



**Universidad Nacional Autónoma de México
Centro de Investigación en Energía**



TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA – Energía (Fototérmica)

**Diseño, Construcción y Puesta en Operación de un
Calorímetro de Cavidad Cónica para un Concentrador Solar
de Foco Puntual (DEFAC)**

Carlos Alberto Pérez Rábago

Director de Tesis: Dr. Claudio A. Estrada Gasca

Temixco, Mayo del 2003

Mis padres

Rodolfo Pérez Pérez
Aurora Rábago González

al amor de mi vida

Catalina Fabiola de Alba Rosano y su hijo Sebastián

y a la Familia

Mercader Pérez (Lupita, Rafael, Rafa, Israel, Dany y Luis Adrián)

Con amor y agradecimiento

Agradecimientos

Al Dr. Claudio A. Estrada Gasca, director de esta tesis, por su invaluable ayuda en el desarrollo de la investigación y corrección de la tesis. Le agradezco también sus enseñanzas y su apoyo.

A los miembros de mi jurado, Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros, Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes, Dr. Roberto Best y Brow, Dr. Jaime Cervantes de Gortari, les agradezco sus observaciones y sugerencias para mejorar el documento.

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

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

Agradezco al Sr. Simón Ortiz Juárez miembro del taller del CIE, el cual realizó la construcción del calorímetro de cavidad cónica.

Al Centro de cómputo del CIE, por su apoyo en el servicio de mantenimiento de las computadoras empleadas, así como de la red.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes por su apoyo durante todo el proceso de realización de la tesis, y a la Dra. Guadalupe Huelsz Lesbros por su apoyo en la culminación del documento.

Al Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar por su valioso apoyo durante la etapa de instrumentación y realización de la experimentación con el calorímetro, así como al Ing. Oscar Gomezdaza Almendaro que me ayudó en la caracterización de los espejos y al M.C. José Campos Álvarez que me apoyó en el sistema de control del seguimiento del DEFRAC.

A Rafael e Israel Mercader Pérez por su apoyo en la realización de los dibujos del DEFRAC y la asesoría para la construcción del código en C para el cálculo de la distribución de flujo radiativo.

A amigos del CIE, Jorge Andaverde, Janet Ruiz, Yamilet Rodríguez, Guillermo Barrios, Set Jubal Castillo, Sayra Orozco, Cony, Sergio Cuevas, Rocío Castañera, Jorge Ovidio, David Molina, Eva Pliego, Luis Romeo, German Pérez, Bety, Pancho Morales, Roberto Acosta, les agradezco todo su apoyo durante mi trabajo de tesis.

Nuevamente agradezco el apoyo que me han otorgado mis hermanos y hermanas: Aurora, Javier, Rodolfo, Lupita, Conchita, Eduardo, Pepe, Martha, así como sus respectivas familias.

A todos mis amig@s de CVX en especial a Checo, Celia y Marcelo por todo el cariño y apoyo que me brindaron.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, la construcción y la puesta en operación de un receptor de cavidad cónica para ser usado como calorímetro en el concentrador solar de foco puntual denominado Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Altamente Concentrados (DEFAC) del CIE-UNAM. Este calorímetro permite determinar la potencia de concentración solar del DEFAC. La finalidad al construir este tipo de receptor de cavidad fue lograr concentrar el total de la potencia del DEFAC y reducir al máximo posible las pérdidas de energía y aumentar la eficiencia de absorción.

Para diseñar el dispositivo, se realizó un análisis teórico de la eficiencia de absorción del receptor, de la emitancia aparente de la cavidad, así como una simulación de la distribución de flujo radiativo en el interior del cono. Con los resultados de los análisis anteriores se llevó a cabo una optimización de los parámetros de diseño para obtener un receptor con una alta absortancia aparente, con una alta eficiencia de absorción y con una distribución más homogénea de flujo en el interior del cono, que permita una mejor remoción de calor. Los parámetros obtenidos fueron los siguientes: el radio de apertura de la cavidad $R_a = 1.62$ cm, el ángulo de apertura del cono $\omega = 15^\circ$, la relación de baffle $\xi = 0.65$, el radio de la base del cono $R_o = 4.28$ cm y la altura del cono $L = 159.9$ mm. Se calculó la emitancia aparente de la cavidad resultando ser de 98%, correspondiéndole una eficiencia de absorción del 95% para una temperatura de operación de 500 K. El calorímetro se construyó utilizando acero inoxidable y cobre como materiales base del cuerpo del dispositivo. Estos materiales se seleccionaron después de un análisis que consideró, entre otras cosas, las temperaturas máximas permitidas, la alta conductividad térmica y la resistencia a la corrosión.

Por último, se realizan una serie de experimentos, para evaluar la cavidad calorimétrica, donde se determinó la potencia de concentración del sistema, la eficiencia de absorción del receptor, así como la distribución del flujo radiativo en las paredes del receptor. Se determinó experimentalmente que la eficiencia de absorción de la cavidad calorimétrica operando el DEFAC con los 18 espejos fue del 96.3%.

Índice

1. Introducción	
1.1 Energía, medio ambiente y energía solar	1
1.2 Sistemas de concentración solar	2
1.3 Descripción del DEFRAC	4
1.4 Descripción del calorímetro de placa plana	6
1.5 Potencia solar concentrada	8
1.6 Objetivo	11
2. Eficiencia de Absorción, Emisividad Aparente y Distribución de Flujo Radiativo en una Cavity Cónica	
2.1 Problema físico y calorímetro de cavidad	13
2.2 Eficiencia de absorción en una cavidad cónica	16
2.3 Emitancia aparente de una cavidad cónica	20
2.4 Emitancia aparente de una cavidad cónica con baffle	23
2.5 Resultados de las simulaciones para la emitancia aparente	29
2.6 Cálculo de la distribución de flujo radiativo	33
3. Diseño y Construcción del Calorímetro	
3.1 Absortancia de la pintura del receptor y la reflectancia de los espejos	36
3.2 Definición de parámetros geométricos y emitancia aparente de la cavidad	38
3.3 Descripción general del calorímetro	42
3.4 Otras consideraciones del diseño	44
3.5 Descripción de los componentes	47
4. Instrumentación, Operación del Sistema y Diseño Experimental	
4.1 Instrumentación y montaje del calorímetro	53
4.2 Operación del sistema experimental	58
4.3 Diseño experimental	62
4.4 Metodología experimental	63
5. Resultados Experimentales y Análisis	
5.1 Características generales de los elementos comunes en las experimentaciones	66
5.2 Resultados experimentales para el grupo de espejos A	68
5.3 Resultados experimentales para el grupo de espejos B	74
5.4 Resultados experimentales para el grupo de espejos C	78
5.5 Resultados experimentales para los 18 Espejos	82
5.6 Potencia de concentración del DEFRAC y eficiencia térmica de la cavidad	86
5.7 Comparación con experimentos anteriores	91
6. Conclusiones y Recomendaciones	94

Referencias	98
-------------	----

Apéndices

A1	Transferencia Radiativa	101
A2	Aspectos geométricos de una cavidad cónica	104
A3	Sistema de seguimiento del DEFRAC	107
A4	Óptica de los espejos del DEFRAC	112
A5	Análisis de incertidumbre	117
A6	Planos	119
A7	Programas	128

Nomenclatura

Absortancia	α
Absortancia aparente	α_a
Ángulo de apertura del cono	ω
Ángulo solar	ν
Ángulo solar proyectado	ν_p
Área de la apertura	A_a
Área de la cavidad	A_ω
Área del baffle	$A_{\omega b}$
Área del cono	$A_{\omega c}$
Calor entrante a la cavidad	Q_{in}
Calor entrante por la apertura	Q_{ap}
Calor removido por el fluido del calorímetro	Q_c
Calor saliente de la cavidad	Q_{out}
Capacidad calorífica del fluido de enfriamiento (agua)	C_p
Declinación del día	δ
Distancia focal	L_f
Emitancia aparente	ϵ_a
Emitancia de pared	ϵ
Error de la imagen en sentido r	σ_r
Error de la imagen en sentido s	σ_s
Factor de sombreado	F
Flujo másico	\dot{m}
Irradiancia	I
Irradiancia directa	I_b
La eficiencia de absorción	η_{ab}
Latitud del lugar	ϕ
Longitud de la cavidad	L
Número aleatorio para el ángulo φ de propagación	R_φ
Número aleatorio para el ángulo θ de propagación	R_θ
Número aleatorio para el punto de propagación	R_p
Número aleatorio para la absortividad	R_α
Potencia reflejada por los espejos	P_ρ
Radiación emitida aparente (brillantes)	B
Radio de la apertura de la cavidad	R_a
Radio óptimo de la apertura de la cavidad	$[R_a]_{\text{óptimo}}$
Radio de la base del cono	R_o
Radio de los espejos	R_e
Razón de baffle $\frac{R_o - R_a}{R_a}$	ξ
Reflectancia	ρ
Temperatura de la apertura de la cavidad	T_a

Temperatura de pared de la cavidad	T_w
Temperatura del flujo a la entrada del calorímetro	T_e
Temperatura del flujo a la salida del calorímetro	T_s
Trasmitancia	τ
Trayectoria del fotón dentro de la cavidad	β

Lista de figuras

1.1	Diferentes tipos de sistemas de concentración solar para la producción de electricidad, a) Sistemas de enfoque lineal, b) Sistemas de torre central, y c) Sistemas de disco	3
1.2	Diagrama del DEFRAC	5
1.3	Fotografía del DEFRAC	5
1.4	Esquema del calorímetro de placa plana	6
1.5	Fotografía del calorímetro de placa plana	7
1.6	Fotografía del calorímetro de placa plana en operación mostrando la mancha solar	7
1.7	Distribución de flujo concentrado en un receptor circular plano por los 18 espejos del DEFRAC	9
2.1	a) Esquema del DEFRAC con el receptor calorimétrico de cavidad cónica y b) esquema del calorímetro con flujos de calor	14
2.2	Geometría de la cavidad cónica	15
2.3	Distribución de la potencia concentrada ajustada con una gaussiana y los resultados de la simulación con CIRCE2	17
2.4	Gráfica de la eficiencia de absorción para una cavidad, en función del radio de apertura, para diferentes temperaturas de pared	18
2.5	Eficiencia de absorción de una cavidad en función de la temperatura de pared, para diferentes radios	18
2.6	Radio óptimo de apertura de la cavidad en función de la temperatura máxima de operación	19
2.7	Eficiencia de absorción en función de la temperatura máxima de operación para diferentes radios de apertura	20
2.8	Intercambio radiativo entre dos elementos diferenciales de área en la cavidad cónica	21
2.9	Gráfica de los resultados de la emitancia aparente en función del ángulo de apertura para diferentes emitancias de la pared	23
2.10	Esquema de la cavidad cónica y la proyección de un rayo aleatorio	24
2.11	Vistas del sistema de coordenadas para el punto P_o en el plano de coordenadas sobre la superficie del cono, a) longitudinal y b) transversal	25
2.12	Diagrama de flujo del programa MC-HSS	29
2.13	Gráfica comparativa entre el número de fotones contra el valor de la emisividad aparente ϵ_a	30
2.14	Gráfica de la emitancia aparente ϵ_a de la cavidad cónica sin bafle, calculada con el modelo numérico de Monte Carlo	31
2.15	Gráfica de la ϵ_a en función de ϵ calculada con Monte Carlo para un ángulo de apertura ω de 15°	32
2.16	Gráfica de la ϵ_a en función de ϵ calculada con Monte Carlo para un ángulo de apertura ω de 30°	32
2.17	Diagramas de posición del receptor con respecto al marco hexagonal, a) el punto focal en la apertura de la cavidad, b) el punto focal en el centro	

