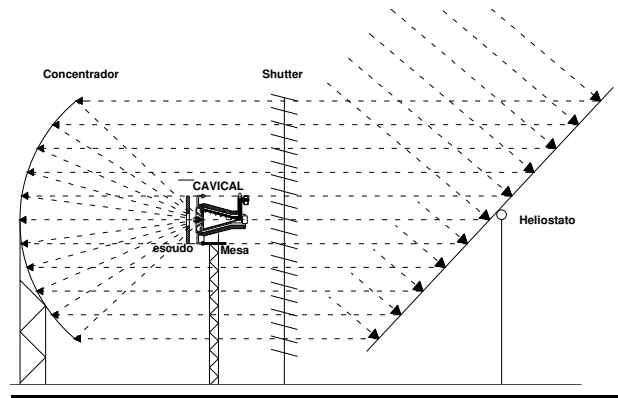


Figura A1.1. Esquema básico del horno solar.

Una vez instrumentado el dispositivo se colocó de manera horizontal en el centro de la masa de ensayos del HS con dirección Norte-Sur. El centro de la abertura de la cavidad se fijó en el eje focal del concentrador, ubicando el punto focal del HS a una distancia de 64 mm adentro de la abertura del receptor. La cara del calorímetro se cubrió con un escudo de alúmina de 10 mm de espesor, el cual presenta una resistencia por debajo de los 1600 °C. El escudo tiene una abertura de 50 mm de diámetro por la que pasa la radiación concentrada, como se observa en la figura A1.3. El escudo se colocó frente a CAVICAL con una separación de un centímetro formando un ángulo de aceptación $\Omega_{\text{escudo}} = 25^\circ$. Dicho ángulo es menor que el ángulo de aceptación del HS que $\Omega_{\text{concentrador}} = 39^\circ$. Con esta abertura se busca que la potencia radiativa entre a través de la abertura del receptor sin que los rayos incidan en la cara frontal del calorímetro.

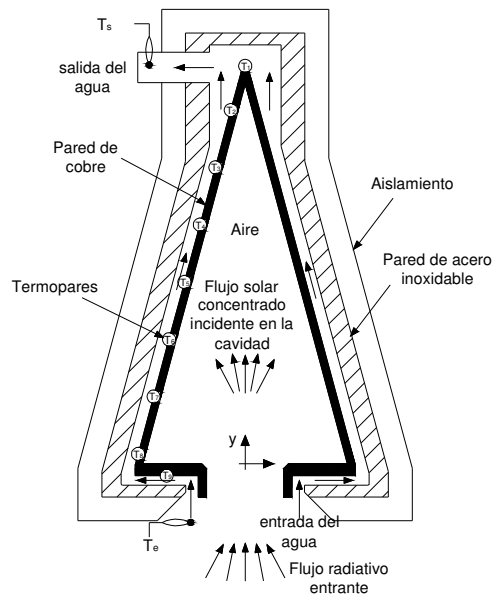


Figura A1.2. Vista esquemática de la instrumentación de CAVICAL.

Por otro lado, el caudal de refrigeración del calorímetro se midió con el caudalímetro denominado V1. El cual fue conectado en serie como se muestra en la figura 3. Este caudalímetro presenta un rango de medición de 0 a 120 l min⁻¹, una incertidumbre de 2.0%, y una resolución de 0.06 l min⁻¹.

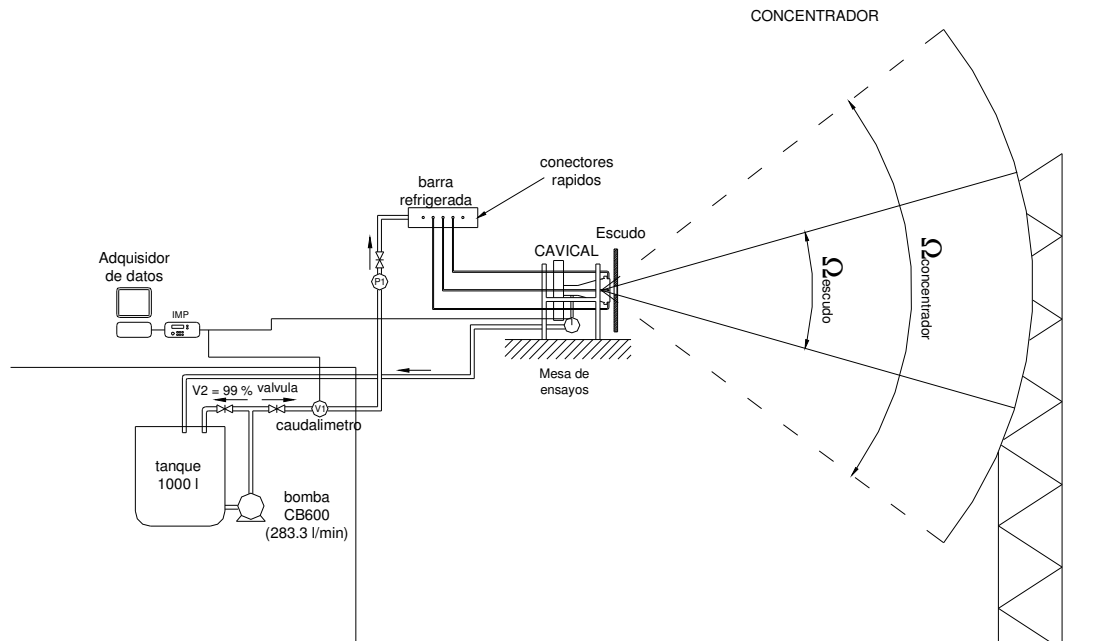


Figura A1.3. Esquema de conexiones del sistema de refrigeración de CAVICAL.