	de la cavidad, c) el punto focal en la punta de la cavidad	33
2.18	Distribución de flujo radiativo para diferentes posiciones del receptor, a) el punto focal en la apertura de la cavidad, b) el punto focal en el centro de la cavidad, c) el punto focal en la punta de la cavidad	34
2.19	Distribución de flujo radiativo por grupo de espejos	35
3.1	Reflectancia difusa $\rho_{\lambda d}$ para la pintura negro mate	37
3.2	Reflectancia del espejo muestra	39
3.3	Parámetros de diseño a considerar	40
3.4	Gráfica de la ε_a en función de ω , para diferentes ξ	40
3.5	Gráfica de L en función de ω , para diferentes ξ	41
3.6	Gráfica de L en función de ε_a , para diferentes ξ	41
3.7	Diagrama de los parámetros de diseño para la construcción de la cavidad	42
3.8	Distribución radial del flujo convectivo en el interior del calorímetro	43
3.9	Vista 3D y corte longitudinal del calorímetro de cavidad cónica mostrando entrada y salida del fluido de enfriamiento	43
3.10	Flujo cónico en el interior del calorímetro	46
3.11	Diagrama de los espejos en el marco hexagonal	46
3.12	Diagrama y fotografía del cuerpo principal	48
3.13	Diagrama y fotografía del difusor del flujo	49
3.14	Diagrama y fotografía de la cámara receptora del flujo interno	49
3.15	Diagrama y fotografía cono receptor	50
3.16	Diagrama y fotografía tolva protectora de la cavidad	51
3.17	Diagrama y fotografía del pasamuros del calorímetro	51
3.18	Fotografías del calorímetro de cavidad cónico a) sus partes, b) armado	52
4.1	Distribución de los termopares a lo largo de la cavidad cónica: a) esquema de las posiciones de los termopares y b) fotografía de los termopares fijados en la cavidad cónica	55
4.2	Pirheliómetro con el equipo de seguimiento del sol	56
4.3	Calorímetro armado e instrumentado listo para hacer experimentación	57
4.4	Esquema del arreglo general y la orientación del sistema experimental	58
4.5	Orientación e inclinación del marco principal del DEFRAC con la horizontal	59
4.6	a) Proyección del disco superior en el disco inferior, b) imagen del ajuste de la sombra en el disco inferior	60
4.7	Clasificación de los espejos por su distancia al eje principal del DEFRAC	61
4.8	Ajuste de la espejos del concentrador, a) muestra como con la imagen central se busca ajustar el espejo desajustado b) muestra como los dos espejos ajustados forman una sola imagen denominada "el spot" concentrado	62
5.1	Distribución de los termopares a lo largo de la cavidad cónica.	68
5.2	Distribución de temperaturas en la pared interior del cono durante la exposición, con el grupo de espejos A.	70

5.3	Temperaturas del flujo refrigerante en estado estacionario, para el experimento con el grupo de espejos A.	71
5.4	Mediciones a través del tiempo de las temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, para los experimentos con el grupo de espejos A.	72
5.5	Distribución de temperaturas a lo largo del eje Z en la pared interior del receptor para el estado estacionario, durante la experimentación con el grupo de espejos A.	73
5.6	Distribución de temperaturas en la pared interior del cono durante toda la exposición, con el grupo de espejos B.	74
5.7	Gráfica que muestra la perturbación en el flujo radiativo y el tiempo de respuesta para los puntos más altos del receptor cónico.	75
5.8	Temperaturas del flujo de enfriamiento en estado estacionario, para el experimento con el grupo de espejos B.	76
5.9	Mediciones a través del tiempo de las temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, con el grupo de espejos B.	77
5.10	Distribución de temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, para el experimento con el grupo de espejos B.	78
5.11	Historia de temperaturas en la pared interior del cono durante toda la exposición, con el grupo de espejos C.	79
5.12	Historia de temperaturas del fluido refrigerante en estado estacionario, con el grupo de espejos C.	80
5.13	Mediciones a través del tiempo de las temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, con el grupo de espejos C.	81
5.14	Distribución de temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, con el grupo de espejos C.	81
5.15	Distribución de temperaturas en la pared interior del cono durante toda la exposición, con todos los espejos.	83
5.16	Distribución de temperaturas del flujo refrigerante en estado estacionario, con todos los espejos.	84
5.17	Mediciones a través del tiempo de las temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, con todos los espejos.	85
5.18	Distribución de temperaturas a lo largo del eje Z en la pared interior del receptor en estado estacionario, para el exp. con todos los espejos.	85
5.19	Esquema representativo del flujo conductivo a través de las paredes del receptor.	89
5.20	Distribución de temperaturas a lo largo del eje Z en la pared interior y exterior, para el exp. con el grupo de espejos B.	89
5.21	Receptor con los flujos de calor involucrados en el proceso.	91
A1.1	Esquema de la distribución de la radiación incidente.	101
A2.1	Esquema de la cavidad cónica.	103
A3.1	Diagrama del DEFRAC.	106
A3.2	Esquema de control del motor	108
A3.3	Diagrama de la interfase de control entre la computadora y el control del	

motor	108
A4.1 Comparación entre un espejo paraboloïdal y un esférico	112
A4.2 Diagrama de los espejos en el marco hexagonal	113
A4.3 Diagrama de la proyección de la imagen solar	114

Lista de tablas

2.1 Error porcentual del modelo Monte Carlo vs el analítico.	30
3.1 Distribución espectral para la reflectancia de la pintura.	37
3.2 Distribución espectral para la reflectancia del espejo.	38
3.3 Parámetros de diseño.	41
3.4 Propiedades físicas del acero inoxidable AISI 316 y del cobre.	45
3.5 Distancia focal y ángulo normal de los espejos.	46
5.1 Propiedades termofísicas del agua	66
5.2 Factor de sombreado por grupo de espejos	67
5.3 Posición en z de cada termopar	68
5.4 Gasto másico para el experimento con el grupo A	66
5.5 Temperaturas del flujo de enfriamiento para el exp. con el grupo A	72
5.6 Gasto másico para el experimento con el grupo B	76
5.7 Temperaturas del flujo de enfriamiento para el exp. con el grupo B	77
5.8 Gasto másico para el experimento con el grupo C	79
5.9 Temperaturas del flujo de enfriamiento para el exp. con el grupo C	80
5.10 Gasto másico para el experimento con todos los espejos	83
5.11 Temperaturas del flujo de enfriamiento para el exp. con todos los espejos	84
5.12 Valores promedios de parámetros registrados en la experimentación para el cálculo de la potencia removida por el fluido de cada caso estudiado.	87
5.13 Resumen de valores de radiación incidente para los experimentos.	87
5.14 Tabla comparativa de la potencia incidente Q_{in} , evaluado por calorimetría y por flujo radiativo.	87
5.15 Eficiencia de apertura de la cavidad cónica.	88
5.16 Temperatura de pared $[T_w]_{int.}$	90
5.17 Potencia térmica que pasa por la apertura de la cavidad.	90
5.18 Tabla resumen de las pérdidas radiativas y convectivas dentro de la cavidad.	91
5.19 Valores de los resultados del cálculo numérico.	92
A3.1 Ángulo de apertura del cono solar por grupo de espejos.	101
A4.1 Características de motor del DEFRAC.	106
A4.2 Características del reductor de velocidades.	106
A4.3 Tabla de verdad para el programa de control del motor.	108
A5.1 Distancia focal y ángulo normal de los espejos.	112
A5.2 Diámetro del spot.	113

Capítulo 1

Introducción

1.1 Energía, medio ambiente y energía solar

El hombre a lo largo de toda su historia ha requerido de la energía para realizar sus actividades. Desde que apareció en la faz de la tierra hasta el inicio de la industrialización en Europa, fueron las energías renovables, la energía solar, las que en varias de sus formas le dieron a los hombres el calor para cocinar y calentarse, el viento para transportarse en ríos y mares, la potencia para la molienda y el bombeo de agua, etc. Como bien se sabe, hoy en día la principal fuente de energía de las sociedades humanas es el petróleo. Más del 90% de la energía consumida actualmente en el mundo es energía fósil que contiene carbón (petróleo, carbón, gas natural) así como otras fuentes energéticas (madera, desperdicio agrícola y forestal) [Winter, 1991].

El uso indiscriminado de los combustibles fósiles ha y está causando, por un lado, un daño ecológico irreversible en muchas partes del mundo, y por el otro, y este posiblemente sea el más importante, el cambio climático debido a la acumulación en la atmósfera de los gases producidos en los procesos de combustión de los combustibles fósiles. También es importante recordar que los combustibles fósiles son finitos en cantidad y que ya se prevé su agotamiento para la próxima centuria [Houghton, 2001].

Los problemas de contaminación ambiental se agudizan con el paso del tiempo, por ello es necesario aplicar políticas para la reducción y el control de las emisiones de contaminantes, así como la reducción en la generación de gases invernadero. Ante

esta situación, toma especial importancia la alternativa de suplir las fuentes de combustibles fósiles por fuentes renovables de energía, que son no contaminantes.

Entendemos por fuentes de energía renovable a las que administradas de forma adecuada, puede explotarse ilimitadamente. Para tener un país con desarrollo sustentable es necesario que todos los recursos energéticos sean de este tipo.

Durante las primeras dos décadas del siglo XXI se requerirá una capacidad considerable de generación de electricidad. La Agencia Internacional de Energía (IEA) señala en un reporte de 1996, que debido al crecimiento poblacional y al desarrollo económico, para el año de 2010, el consumo de energía se incrementará, de un 34 a un 46 por ciento sobre la base de 1993, y en más del doble para el 2030. En los países en desarrollo la demanda se podría duplicar para el 2010, que es el caso de México [World Energy Outlook, 1996].

La energía solar es la energía renovable por excelencia, que está siendo ya utilizada en varias partes del mundo, y que tiene un gran potencial de ser una de las fuentes básicas del suministro energético mundial en un futuro próximo. Para hacer posible el uso de la energía solar a gran escala, se requieren desarrollar tecnologías que mejoren su eficiencia, y logren disminuir los costos de producción que en estos momentos las hacen poco competitiva contra las tecnologías de las fuentes convencionales de energía [Ruiz , 2000].