Metodología:

Para encontrar la correlación que existe entre la radiación incidente en el receptor y los gradientes de temperatura que se producen, se plantearon tres tipos de experimentos que se describen a continuación:

- a) *Incremento de potencia de forma gradual:* Para llevar a cabo este experimento se colocó el centro de la abertura de CAVICAL en el punto focal del concentrador. Con el atenuador del HS aún cerrado, se orienta el helióstato para obtener la mancha solar en la zona focal. Se da un tiempo suficiente para estabilizar el sistema y se inicia la adquisición de datos (temperaturas de la pared, temperaturas del fluido, presión, caudal y radiación directa). Se inició con el 10% de la abertura del atenuador, el cual es proporcional al nivel total de la radiación concentrada por el HS. Estas condiciones se mantienen por un periodo de 10 minutos, garantizando que el calorímetro alcanzara el equilibrio térmico. Dicho procedimiento se continúa incrementando la potencia solar concentrada en intervalos regulares de 10% hasta alcanzar el 80% de la capacidad del HS. Ya que se alcanzó tal radiación incidente, se comienza a decrecer la abertura del atenuador, como se observa en la figura A1.4.

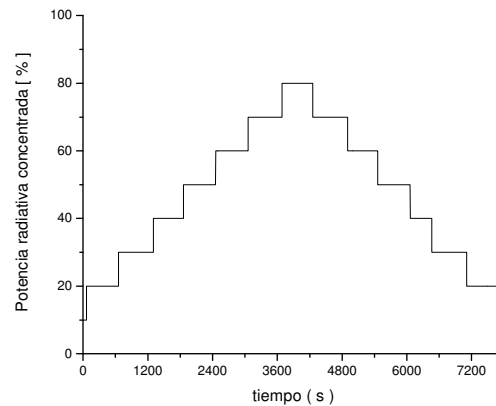


Figura A1.4. Incrementos de potencia radiativa de forma gradual.

- b) *Incremento de potencia por choque:* En este procedimiento se repitió el mismo arreglo experimental que la prueba anterior (*Incremento de potencia de forma gradual*) pero en este caso se inició con el 20% de la abertura del atenuador y se mantuvo así durante un periodo de 10 minutos. Posteriormente se cerró completamente el atenuador, permitiendo que las temperaturas llegaran al equilibrio termodinámico con la temperatura de entrada del agua. Nuevamente se abrió el atenuador pero en esta ocasión se consideró el 40% de la capacidad del HS y se repitió el procedimiento antedicho. Las pruebas se realizaron hasta llegar al 100% de la capacidad del HS donde se concluyó el experimento. Una representación del incremento se muestra en la figura A1.5.

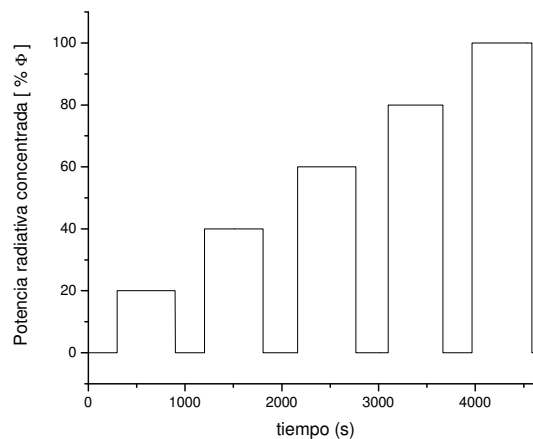


Figura A1.5. Incrementos de potencia radiativa de manera repentina.

- c) *Incremento de potencia por choque, (captura de imágenes mediante CCD):* En este experimento se colocó por arriba del calorímetro un blanco *lambertiano* para obtener imágenes de toda la mancha solar concentrada mediante una cámara CCD [Neumann, 1996]. En este experimento se repitió el

procedimiento lo propuesto en el *Incremento de potencia por choque* y simplemente se incorporó al procedimiento experimental la captura de imágenes CCD. En la figura A1.6 se muestra una fotografía del arreglo experimental tanto con CAVICAL, el blanco *lambertiano* y el radiómetro de referencia. En la fotografía se señala con la letra *A* la zona de medición que se realiza con CAVICAL, la letra *B* corresponde a la zona donde se obtiene la imagen con la cámara CCD y por ultimo la letra *C* muestra la zona donde se tomaron las imágenes CCD con un radiómetro HyCal como referencia.

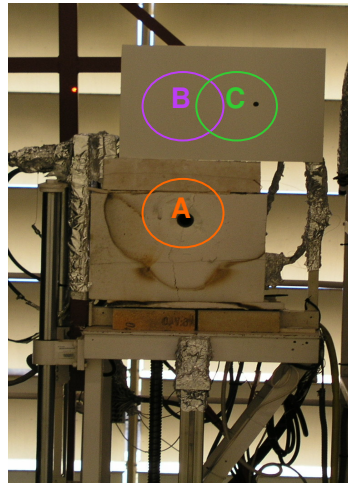


Figura A1.6. Arreglo experimental con CAVICAL y el blanco *lambertiano*.