Por su ubicación geográfica, México se encuentra en la franja de mayor insolación del planeta. Por ello tiene una posición ideal para el uso de sistemas solares. Para avanzar en el aprovechamiento de la energía solar en nuestro país, es necesario que se investiguen y desarrollen técnicas, metodologías y sistemas, además de las aplicaciones.

1.2 Sistemas de concentración solar

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

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

Pensando en la generación de potencia eléctrica, la tecnología fotovoltaica es, en la actualidad, la tecnología solar con mayor penetración en el mercado mundial; sin embargo, sus eficiencias son aún bajas y sus costos son elevados con respecto a las plantas con energéticos convencionales. Por otro lado, las tecnologías fototérmicas han demostrado tener eficiencias mayores y en el escalamiento adecuado serán competitivas con las tecnologías de energías convencionales [Kolb , 2000].

Existen tres tipos de sistemas termosolares de generación de potencia eléctrica con concentración solar que han alcanzado un desarrollo significativo, a saber:

- a. Los sistemas de enfoque en línea que concentran la radiación solar en tubos colocados a lo largo de la línea de enfoque, por ejemplo a través de un canal parabólico reflejante, ver Figura 1.1a.
- b. Los sistemas de enfoque puntual tipo torre central, los cuales utilizan grandes campos de reflectores que siguen el movimiento aparente del sol (helióstatos) para concentrar la luz solar en un receptor colocado en la parte superior de una torre, ver Figura 1.1b.
- c. Los sistemas de enfoque puntual que utilizan platos o discos paraboloïdales para reflejar la radiación solar en un receptor colocado en el foco del paraboloïde, Figura 1.1c.

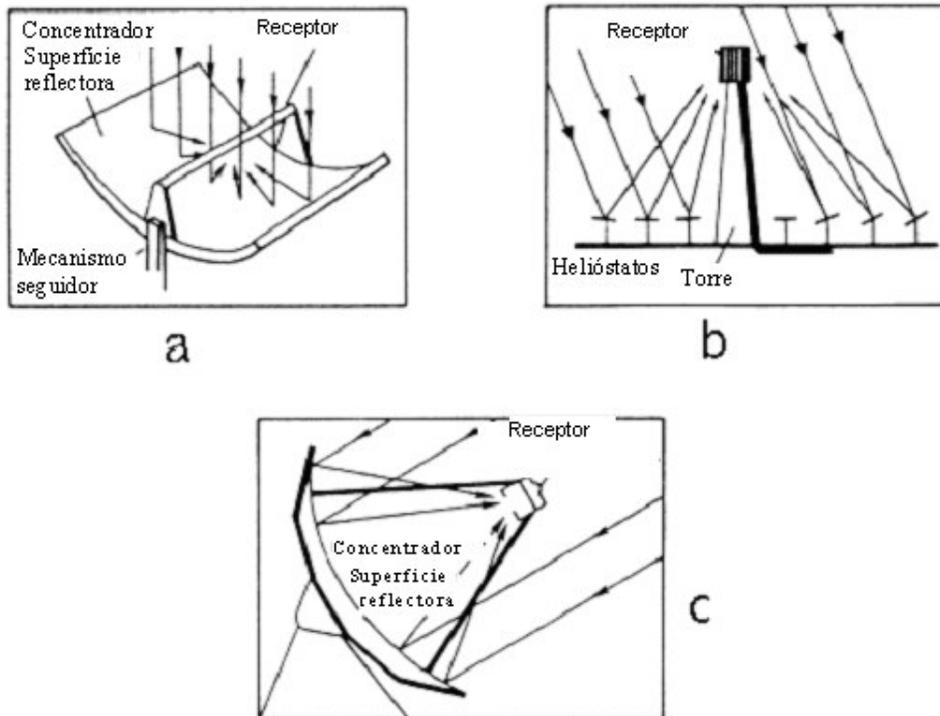


Figura 1.1. Diferentes tipos de sistemas de concentración solar para la producción de electricidad, a) Sistemas de enfoque lineal, b) Sistemas de torre central, y c) Sistemas de disco.

En los sistemas referidos en los incisos a y b, una vez transformada la energía solar en energía térmica, ésta se trasfiere a un fluido de trabajo en un ciclo de Rankine convencional de producción de electricidad. En los sistemas del inciso c, el receptor está acoplado a un motor Stirling y éste a su vez a un generador eléctrico, todo el conjunto trabaja como una sola unidad. Estos últimos sistemas han demostrado un desempeño excepcional. En 1984 el sistema Disco/Stirling Advanco Vanguard-I, utilizando un motor Stirling de 25-kWe alcanzó un eficiencia de conversión del 29.4% (neta), lo cual es aún un récord mundial [Stine, 1994].

Estas tres tecnologías termosolares han probado ser una respuesta práctica a la generación de potencia eléctrica con una fuente energética renovable ante las preocupaciones sobre los combustibles que alimentan las plantas tradicionales de energía, y al problema de la contaminación del medio ambiente que éstas producen.

1.3 Descripción del DEFRAC

En el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la Universidad Nacional Autónoma de México se viene realizando investigación básica y aplicada y desarrollo tecnológico en la generación, transmisión, conversión, almacenamiento, utilización e impactos de la energía, en particular de las fuentes renovables. La Coordinación de Concentración Solar (CCS) de dicho Centro se dedica a estudiar los sistemas de concentración solar, como los anteriormente descritos y sus aplicaciones.

En dicha Coordinación se construyó, para fines de investigación y desarrollo tecnológico, un dispositivo denominado DEFRAC (Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Altamente Concentrados). El DEFRAC es un concentrador solar de foco puntual, formado por tres grupos de 6 espejos cada uno, sumando el conjunto 18 espejos. Cada grupo de espejos tiene la misma distancia focal y cada espejo es de 30 cm de diámetro y 1.9 cm de espesor. Los espejos concentran la radiación solar en la zona focal del concentrador que se localiza a 2.0 m de distancia del plano que soporta a los espejos, [Estrada, 1995]. La figura 1.2 muestra un esquema general donde se señalan las partes importantes del concentrador y la figura 1.3 presenta una fotografía del mismo.

El sistema cuenta con una montura de tipo ecuatorial, consistente en un marco principal y un marco hexagonal. El marco principal, soportado en dos bases piramidales por medio de dos chumaceras, puede girar sobre ellas en un eje que es paralelo al eje de la tierra, debido a que la inclinación del sistema, es la misma a la latitud ϕ del lugar (18.5° latitud norte). A su vez, el marco hexagonal está soportado por otras dos chumaceras al marco principal y puede girar en un eje perpendicular al anterior de tal forma que permite el ajuste del concentrador a la declinación solar. Sobre este marco hexagonal se encuentran fijos los 18 espejos.

El área total de captación del concentrador solar con los 18 espejos es de 1.27 m². Los espejos proyectan la imagen solar al receptor que se encuentra a una distancia focal equivalente de 2.00 m de la base del marco hexagonal. Esta imagen solar es

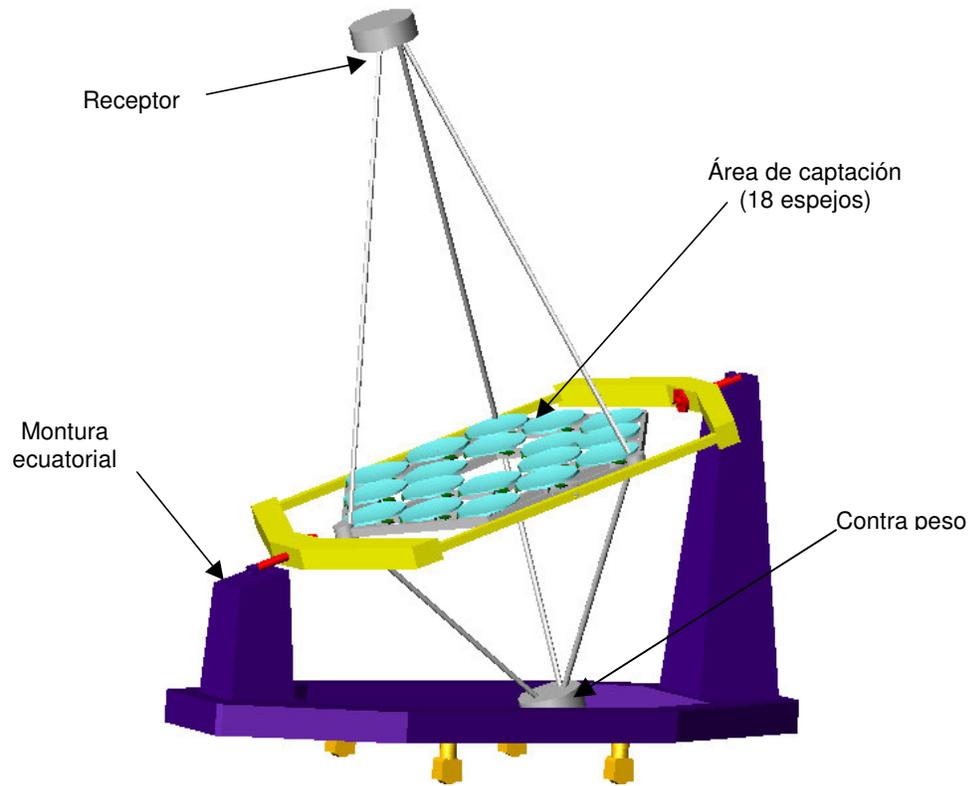


Figura 1.2. Diagrama del DEFRAC



Figura 1.3. Fotografía del DEFRAC

aproximadamente un círculo y se denomina “mancha solar” o “spot solar”, la cual tiene un diámetro de 2.6 ± 0.2 cm [Quiñones, 1997 y Estrada, 1998].

Se han realizado los estudios de caracterizaciones dinámica y óptica [Quiñones, 1997 y Grajeda, 1997] así como térmica del DEFRAC [Estrada, 1998, Cruz 1997]. En el último estudio, se determinó la potencia concentrada por el dispositivo usando un calorímetro de placa plana como receptor del sistema de concentración y la técnica de calorimetría de agua fría. También se ha realizado un estudio específico para conocer las condiciones reales de operación del receptor [Acosta, 2001].

1.4 Descripción del calorímetro de placa plana

El calorímetro de placa plana que se ha usado con el DEFRAC tiene la función de recibir el flujo radiativo solar concentrado y transferir el calor absorbido al fluido térmico. El calorímetro es de acero inoxidable, tiene geometría cilíndrica y tiene dos platos planos circulares paralelos (11 cm de diámetro efectivo y espaciados 1 cm) por donde circula el fluido refrigerante (agua) en un régimen de flujo radial. La figura 1.4 muestra un esquema de los espejos y el calorímetro donde se puede ver la placa receptora de la radiación solar concentrada y la figura 1.5 muestra una fotografía del mismo calorímetro [Acosta, 2001].

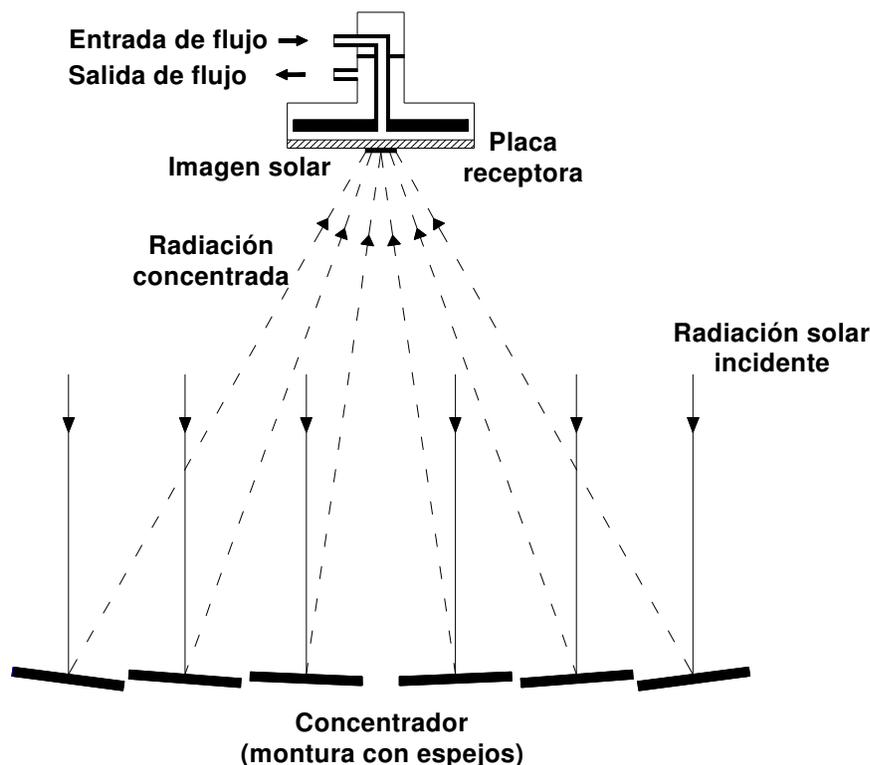


Figura 1.4. Esquema del calorímetro de placa plana.

El calorímetro de placa plana actúa como receptor de la radiación solar concentrada por los espejos. Es en esta superficie donde se forma la imagen solar concentrada.

Parte de la energía que incide es absorbida por la placa, elevando su temperatura, otra parte es reflejada. De la energía absorbida, parte es transferida por conducción a través de la placa hasta la cara interior, y de allí, por convección forzada al fluido refrigerante (agua). Otra parte de la energía absorbida se pierde al medio ambiente por transferencia de calor convectivo y radiativo desde la superficie exterior. La temperatura de la placa receptora se puede controlar con el flujo másico del fluido refrigerante. La figura 1.6 muestra una fotografía del calorímetro de placa plana en operación.



Figura 1.5. Fotografía del calorímetro de placa plana.

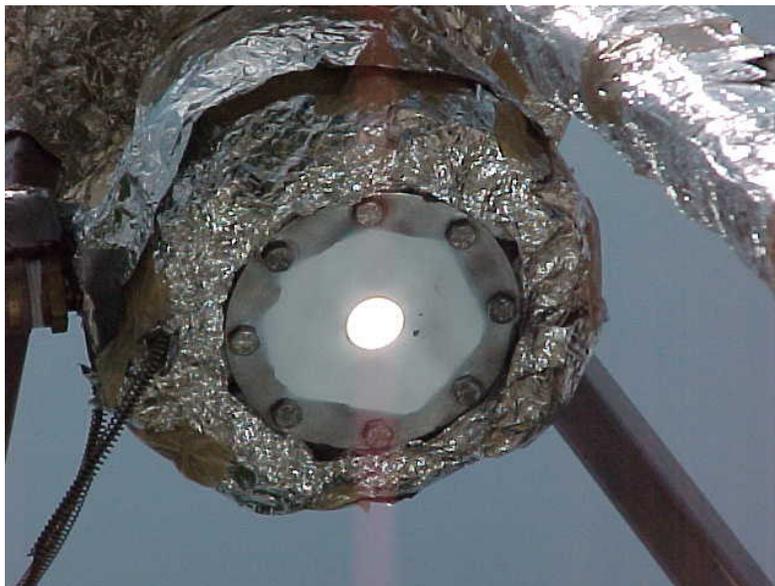


Figura 1.6. Fotografía del calorímetro de placa plana en operación mostrando la mancha solar.

1.5 Potencia solar concentrada

Para determinar la potencia solar concentrada por el DEFRAC en el receptor, donde la radiación solar se absorbe y se trasmite como energía térmica al fluido de trabajo, existen varios métodos que se mencionan a continuación

1. Un primer método, conocido como trazado de rayos, consiste en una simulación numérica del comportamiento de los rayos solares al incidir en el sistema óptico del concentrador, utilizando las leyes de reflexión y las propiedades ópticas [Romero, 1994].
2. Un segundo método es el analítico, que consiste en evaluar la cantidad de radiación recibida con base en las relaciones geométricas entre los distintos componentes del concentrador y sus propiedades ópticas. Esto se puede aplicar sólo a geometrías simples y muy específicas, por lo tanto este método requiere emplear aproximaciones importantes [Jeter, 1986, Harris, 1981].
3. Un tercer método es el calorimétrico, que consiste en la medición del calor que se recibe en el receptor del sistema. La aplicación de este método implica conocer las propiedades termofísicas y ópticas del sistema concentrador.

Distribución de flujo radiativo por trazado de rayos

El método de trazado de rayos permite calcular la distribución del flujo radiativo incidente en el receptor de un sistema de concentración solar y a partir de este cálculo se determina la potencia solar concentrada por el sistema.

La técnica de trazado de rayos que se ha usado para el DEFRAC, consiste en tomar la distribución del cono solar con una distribución angular de intensidad de flujo [Romero, 1994], y proyectar ésta en cada una de los espejos o facetas, del concentrador; es decir, se proyecta sobre cada una de las secciones en las que se subdivide la superficie reflejante. La imagen solar proyectada en las facetas se convoluciona con el cono de error de la superficie reflejante, proyectándola hacia el receptor. En esta función del cono de error se integran todas las desviaciones que afectan al sistema en general, por ejemplo: errores de superficie, aberración óptica de los reflectores, errores en la forma del concentrador, errores producto del seguimiento del sol, entre otros. Finalmente la distribución de flujo que se obtiene en el receptor es la suma de cada una de las distribuciones producidas por cada faceta o subfaceta dependiendo de la simulación que se haga.

El código CIRCE2 (Convolution of Incident Radiation with Concentrator Errors) es un programa de cómputo para el modelado del comportamiento óptico de concentradores solares del tipo de foco puntual de tres dimensiones. Este código fue desarrollado en los Laboratorios SANDIA [Romero, 1994], y usa métodos estadísticos y de trazado de rayos para evaluar la distribución direccional de los rayos reflejados desde cualquier punto dado de un concentrador. Conociendo las geometrías del concentrador y del receptor, la distribución angular de intensidad de los rayos incidentes y las imperfecciones del concentrador como rugosidad y

desviaciones aleatorias de las pendientes de los espejos, el código determina la distribución de flujo radiativo y la potencia total incidente sobre el receptor. Este código se utilizó para determinar primero la distribución de flujo solar concentrado por el DEFRAC y después la potencia de concentración del sistema.

Los parámetros del DEFRAC que se fijan como datos de entrada del CIRCE2 se mencionan a continuación. El DEFRAC cuenta con un área de concentración de 1.274 m^2 distribuida en 18 espejos, con una distancia focal de 2.024 m (ver apéndice A4). El DEFRAC se considera siempre alineado al sol con una radiación incidente de 1000 W/m^2 y un error estimado como el producto de los errores de superficie y de seguimiento de $\sigma = 0.65 \text{ mrad}$ en cualquier dirección, cabe mencionar que este error se obtuvo por medio de un proceso iterativo que aproximaba la distribución de flujo en función del error, a el tamaño real de la imagen. Con estos parámetros de entrada se corre el código CIRCE2 y se encuentra que el número de soles en el pico del spot del receptor es 4612.3 soles, mientras que la potencia máxima recibida es $P_{\text{ideal}} = 1262.69 \text{ W/m}^2$, y la potencia reflejada por los espejos es $P_p = 1161.67 \text{ W/m}^2$. Por lo tanto, se puede establecer una eficiencia de concentración del 92%, con una distribución circular homogénea, esta distribución se muestra en la figura 1.7 en función del radio del spot [Estrada *et al.*, 1998].

Se puede considerar que la imagen proyectada por el concentrador es un spot circular con un radio 1.5 cm, en este círculo se concentra el 98% de la energía.

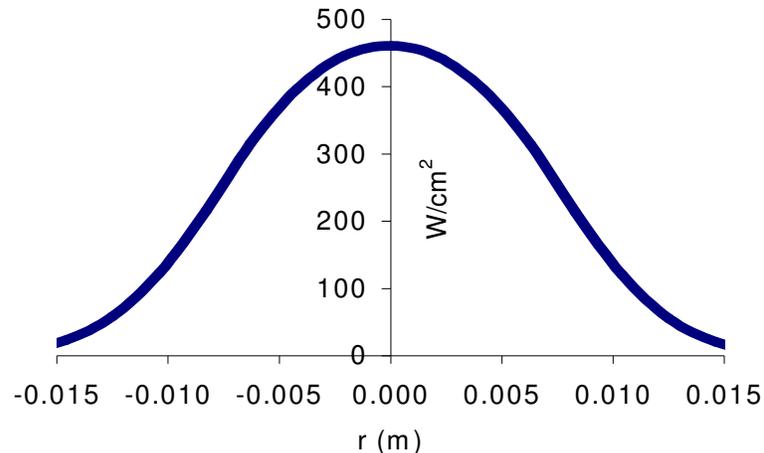


Figura 1.7. Distribución de flujo concentrado en un receptor circular Plano por los 18 espejos del DEFRAC obtenido con el código CIRCE2.

Calorimetría de agua fría

Cruz [1997] y Estrada [1998] evaluaron la potencia concentrada por el DEFRAC utilizando el método calorimétrico de agua fría. Este método consiste en determinar la potencia concentrada a partir de un balance de energía sobre la placa receptora del calorímetro, donde la energía solar absorbida por la placa se considera igual a la

energía transferida al fluido térmico. Si suponemos que la temperatura de la pared exterior de la placa, la que está expuesta a la radiación solar y al medio ambiente, es aproximadamente igual a la temperatura del medio ambiente y ésta 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 la placa es igual al calor removido por el fluido en el calorímetro (Q_c), el cual es calculado midiendo el flujo másico \dot{m} y las temperaturas del fluido tanto de entrada T_e como de salida T_s , esto es,

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

donde C_p es la capacidad calorífica del fluido de enfriamiento.