Con base en las imágenes CCD de la abertura de CAVICAL y del blanco *lambertiano* se evaluó la absortancia aparente de la cavidad. La metodología empleada fue considerar la relación que existe entre los niveles de grises para la cavidad y el blanco *lambertiano* mediante un cociente del promedio de ambas zonas. Cabe señalar que en este punto se tomó en cuenta los reflejos en la cara del calorímetro que perturbaron la medición.

Experimento con incremento de potencia de forma gradual

La prueba se realizó considerando 12 niveles de radiación concentrada. La prueba se inició a las 12:47 p.m., con una duración de 1 hora 58 minutos. Las condiciones experimentales de radiación directa (G_b) y caudal de refrigeración (V_{in}) fueron permanentes, como se muestran en la tabla A1.1.

Tabla A1.1. Parámetros de la experimentación.

Radiación solar incidente, G_b	783 ± 27	$W\ m^{-2}$
Caudal de refrigeración, V_{in}	5.7 ± 0.3	$l\ min^{-1}$
Presión a la entrada, P_e	6.38 ± 0.05	Bares
Reflectancias del heliostato, $\rho_{heliostato}$	0.75	
Reflectancias del concentrador, $\rho_{concentrador}$	0.91	

La presión a la entrada del flujo de refrigeración se mantuvo constante durante toda la prueba. La temperatura del flujo de refrigeración (T_e) a la entrada de CAVICAL se incremento de manera lineal a lo largo del experimento, de 30.9 hasta 40.3 °C, a una razón de 0.08 °C por minuto. Esto se debió a que el flujo de salida de la refrigeración se recirculaba al tanque de almacenamiento del HS como se observa en la figura 3 y se presentó, por tanto, un almacenamiento de energía que aumento la temperatura el fluido refrigerante. Sin embargo este incremento de T_e no presentó problema en el balance térmico global, debido a que lo que se evalúa es el diferencial de temperaturas entre entrada y salida, y no se toma en cuenta las temperaturas absoluta de la entrada y la salida. Es importante indicar que los incrementos de temperatura no resultan lo suficientemente grandes para tener cambios significativos en las propiedades termo-físicas del agua y por tanto la exactitud en los cálculos no se afecta durante el balance térmico del calorímetro.

En la figura A1.7 se muestra el comportamiento de las temperaturas del calorímetro a lo largo de la prueba tanto a la entrada como a la salida y su diferencia (ΔT_{h2o}). En esta figura se observa como la temperatura de salida se incrementa debido al aumento en la temperatura de entrada y a la ganancia de energía radiativa que pasa a través de la abertura del calorímetro. En la diferencia de temperaturas ΔT_{h2o} se observa que se alcanza, en un tiempo menor que 24 segundos, el estado cuasi-estacionario para cada uno de los incrementos de potencia del HS.

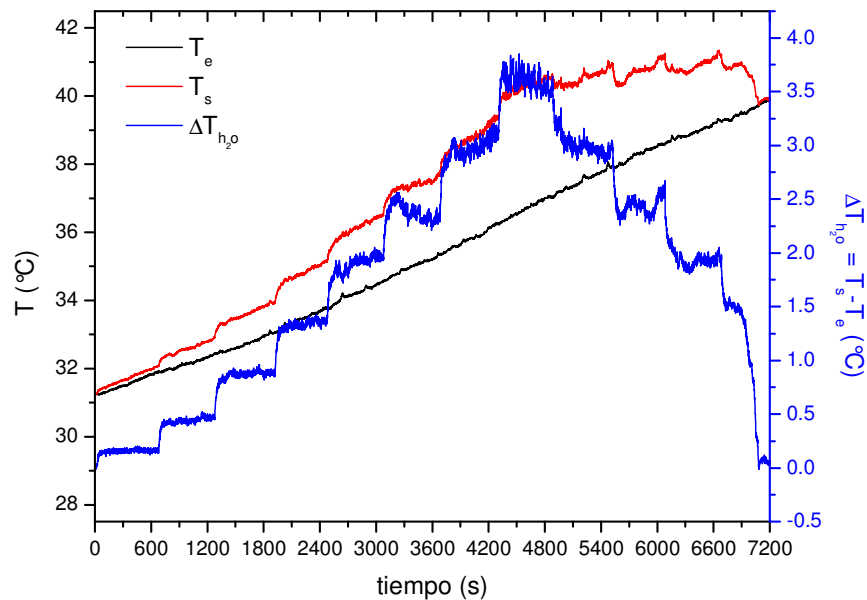


Figura A1.7. Comportamiento de las temperaturas del agua de refrigeración.

En la figura A1.7 también se observa que las primeras cuatro pruebas (de 10% a 40% de la abertura del atenuador del HS) ΔT_{h2o} tiene un comportamiento permanente, no así para potencias de concentración por arriba del 50%. Sin embargo es importante señalar que el promedio de las diferencias de temperatura entre

la salida y la entrada ΔT_{h2o} en el estado es proporcional al incremento de la potencia concentrada.

Debido a que el calorímetro se encuentra refrigerado mediante el paso de agua a través de éste, la temperatura de referencia del instrumento es la temperatura a la entra de refrigeración T_e , y considerando que se desea analizar la correlación que existe entre los incrementos de temperatura en la pared del receptor y la potencia incidente, se define ΔT_i como la diferencia de temperatura de cada punto de la pared del receptor y la temperatura de entrada donde el subíndice indica el termopar colocado en la pared de la cavidad. De esta manera se puede escribir la relación:

$$\Delta T_i = T_i - T_e \quad (A1.1)$$

La figura A1.8 muestra el comportamiento de todas estas diferencias de temperatura considerando el porcentaje de abertura del atenuador para cada prueba. En esta figura se observa que si bien la zona que tiene menor incremento de temperatura es el vértice (ΔT_1 y ΔT_2), son estos puntos los que presentan la mayor estabilidad durante la experimentación.

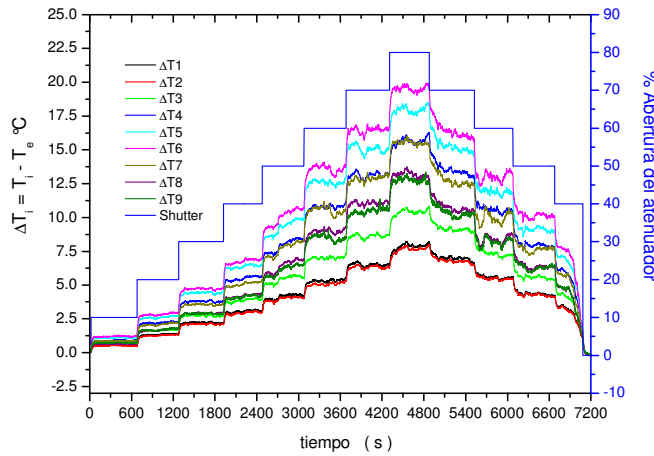


Figura A1.8. Comportamiento de los ΔT para todo el experimento.

Considerando que el tiempo promedio de respuesta del calorímetro es de 24 segundos, se toman el intervalo de 2 a 5 minutos de cada una de las pruebas con la idea de asegura patrones de estancamiento en temperatura. Con el promedio de la medición del ΔT_{h2o} se calcula la potencia calorimétrica Q_c para cada uno de los niveles de potencia concentrada:

$$\dot{Q}_c = \rho C_p \dot{V} \Delta T_{h2o} \quad (A1.2)$$

donde la densidad (ρ) y el calor específico (C_p) del agua, se calculan en función de la temperatura media logarítmica entre la entrada y la salida del flujo de refrigeración del calorímetro. Por otra parte se considera la potencia radiativa que entra a través

de la abertura (Q_{sun}) es la suma de la potencia extraída por el agua de refrigeración (Q_c) más las pérdidas térmicas de la cavidad (Q_{out}), tal que:

$$\dot{Q}_{\text{sun}} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{\text{out}} \quad (\text{A1.3})$$

Considerando que el flujo de agua dentro de CAVICAL permite que la distribución de temperaturas en la pared del receptor no supera los 50°C para la máxima concentración y el incremento de $\Delta T_{\text{h}_2\text{o}}$ es proporcional al incremento en la potencia concentrada como se observa en la figura A1.9, se puede asumir que las pérdidas térmicas Q_{out} son proporcionales a la potencia radiativa incidente en la cavidad, y el cálculo exacto de dichas pérdidas no resulta necesario para encontrar la correlación entre potencia incidente y los gradientes de temperatura en la pared del receptor considerando que el error en la medición calorimétrica es de aproximadamente 4.0%.

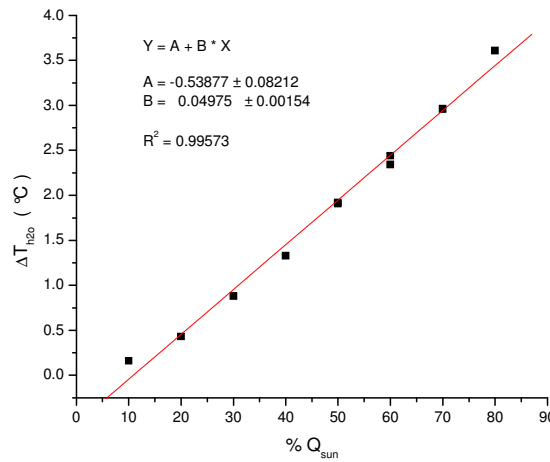


Figura A1.9. Respuesta de ΔT_{agua} a los incrementos de potencia incidente Q_{sun} .

Considerando el cálculo teórico de la absortancia aparente de $\alpha_{\text{ap}} = 0.98$ [Pérez-Rábago, 2003], se evalúa la densidad de energía radiativa incidente en la abertura A_{ab} de CAVICAL mediante la relación:

$$\Phi_{\text{in}} = \frac{\dot{Q}_{\text{sun}} / A_{\text{ab}}}{\alpha_{\text{ap}}} \quad (\text{A1.4})$$

En la figura A1.10 se presenta el comportamiento de tres diferencias de temperatura ΔT_i en distintos lugares de la pared de cono receptor como función de la radiación incidente en la cavidad. En todos los casos se observa un comportamiento lineal para el rango de 50 a 2000 kW m⁻². Los puntos de medición seleccionados son: el vértice ΔT_2 , el punto donde incide la radiación ΔT_6 y el punto de la base del receptor ΔT_7 , como se muestra en la figura A1.2. Por otra parte en la tabla A1.2, se presentan los resultados de las tres regresiones lineales para cada uno de estos puntos.