Así, si Q_{in} es la energía incidente en la placa receptora del calorímetro, entonces 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} produce

$$Q_c = \alpha \cdot Q_{in} \quad (1.2)$$

donde α es la absorptancia de la superficie de la placa. Así, conociendo α se puede determinar Q_{in} . También, si se conoce Q_{in} , entonces se puede determinar α . Es claro que la energía Q_{in} que no es absorbida por la placa, es reflejada por ésta, ya que es opaca. Así, conociendo la absorptancia α de la superficie receptora se determina su reflectancia ρ por $\rho = 1 - \alpha$.

Por otro lado, la radiación directa (I_d) que incide en los espejos multiplicada por el área de captación (A), por un factor de sombreado (F) y por la reflectancia promedio de los espejos (ρ_e), define la energía incidente en la placa receptora del calorímetro, esto es, el calor radiativo de entrada al calorímetro (Q_{in}), así,

$$Q_{in} = \rho_e \cdot FAI_d \quad (1.3)$$

y sustituyendo la ecuación 1.3 en la 1.2 queda,

$$Q_c = \alpha \cdot \rho_e \cdot FAI_d \quad (1.4)$$

Esta expresión permite determinar cualquiera de las propiedades ópticas del sistema.

El nombre de calorimetría de agua fría se debe a que el agua de entrada al calorímetro se encuentra muy próxima a la temperatura ambiente y la diferencia de temperatura del agua entre la entrada y salida es menor a los 5° C.

La técnica de calorimetría de agua fría que se ha venido implementando en el DEFAC, ha resultado ser efectiva, ya que se ha podido determinar la potencia de concentración del DEFAC. Sin embargo, también se ha podido demostrar, a partir de un estudio específico realizado por Acosta, Pérez y Estrada (2001), que la condición de temperatura de placa receptora próxima a la temperatura ambiente no es correcta; se han determinado temperaturas de hasta de 470° C en el centro de la placa, con la energía concentrada por solo 6 espejos, a pesar de manejar flujos másicos relativamente altos (1.11kg/min) y tener incrementos de temperatura pequeños (~ 5° C) entre la salida y la entrada de fluido al calorímetro. Al conocer la

distribución de temperaturas en la placa, ha sido posible calcular las pérdidas convectivas y radiativas y éstas han resultado ser pequeñas, menores al 2.5 % [Acosta 2001].

Por otro lado, la determinación de Q_{in} , se ha realizado sumando las 3 (Q_{in})_{grupo A,B,C} obtenidas de cada uno de los grupos de 6 de espejos del DEFAC. No se ha podido realizar una medición directa de la Q_{in} con todos los espejos, debido a que la superficie absorbadora es deteriorada con el aumento del flujo radiativo concentrado y consecuentemente con el aumento de la temperatura. Así mismo, la determinación de la emisividad de la superficie absorbadora ha resultado ser problemática ya que se ha venido utilizando como referencia el depósito de negro de humo. Este recubrimiento tiene algunos problemas: se degrada muy fácilmente con el aumento del flujo radiativo y la temperatura. Además, a pesar de que su emitancia está reportada en la literatura, es difícil garantizar la repetibilidad del depósito y medir esta propiedad óptica es complicada. Por esta razón no es claro si los valores reportados son o no aplicables a los depósitos usados en los experimentos.

Por lo anterior, se ha considerado el uso de un calorímetro de cavidad como receptor del DEFAC [Steinfeld, 1992 y Stine, 1998]. Éste permitiría tener un mejor control de la emisividad, manejaría altas temperaturas y se podría calcular la potencia concentrada del DEFAC utilizando todos los espejos del sistema concentrador.

1.6 Objetivo

El objetivo general de este trabajo es diseñar, construir y poner en operación un calorímetro de cavidad cónica para la determinación de la potencia térmica de un sistema de concentración de foco puntual.

Son objetivos particulares los siguientes:

- Calcular teóricamente la eficiencia de absorción, la emitancia aparente de la cavidad y la distribución de flujo radiativo dentro de la cavidad. Esto permitirá definir algunos parámetros para el diseño de la cavidad y las condiciones de operación.
- Diseñar la cavidad atendiendo a criterios ópticos, térmicos y de materiales.
- Construir el calorímetro de cavidad para el DEFAC.
- Probar experimentalmente el calorímetro.
- Analizar los resultados teóricos y experimentales.

La tesis consta de cinco capítulos. En el primero, que es el presente, se ha hecho una introducción a las fuentes renovables de energía, centrando la atención en la energía solar. También se ha dado una explicación de los distintos tipos de concentradores solares que existen para generar potencia y se ha descrito el dispositivo para el estudio de flujos radiativos altamente concentrados del CIE (DEFAC). Así mismo, se ha descrito el calorímetro de placa plana, la distribución de

flujo concentrado en el plano focal del DEFAC y la evaluación de la potencia concentrada por la técnica de calorimetría de agua fría.

En el segundo capítulo se presenta el problema físico de la cavidad cónica, el cálculo de su eficiencia de absorción, el cálculo de la emitancia aparente para cualquier geometría y propiedades ópticas de las paredes utilizando una simulación numérica con el método Monte Carlo y finalmente el cálculo de la distribución de flujo radiativo dentro de la cavidad por medio del código CIRCE2.

En el tercer capítulo se determinan los parámetros geométricos, además se define la geometría óptima para el receptor de cavidad. Por otra parte, se presentan los resultados de las mediciones de la absorción de la pintura absorbente y de la reflectancia de los espejos. También se calcula el valor de la emitancia aparente de la cavidad para la geometría definida y se presenta una descripción del calorímetro y de cada uno de sus componentes.

El capítulo cuatro describe la instrumentación, la operación general del sistema, así como el diseño de los experimentos y la secuencia de acciones para realizarlos.

En el capítulo cinco se presentan los resultados experimentales obtenidos, así como el análisis de los resultados, el cálculo de la eficiencia del calorímetro y la determinación de la potencia de concentración del DEFAC.

Finalmente, en el capítulo seis se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios.

Capítulo 2

Eficiencia de Absorción, Emitancia Aparente y Distribución de Flujo Radiativo en una Cavity Cónica

En este capítulo se presenta el problema físico del calorímetro. También se presenta el análisis para determinar tanto la eficiencia de absorción como la emitancia aparente de una cavidad cónica. Finalmente, se presenta la distribución del flujo radiativo concentrado que se espera tener dentro del calorímetro por medio de la técnica de trazado de rayos.

2.1 Problema físico y calorímetro de cavidad

En los procesos a altas temperaturas que utilizan sistemas de concentración solar de foco puntual, se requiere a menudo una absorción directa de la energía solar. Los receptores del tipo cavidad se utilizan para reducir al mínimo las pérdidas térmicas y aumentar la absorción del flujo solar entrante al receptor. Las pérdidas convectivas de calor desde la superficie interior de una cavidad son mucho menores que desde la misma superficie extendida en forma plana a la misma temperatura [Cabanillas, 2001]. El problema del tamaño de la abertura de la cavidad, es uno de los más importantes, el cual se convierte en un compromiso entre maximizar la cantidad de energía solar entrante a la cavidad y minimizar las pérdidas térmicas por radiación y convección [Steinfeld, 1992 y Hahm, 1999]. Otro problema a considerar en el diseño de estos dispositivos es el definir la geometría más adecuada. Las geometrías que han sido estudiadas son la cilíndrica, la esférica, la cónica y las geometrías híbridas basadas en las anteriores [Cabanillas, 2001]. Desde la década de los cincuenta algunos autores como Williamson (1952), consideran que la figura geométrica del cono es la aproximación más simple a los concentradores parabólicos compuestos (CPC). Si esta geometría se piensa como un receptor en lugar de un concentrador, las propiedades tendrían que ser inversas, es decir, las de un cuerpo negro. Por ello se puede afirmar que una cavidad cónica es un buen receptor de altos flujos radiativos, debido a que por su geometría, minimiza las pérdidas convectivas y sobre todo reduce las pérdidas radiativas.

La pared interior de un receptor de cavidad cónica es la que recibe y absorbe la energía solar concentrada; si esta energía no es removida de la pared, la temperatura de la misma subirá rápidamente a valores muy altos (~ 2800 K), valores que están por arriba del punto de fusión de los materiales que componen a la cavidad. Para evitar esto, se requiere acoplar a la cavidad cónica un sistema de remoción de calor utilizando un líquido de enfriamiento. Este sistema, por medio de los parámetros de flujo másico y temperatura de entrada del fluido, permite controlar la temperatura de la pared, así como determinar con certeza la cantidad de energía incidente en la cavidad. Es por esto último que a todo el receptor (cavidad-sistema de enfriamiento) se le llama receptor calorimétrico o simplemente calorímetro de cavidad.

Para este calorímetro, como ya se indicó, la fuente de calor es la radiación solar concentrada que pasa a través de la apertura de la cavidad e incide en la superficie interior del cono. Por medio de calorimetría, se calcula la cantidad de energía absorbida y con un balance energético se puede saber cual es el factor de la absorptancia aparente α_a de la cavidad o bien la potencia concentrada por el sistema concentrador (DEFRACT).

La figura 2.1 muestra un esquema de los espejos del DEFRAC y del calorímetro de cavidad cónica colocado en el plano focal del sistema que actúa como receptor del

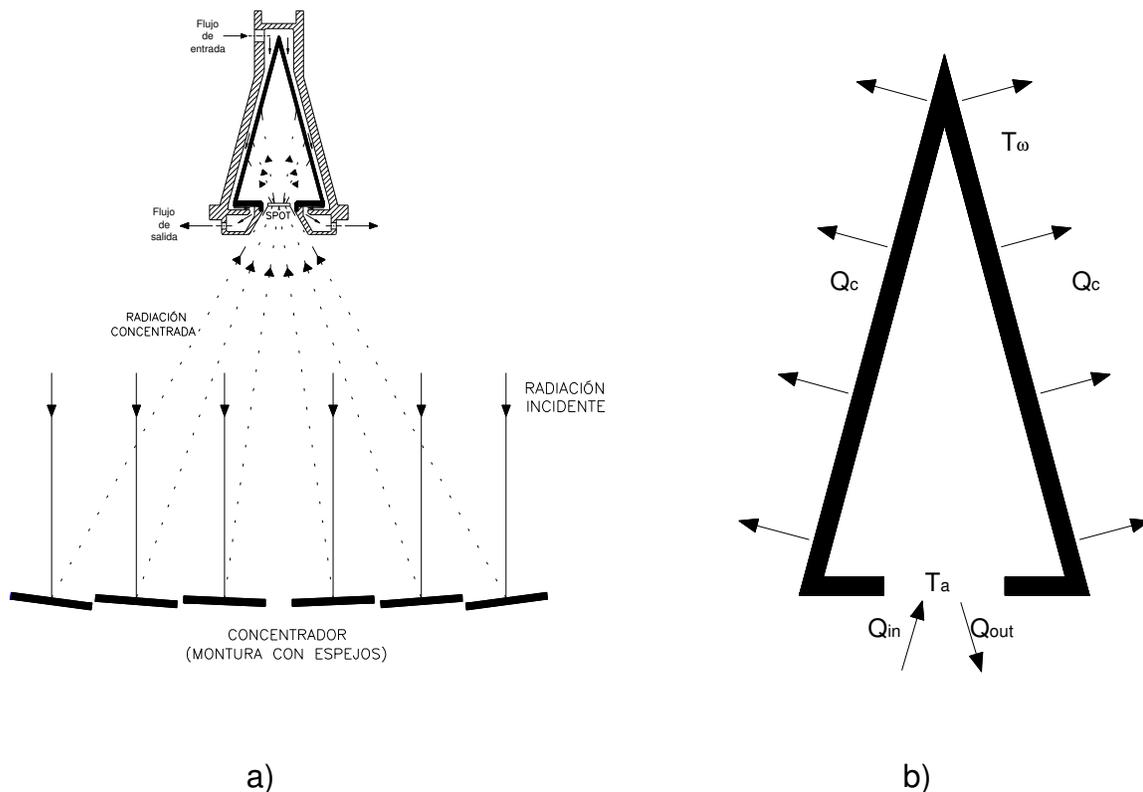


Figura 2.1. a) Esquema del DEFRAC con el receptor calorimétrico de cavidad cónica y b) esquema del calorímetro de cavidad con flujos de calor.

mismo. En esta figura se puede ver el flujo de radiación concentrada por los espejos. También se muestran la potencia térmica Q_{in} que incide en la apertura de la cavidad, la potencia térmica Q_{out} que sale de la cavidad por su apertura y la potencia térmica Q_c que es removida por el fluido refrigerante (agua) en contacto con la pared exterior de la cavidad. La superficie interior de la cavidad se encuentra a la temperatura T_w y la temperatura del aire en el exterior es T_a . En forma análoga a lo desarrollado en la sección 1.5 del capítulo anterior, haciendo un balance de energía en la cavidad se obtiene

$$Q_c = \alpha_a \cdot Q_{in} \quad (2.1)$$

El propósito de diseñar un calorímetro de cavidad es hacer α_a lo más próximo a 1. Este valor de α_a depende no sólo de la absorptancia de la superficie interior de la cavidad sino también, y de una manera determinante, de las características geométricas de la cavidad. La figura 2.2 muestra el esquema de una cavidad cónica que tiene los siguientes parámetros: la altura L , el radio de la base R_o , el radio de la apertura R_a , el ángulo de apertura ω , el área de pared del cono A_w , el área de la apertura A_a , la temperatura de la pared T_w y la temperatura en el exterior de la cavidad T_a .

Para conocer las características ópticas y térmicas de la cavidad cónica se requiere hacer un estudio tanto de la absorptancia y emitancia aparentes del receptor, como de la distribución energética dentro de la cavidad. Con ese análisis se podrán determinar los parámetros geométricos de la cavidad y sus condiciones de operación.

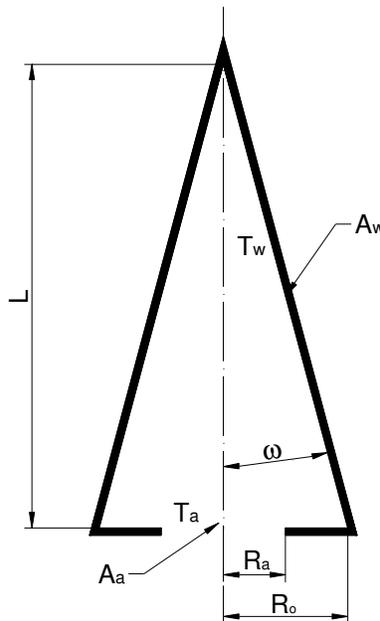


Figura 2.2. Geometría de la cavidad cónica.

2.2 Eficiencia de absorción en una cavidad cónica

La eficiencia de absorción de energía solar de una cavidad que actúa como receptor de un sistema de concentración solar, η_{ab} , es definida como la razón neta a la cual la energía está siendo absorbida dividida por la potencia solar que viene desde el concentrador. Para un receptor de cavidad perfectamente aislado (sin pérdidas conductivas y convectivas) η_{ab} está dada por

$$\eta_{ab} = \frac{\alpha_a Q_{ap} - \varepsilon_a \pi R_a^2 \sigma T_w^4}{Q_{in}} \quad (2.2)$$

donde Q_{in} es la potencia total concentrada, Q_{ap} es la potencia interceptada por la apertura y $\varepsilon_a \pi R_a^2 \sigma T_w^4$ es la energía emitida a través de la apertura de la cavidad al exterior, esta energía emitida por la cavidad está en función de la cuarta potencia de la temperatura de pared, es decir, conforme sea mayor la temperatura de operación T_w menor será la eficiencia de absorción de la cavidad.

La figura 1.7 muestra la distribución de flujo radiativo concentrado en el receptor de placa plana por el sistema de los 18 espejos del DEFRAC obtenida por la técnica de trazado de rayos (CIRCE2). Esta es la distribución de la energía solar concentrada que incide en el receptor de cavidad cónica y puede ser aproximada con una distribución normal (curva gaussiana) como

$$Q(r) = F_o \exp\left(-\frac{r^2}{2\mu^2}\right) \quad (2.3)$$

donde r es la distancia radial, F_o es el valor máximo de la distribución en $r = 0$, y μ es la desviación estándar de la distribución. Al hacer el ajuste de esta función a los valores de la distribución obtenidos por CIRCE2 se obtiene que $F_o = 461.23 \text{ W/cm}^2$ y $\mu = 0.65 \text{ cm}$ con una diferencia porcentual máxima de 5.6%. La figura 2.3 presenta un comparativo entre los resultados obtenidos por el trazado de rayos (CIRCE2) y la aproximación a la distribución de flujo por la gaussiana.

La potencia total concentrada Q_{in} se determina integrando la función 2.3 en todo el espacio, así

$$Q_{in} = \int_0^{\infty} 2\pi \xi F_o \exp\left(\frac{-\xi^2}{2\mu^2}\right) d\xi \quad (2.4)$$

y llevando a cabo la integración se obtiene

$$Q_{in} = 2\pi\mu^2 F_o \quad (2.5)$$

De manera similar, la potencia que entra a través de la apertura Q_{ap} es la integral de la distribución gaussiana del flujo, pero considerando un espacio de integración limitado por el área de apertura que está en función del radio de apertura R_a , esto es,

$$Q_{ap} = \int_0^{R_a} 2\pi \xi F_o \exp\left(\frac{-\xi^2}{2\mu^2}\right) d\xi \quad (2.6)$$

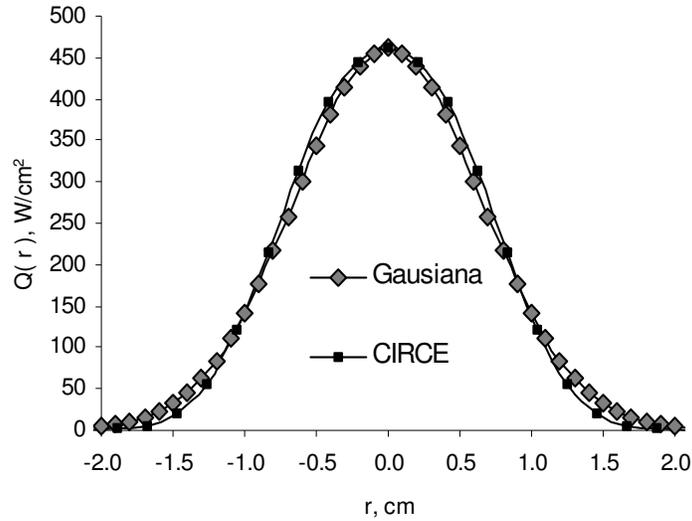


Figura 2.3. Distribución de la potencia concentrada ajustada con un gaussiana y los resultados de la simulación con CIRCE2.

Así, la potencia que logra entrar a través de la apertura es

$$Q_{ap} = 2\pi\mu^2 F_o \left[1 - \exp\left(\frac{-R_a^2}{2\mu^2}\right) \right] \quad (2.7)$$

Sustituyendo Q_{ap} y Q_{in} en la eficiencia de absorción de energía, se obtiene una expresión en función del radio de apertura y de la temperatura de pared de la cavidad,

$$\eta_{ab} = \alpha_a \left(1 - \exp\left(\frac{-R_a^2}{2\mu^2}\right) \right) - \varepsilon_a \left(\frac{R_a^2 \sigma T_w^4}{2\mu^2 F_o} \right) \quad (2.8)$$

Las propiedades ópticas de la cavidad, α_a y ε_a , son función del radio de apertura R_a , para el cálculo del radio óptimo se consideran independientes de este parámetro, además en este momento se considera a la cavidad como un cuerpo negro, por lo tanto la absortancia y la emitancia aparentes son iguales a uno, $\alpha_a \approx \varepsilon_a \approx 1$. En la figura 2.4 se grafica la eficiencia de absorción η_{ab} para una cavidad (ecuación 2.8) en función del radio de apertura considerando diferentes temperaturas de pared. En esta gráfica se observa que dada una temperatura existe un radio de apertura que maximiza η_{ab} . También se observa que conforme mayor es la temperatura de pared, el radio donde ocurre η_{ab} máximo es menor y el valor de η_{ab} también es menor.

Con esta misma ecuación 2.8, se puede evaluar η_{ab} pero ahora en función de la temperatura de pared T_w , para diferentes radios de apertura R_a . La figura 2.5 presenta a la eficiencia de absorción de una cavidad η_{ab} en función de la temperatura

de pared, para diferentes radios. En esta gráfica se observa que para un radio dado, la eficiencia de absorción inicia en su valor más alto y disminuye conforme aumenta

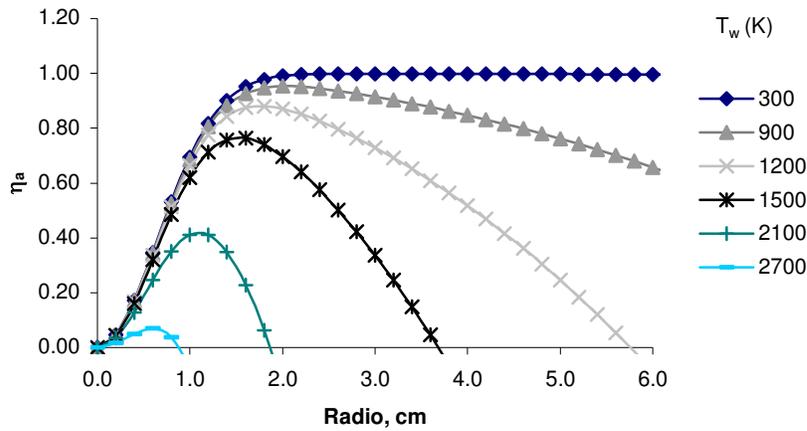


Figura: 2.4. Gráfica de la eficiencia de absorción para una cavidad, en función de radio de apertura, para diferentes temperaturas de pared.