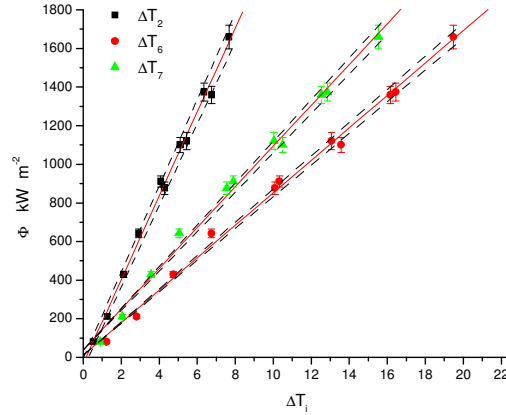


Figura A1.10. Respuesta de los ΔT_i a los incrementos de potencia.

Tabla A1.2. Parámetros de la experimentación.

	A	B	R^2
ΔT_2	-30 ± 27	217 ± 6	0.997
ΔT_6	12 ± 22	84 ± 2	0.997
ΔT_7	39 ± 26	105 ± 3	0.996

Es importante mencionar que las regresiones lineales de los tres puntos no pasan por el origen, esto se debe a la inercia térmica del instrumento. Dicha inercia actúa como una capacitancia térmica y que es necesario saturar para realizar la medición.

Por otra parte, en la figura A1.11 se muestra la distribución de temperaturas, a lo largo de la pared del cono receptor, para cada una de las densidades de radiación concentradas Φ en toda la experimentación.

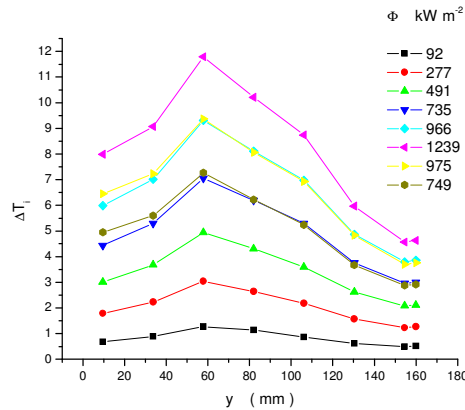


Figura A1.11. Distribución de ΔT a lo largo de la pared del cono receptor para diferentes densidades de radiación concentradas.

En ésta figura se observa como las distribuciones de ΔT_i coinciden para los casos en los que las densidades de radiación incidentes Φ son prácticamente iguales. Sin

embargo, la zona donde se observa cierta discrepancia (aproximadamente de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) es en la base del cono, donde el dispositivo tiene mayor masa, y con ello mayor inercia térmica.

Experimentos con potencia de manera repentina

Como se indica en la metodología antedicha, en este experimento se realizaron 5 pruebas para diferentes niveles de radiación incidente. La experimentación inició a las 11:59 a.m. con una duración de 1 hora 10 minutos. Las condiciones experimentales fueron permanentes tanto la radiación directa (G_b) como el caudal de refrigeración (V_{in}). Estas condiciones se presentan en la tabla A1.3.

Tabla A1.3. Parámetros de la experimentación.

Caudal de refrigeración, V_{in}	5.5 ± 0.2	L min^{-1}
Presión a la entrada, P_e	6.47 ± 0.05	bares
Reflectancias del helióstato, $\rho_{\text{helióstato}}$	0.75	
Reflectancias del concentrador, $\rho_{\text{concentrador}}$	0.91	
Radiación solar incidente, G_b	874 ± 6	W m^{-2}
Tiempo de cada prueba	10	minutos

En la figura A1.12 se muestra la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del agua de refrigeración $\Delta T_{h_{20}}$. Se observa que para todos los casos se alcanza el estado cuasi-estacionario para cada una de las mediciones en menos de 1 minuto.

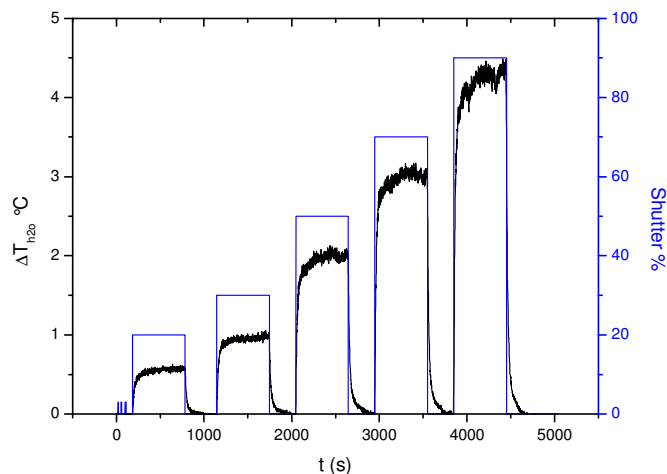


Figura A1.12. Comportamiento de las temperaturas del agua de refrigeración.

La figura A1.13 muestra el comportamiento de las diferencias de temperatura ΔT_i durante el experimento considerando el porcentaje de abertura del atenuador para cada prueba. En esta figura se observa que si bien la zona que presenta menor incremento de temperatura es el vértice (ΔT_1 y ΔT_2), es esta la de mayor estabilidad durante toda la prueba. Cabe señalar que los puntos del vértice (T_1 y T_2) que se encuentran separados por 2.5 cm la diferencias entre estos dos puntos es mínima.

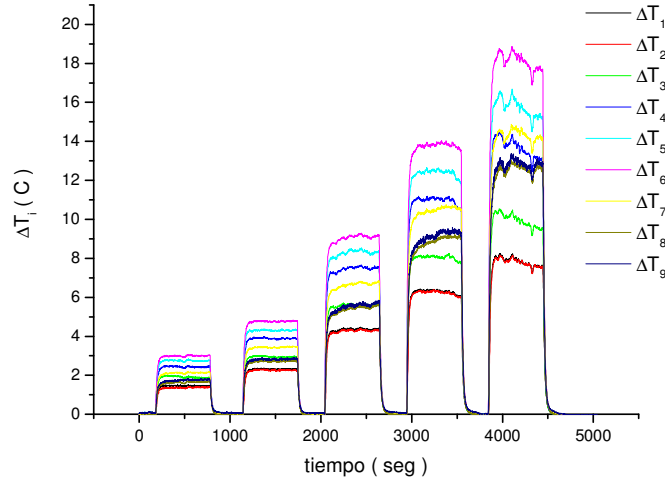


Figura A1.13. Comportamiento de ΔT_i para todo el experimento.

Con concentraciones por encima del 70% de la abertura del atenuador las diferencias de temperaturas presentan fluctuaciones, debido a que el aislamiento del escudo de alúmina no es suficientemente efectivo.

En la figura A1.14 se muestra el comportamiento de tres de las diferencias de temperaturas ΔT_i de la pared del receptor en función de la radiación incidente en la cavidad, en cada caso se observa un comportamiento lineal para el rango de 50 a 2000 kW m^{-2} . En esta misma figura se incluye la regresión lineal para los casos del vértice ΔT_2 , ΔT_6 y ΔT_7 donde su coeficiente de correlación R^2 fue de 0.998.

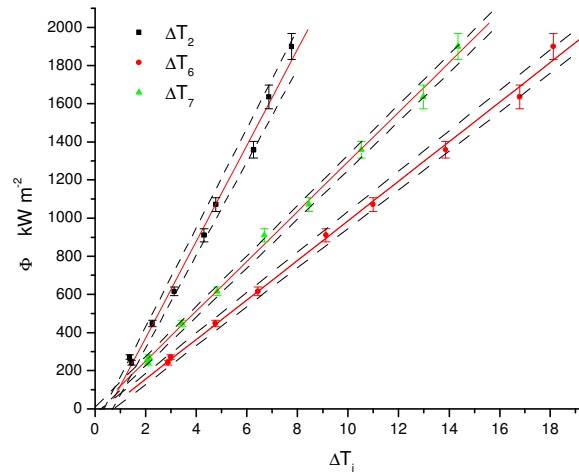


Figura A1.14. Respuesta de los ΔT_i a los incrementos de potencia.

Tabla A1.4. Parámetros de la experimentación.

A	B	R^2
kW m^{-2}	$\text{kW m}^{-2}\text{K}^{-1}$	

ΔT_2	-130 ± 40	252 ± 8	0.999
ΔT_6	-51 ± 25	104 ± 2	0.998
ΔT_7	-10 ± 20	130 ± 2	0.996

Es importante resaltar que a pesar de que las condiciones de experimentación de esta prueba y de la anterior son similares, los resultados de las regresiones lineales para cada punto son distintos, presentan variaciones de hasta un 19%. Esto se debe en gran medida al efecto capacitivo del calorímetro que se enfatiza en el momento que la potencia concentrada se va incrementando progresivamente, donde el cuerpo del calorímetro almacena cierta cantidad de energía que homogeniza la respuesta de temperatura, en el caso del primer experimento.

Incremento de potencia por choque, (captura de imágenes mediante CCD):

En este procedimiento experimental se realizaron seis pruebas para diferentes niveles de flujo radiativo concentrado. El experimento inició a las 11:59 a.m. con duración de 1 hora 10 minutos. Las condiciones experimentales de radiación directa (G_b) y caudal de refrigeración (V_{in}) fueron permanentes a lo largo del experimento. Estas condiciones se presentan en la tabla A1.5.

Tabla A1.5. Parámetros de la experimentación.

Caudal de refrigeración, v_m	6.0 ± 0.1	$l \text{ min}^{-1}$
Presión a la entrada, P_e	6.44 ± 0.07	Bares
Reflectancias del helióstato, $\rho_{\text{helióstato}}$	0.91	
Reflectancias del concentrador, $\rho_{\text{concentrador}}$	0.93	
Radiación solar incidente, G_b	928 ± 8	$W \text{ m}^{-2}$
Tiempo de cada prueba	10	Minutos

En la figura A1.15 se muestra la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del agua de refrigeración ΔT_{h2o} . Se observa que se alcanza el estado cuasi-estacionario para cada una de las mediciones en menos de 1 minuto.