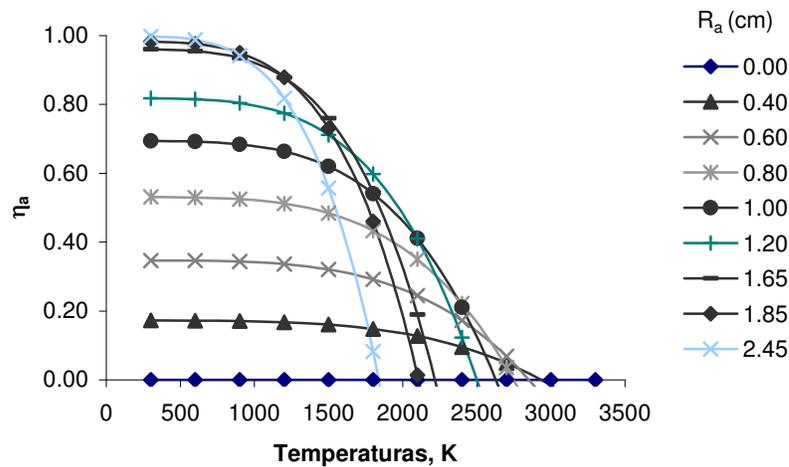


Figura 2.5. Eficiencia de absorción de una cavidad en función de la temperatura de pared, para diferentes radios.

la temperatura, lo cual es de esperarse. El valor máximo de η_{ab} ocurre para $r = 2.45$ cm y $T_w = 300$ K, lo cual también es de esperarse.

Para calcular el radio óptimo de la apertura de la cavidad $r = R_a$, se deriva parcialmente la eficiencia de absorción η_{ab} con respecto al radio r y se iguala a cero, así se obtiene

$$[R_a]_{\text{óptimo}} = \sqrt{-2\mu^2 \ln \left[\frac{\sigma T_w^4}{F_o} \right]} \quad (2.9)$$

Para que esta expresión esté dentro del dominio de los números reales, se requiere que el logaritmo natural tenga un valor negativo, para ello se tiene que cumplir la siguiente condición

$$T \leq \sqrt[4]{\frac{F_o}{\sigma}} \quad (2.10)$$

Para el caso del DEFRAC se tiene un pico de distribución de flujo de $F_o = 4,612.3 \text{ KWm}^{-2}$ (distribución de flujo para un spot con los 18 espejos, ver sección 1.5) y con la constante de Stefan–Boltzmann ($\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), se tiene que la temperatura límite es de 3000 K.

En la figura 2.6 se presenta el gráfico del radio óptimo $[R_a]_{\text{óptimo}}$ contra la temperatura de la pared de la cavidad T_w (ecuación 2.9). Se observa que al aumentar la temperatura, $R_{\text{óptimo}}$ disminuye; lo cual es de esperarse ya que de esa forma se disminuyen las pérdidas radiativas. También en la figura 2.6 se presenta la eficiencia de absorción de la cavidad en función de la temperatura para los radios óptimos.

Se considera que en el calorímetro de cavidad del DEFRAC se podrían alcanzar temperaturas hasta de 1350 K, temperaturas inferiores al punto de fusión del acero inoxidable (ver tabla 3.3) pero muy altas. Para este valor $R_{\text{óptimo}} = 1.62 \text{ cm}$ y $\eta_{\text{ab}} = 0.83$. La figura 2.7 muestra la eficiencia de absorción en función de la temperatura máxima de operación para dos cavidades cuyos radios de apertura son 1.62 cm y 1.65 cm. En este gráfico se ve que si la cavidad se opera a temperaturas inferiores a los 1100 K, la η_{ab} es mayor a 90%. En realidad para los estudios calorimétricos que se pretenden realizar, los flujos máxicos serán tales que la temperatura de operación de la cavidad será menor a 500 K, para este valor de T_w se tendrá una $\eta_{\text{ab}} = 95\%$.

Para la construcción de la cavidad se decidió considerar un diámetro de apertura de 3.24 cm, esto es un radio R_a de 1.62 cm.

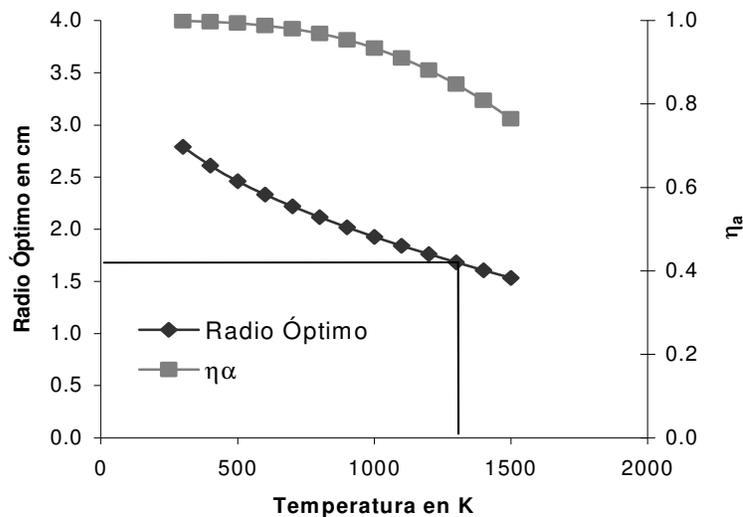


Figura 2.6. Radio óptimo de apertura de la cavidad en función de la temperatura máxima de operación.

Considerando que el diámetro de la mancha solar para una distancia focal de 2.00 m es 2.60 ± 0.2 cm y el diámetro de la apertura del receptor es de 3.24 cm, es decir, el diámetro de la apertura es un 24.6 % mayor que la mancha solar y con ello se garantiza que toda la radiación entra a través de la apertura.

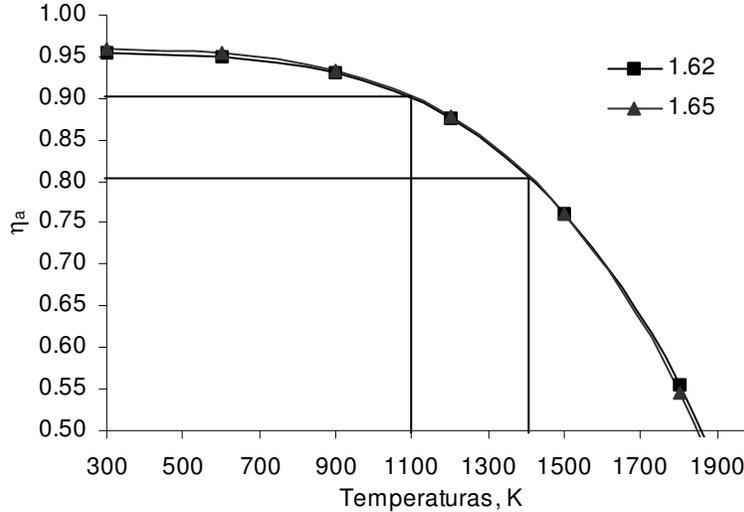


Figura 2.7. Eficiencia de absorción en función de la temperatura máxima de operación para diferentes radios de apertura.

2.3 Emitancia aparente de una cavidad cónica

Sparrow y Jonsson en 1963 realizaron un análisis de la transferencia de calor en una cavidad cónica. Los autores presentan una solución analítica en la cual se supone que la superficie interior se comporta como un cuerpo gris y que el coeficiente convectivo es tan pequeño que se puede despreciar. A continuación sigue el análisis de estos autores.

Considérese el intercambio radiativo entre dos elementos diferenciales de áreas como se muestran en la figura 2.8. Para un cierto elemento de área ubicado en la posición x , se define la energía radiante que emerge de él por unidad de tiempo y unidad de área como radiosidad, radiación emitida aparente o brillantez, esto se denota con la letra B , la cual consiste de la energía emitida más la energía reflejada, así

$$B(x) = \varepsilon \sigma T_w^4(x) + \rho I(x) \quad (2.10)$$

donde ε y ρ son la emitancia y la reflectancia de la superficie, σ la constante de Stefan-Boltzman, I la radiación incidente y T_w la temperatura de la superficie.

Parte de la radiosidad que emite el segmento diferencial dA_ξ es absorbido por un segmento diferencial dA_x a lo largo de la superficie del cono. La potencia emitida por éste y que llega a dA_x es $[B(\xi)dA_\xi]dF_{\xi-x}$, donde $dF_{\xi-x}$, es el factor de forma entre ambos segmentos diferenciales del cono [Siegel and Howell, 1992]. Considerando el principio de reciprocidad

$$dA_\xi dF_{\xi-x} = dA_x dF_{x-\xi} \quad (2.11)$$

esta potencia se expresa como $[B(\xi)dA_\xi]dF_{\xi-x}$. Entonces el flujo (potencia por unidad de área) que incide en dA_x es $[B(\xi)dA_\xi]dF_{\xi-x}$.

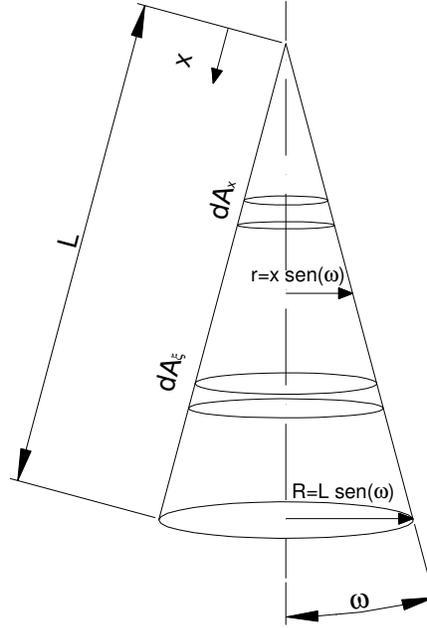


Figura 2.8. Intercambio radiativo entre dos elementos diferenciales de área en la cavidad cónica.