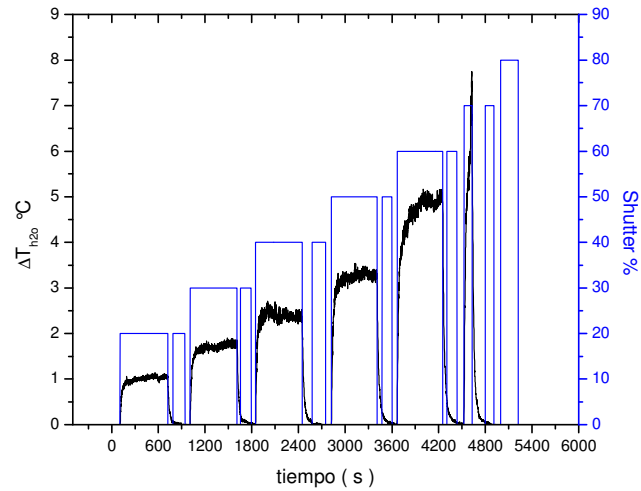


Figura A1.15. Comportamiento de las temperaturas del agua de refrigeración.

La figura A1.16 muestra el comportamiento de ΔT_i durante el experimento considerando el porcentaje de abertura del atenuador para cada prueba. En esta grafica se observa que a partir del 40% no existe estabilidad en las temperaturas de la pared. Es importante mencionar que a partir de esta potencia el escudo comenzó a ceder permitiendo que la radiación concentrada incidiera en la cara del calorímetro.

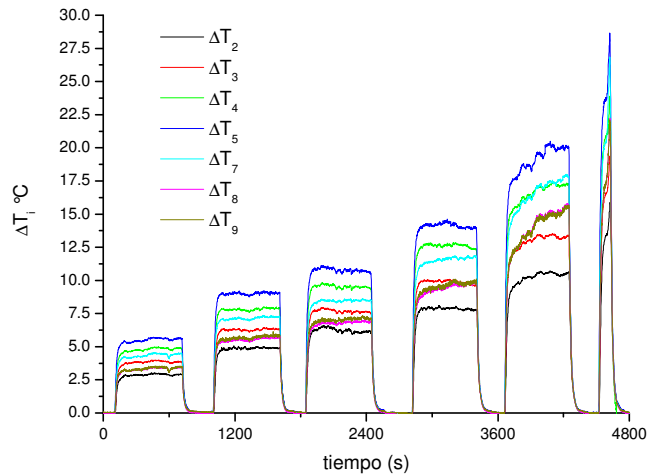


Figura A1.16. Comportamiento de ΔT_i para todo el experimento.

En la figura A1.17 se observa mediante las imágenes CCD el deterioro del escudo protector para concentraciones de 20 % y 60 % de la abertura del atenuador. En estas imágenes se observa como al incrementar la radiación la superficie de alúmina

se fue evaporando debido al alto flujo radiativo. La degradación de la alúmina propicio que parte de la radiación fuera absorbida por la cara del calorímetro.

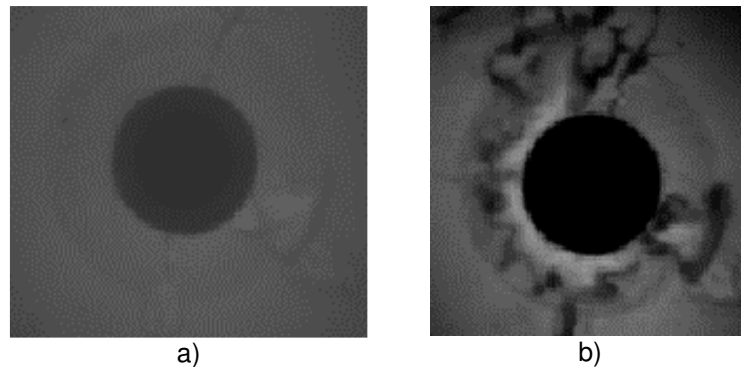


Figura A1.17. Imágenes CCD del escudo protector a) con 20% de la abertura del atenuador del HS y b) con 60 % de la abertura del atenuador del HS.

Por otra parte al realizarse el análisis de la cantidad de potencia radiativa que incide, tanto en el cono interior como en el borde de la abertura del calorímetro, a través de un trazado de rayos. En la figura A1.18 se muestra la distribución de radiación para el caso en el cual el atenuador del HS se encuentra abierto completamente. Con este trazado de rayos se puede estimar la razón de potencia radiativa que llega tanto a la cara del calorímetro como a su cono receptor, y con ello se evalúa la fracción de potencia absorbida por cada uno de ellos.

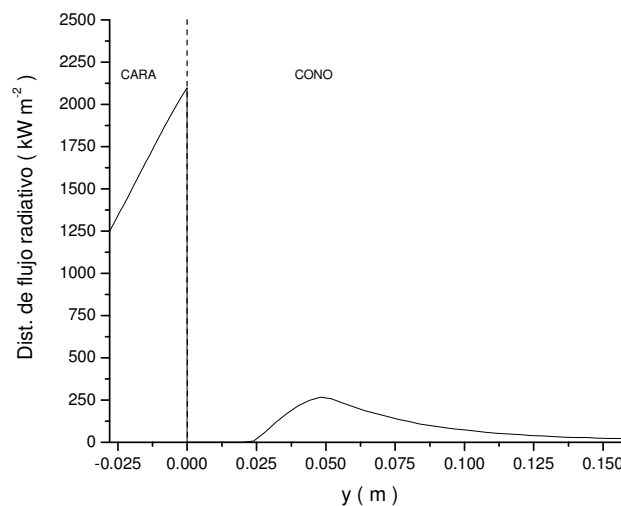


Figura A1.18. Distribución de radiación tanto en el cono.

La tabla A1.6 muestra la cantidad de potencia radiativa que entra a través de la abertura y la potencia incidente sobre la cara del calorímetro.

Tabla A1.6. Potencia radiativa incidente en cada prueba.

Abertura del atenuador	$Q_{in, cono}$ [W]	$Q_{in, cara}$ [W]	Q_c [W]
20%	393	717	495
30%	592	1080	833
40%	797	1454	1141
50%	992	1910	1568

En la figura A1.19 se muestran las imágenes de la mancha solar concentrada que incidió tanto en la abertura de CAVICAL como en el blanco lambertiano para concentraciones de 20 y 70%. En esta figura se observa la distribución de radiación que incide en ambos casos. Por otra parte se observa como se dio el incremento de flujo radiativo concentrado en ambos casos y como el deterioro del escudo altera la forma de la distribución espacial de la radiación incidente en CAVICAL. Por otra parte es importante destacar que para el caso de la imagen donde una fracción de la radiación incidente llega a la periferia de la abertura del calorímetro, donde esta es absorbida por la cara por lo que en esta zona se sobrestima la medición hasta en un 40%.

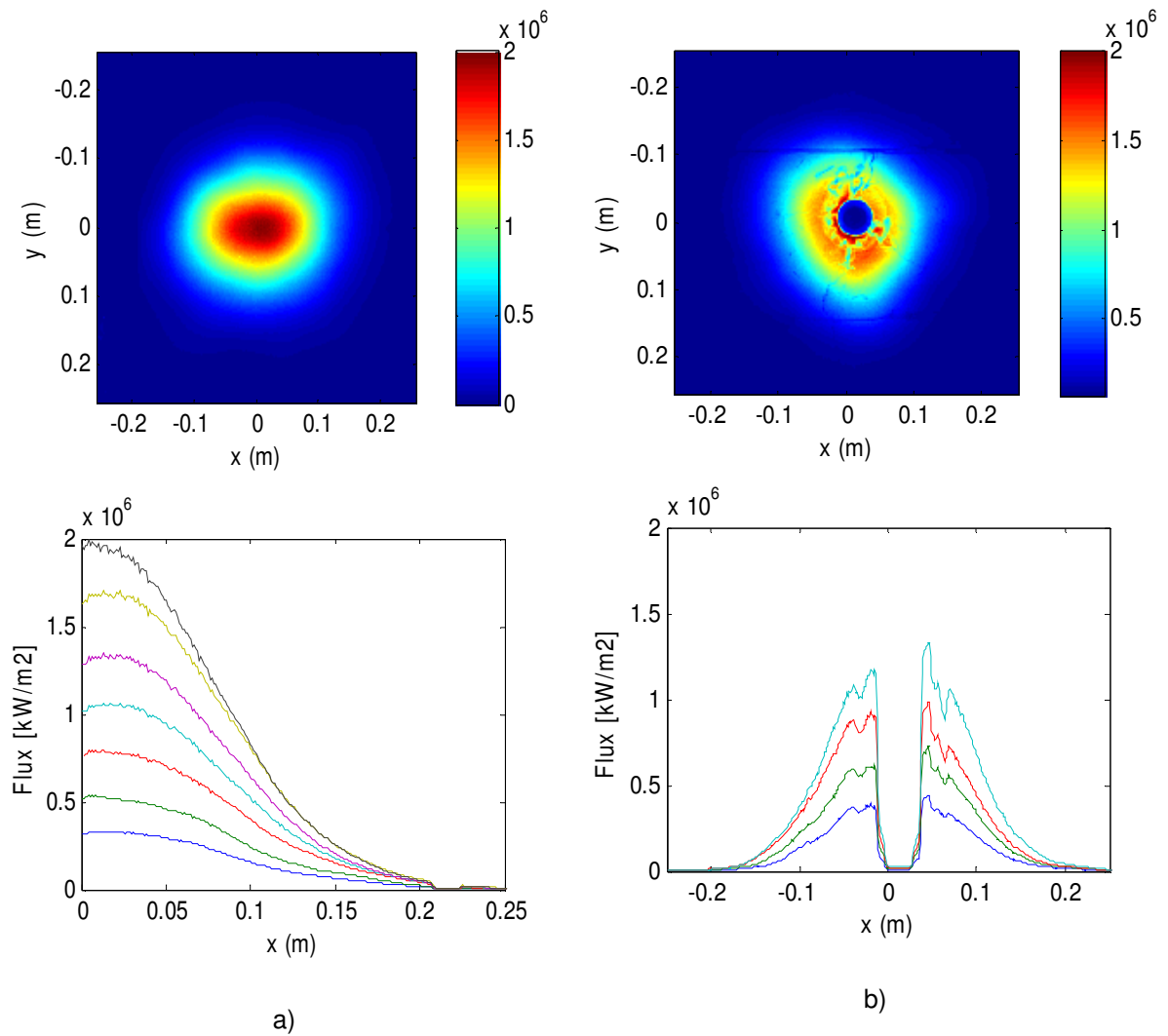


Figura A1.19. Distribución de la radiación a) con 70% de la abertura del atenuador del HS incidiendo en el blanco lambertiano y b) con 40 % de la abertura del atenuador del HS incidiendo en la abertura de CAVIRAD.