El flujo radiativo que incide sobre el segmento diferencial dA_x y proviene de toda la cavidad, se obtiene al integrar las contribuciones de todos los segmentos diferenciales $0 \leq \xi \leq L$, así

$$I(x) = \int_{\xi=0}^L B(\xi) dF_{x-\xi} \quad (2.12)$$

Con esto podemos reescribir la expresión de la radiosidad en términos de este flujo de radiación

$$B(x) = \varepsilon \sigma T_w^4(x) + \rho \int_{\xi=0}^L B(\xi) dF_{x-\xi} \quad (2.13)$$

Para superficies opacas la reflectancia $\rho = 1 - \alpha$, además, para superficies grises, se puede suponer que la absorptancia es igual a la emitancia, esto es, $\alpha = \varepsilon$. [Sparrow , 1963]. Si consideramos una temperatura de cavidad uniforme T_w y definimos la emitancia aparente de un punto de la pared de la cavidad como la radiosidad entre la emisión de un cuerpo negro a esa temperatura, se tiene,

$$\varepsilon_a(x) = \frac{B(x)}{\sigma T_w^4} \quad (2.14)$$

Con esta relación podemos adimensionar la expresión de la radiosidad para dejarla en términos únicamente de la emisividad local aparente,

$$\varepsilon_a(x) = \varepsilon + (1 + \varepsilon) \int_{\xi=0}^L \varepsilon_a(\xi) dF_{x-\xi} \quad (2.15)$$

donde el diferencial del factor de forma en función del ángulo de apertura se puede obtener como [Sparrow, 1963],

$$dF_{x-\xi} = \frac{\cos^2(\omega)}{2x \operatorname{sen}(\omega)} \times \left[1 - |\xi - x| \frac{(\xi - x)^2 + 6\xi x \operatorname{sen}^2(\omega)}{[(\xi - x)^2 + 4\xi x \operatorname{sen}^2(\omega)]^{3/2}} \right] d\xi \quad (2.16)$$

La ecuación 2.15 es una integral implícita, es decir, la función solución es una función de la integral de sí misma. Esto requiere de un algoritmo de solución recurrente. Una vez que se encuentra la función solución $\varepsilon_a(x)$, ésta permite calcular de forma bastante sencilla la tasa neta de transferencia de calor por unidad de área para cada punto de la cavidad. Esto es la diferencia entre el flujo radiante emitido y el absorbido

$$q(x) = \varepsilon \sigma T_w^4 - \alpha I_d(x) = \sigma T_w^4 \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} [1 - \varepsilon_a(x)] \quad (2.17)$$

Si se integra $q(x)$ sobre toda la superficie de la cavidad se obtiene la cantidad neta de radiación que sale por la apertura. Si esta cantidad se divide entre la potencia emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y del mismo tamaño que la apertura $\sigma T_w^4 \pi R_a^2$, se obtiene la emitancia aparente de la cavidad ε_a .

Nótese que el valor de ε_a depende del parámetro geométrico del ángulo de apertura de la cavidad ω , así como de la emisividad ε de la pared. Esta solución analítica de Sparrow y Jonsson se denotará por las siglas MA-SJ.

La figura 2.9 muestra los valores de la emisividad aparente ε_a en función del ángulo de apertura de la cavidad ω para diferentes emitancias ε de la pared, [Sparrow, 1963]. Se puede observar que conforme ω disminuye el valor de ε_a tiende a 1 para todos los valores de ε . Por otro lado, también se observa que al disminuir el valor de ω , el incremento de ε_a es mucho mayor para valores pequeños de ε . Este comportamiento es notable ya que para ángulos pequeños, la emitancia aparente se aproxima a la unidad, independientemente del valor de la emitancia de pared.

Este análisis, aunque corresponde al de una cavidad cónica totalmente abierta, sin baffle, permite entender la relación existente entre el ángulo de apertura de la cavidad, la emitancia de la pared y la emitancia aparente de la cavidad.

Por otra parte, si consideramos al receptor como un cuerpo gris, la emitancia aparente ε_a es igual a la absortancia aparente α_a del mismo, $\alpha_a = \varepsilon_a$. Como lo que se busca en el diseño de la cavidad cónica es tener la máxima eficiencia η_{ab} posible, se debe tener la máxima absortancia posible, y para ello, de acuerdo a los resultados de la figura 2.9 es conveniente tener un ángulo de apertura lo más pequeño posible.

Para el problema de considerar una cavidad cónica con baffle y apertura en su base, que es el caso de estudio en esta tesis, no se encontró una solución analítica, pero si una numérica empleando el método de Monte Carlo [Heinisch, 1973].

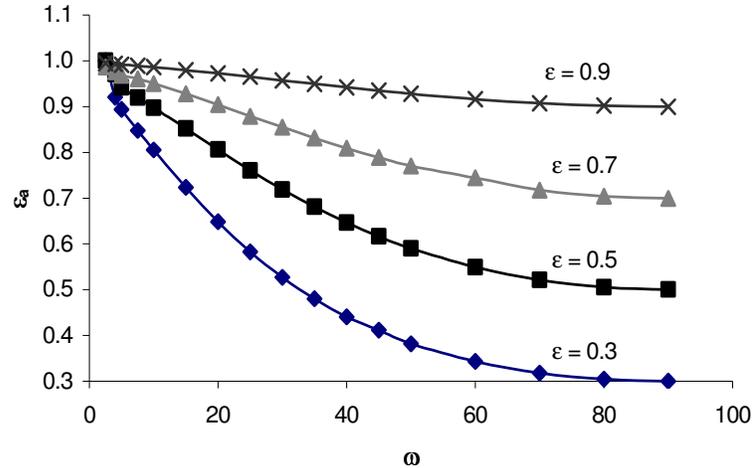


Figura 2.9. Gráfica de los resultados de la emitancia aparente en función del ángulo de apertura para diferentes emitancias de la pared [Sparrow, 1963].

2.4 Emitancia aparente de una cavidad cónica con baffle

Heinisch, Sparrow and Shamsundar (1973) hicieron el análisis radiativo de una cavidad cónica con baffle (tapadera), el cual tiene una apertura central (ver figura 2.10), utilizando el método de Monte Carlo. Este análisis permite evaluar la emitancia aparente ϵ_a en función de la razón de apertura del baffle. Se denominará a este modelo con las siglas MC-HSS. La emitancia aparente ϵ_a se define como la relación entre la energía emitida por la apertura de la cavidad entre la energía emitida por la misma apertura si esta fuese un cuerpo negro a la temperatura de pared T_w , esto es

$$\epsilon_a = \frac{E_{out}}{A_a \sigma T_w^4} \quad (2.17)$$

Para la modelación matemática de las cavidades cónicas se hacen algunas suposiciones, como por ejemplo, considerar la misma emitancia del material para todas las paredes de la cavidad, también suponer la temperatura de las superficies uniforme en toda la cavidad.

El método de Monte Carlo es una técnica o modelo numérico basado en las características estocásticas de los procesos físicos, en otras palabras es un modelo análogo que imita el proceso físico en estudio cualquiera que éste sea [Howell, 1998].

Para el modelo del cálculo de la emitancia aparente, se definen cuatro parámetros con los cuales se precisa el punto de partida del fotón, la dirección de emisión y la probabilidad del fotón de ser absorbido o reflejado.

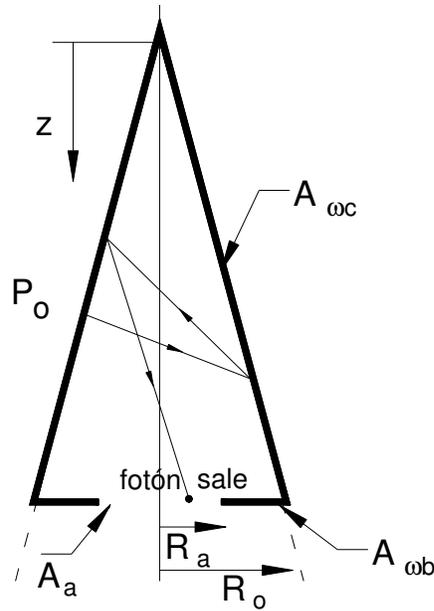


Figura 2.10. Esquema de la cavidad cónica y la proyección de un rayo aleatorio.

El valor de cada uno de estos parámetros se obtiene como un número aleatorio entre 0 y 1, y los cuales determinan; el primer parámetro determina la probabilidad que tiene el fotón de ser absorbido en el punto de partida o en la colisión, este parámetro se denomina R_a , el segundo determina la posición arbitraria de la salida del fotón dentro de la cavidad, se define con la letra R_p , y los dos últimos números aleatorios R_θ y R_ϕ , determinan los ángulos de salida de la partícula en la dirección θ y ϕ , respectivamente. Estos ángulos definen la orientación y elevación en coordenadas esféricas en un sistema de coordenadas orientado según la pared de la cavidad en el punto de emisión. La figura 2.11 muestra un esquema del cono en dos vistas: a) longitudinal y b) transversal, donde se puede apreciar el sistema de coordenadas principal (x, y, z) y el sistema de coordenadas secundario (n, t_v, t_e) sobre la superficie del cono.

Para determinar la sección del receptor de donde va a ser emitido cada uno los fotones de la cavidad, el algoritmo del MC-HSS tiene que considerar si el fotón sale del cono o del baffle, en base al parámetro R_p . Si R_p es menor a la razón del área del cono A_{wc} entre el área total de la cavidad $(A_{wc} + A_{wb})$, esto es,

$$0 < R_p < \frac{A_{wc}}{A_{wc} + A_{wb}} \quad (2.18)$$

el fotón sale desde el cono. La altura en el eje z de partida del fotón en el cono, se determina considerando R_p igual a la razón del área de un cono con una altura z y el área total de la cavidad, obteniéndose

$$z = \sqrt{R_p (A_{wc} + A_{wb}) \left(\frac{\cos^2 \omega}{\pi \sin \omega} \right)} \quad (2.19)$$

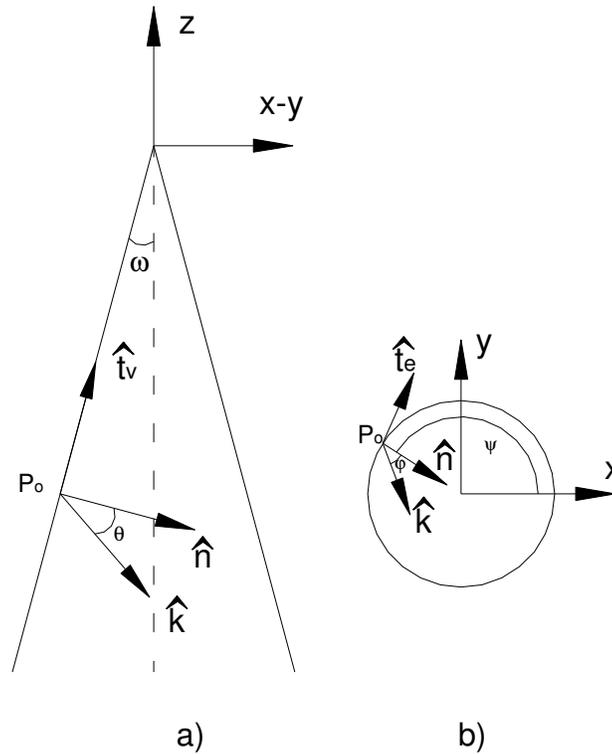


Figura 2.11. Vistas del sistema de coordenadas para el punto P_0 en el plano de coordenadas sobre la superficie del cono, a) longitudinal y b) transversal.

ésta expresión es válida entre $0 < z < L$, si el número aleatorio R_p es mayor a la razón entre áreas de la ecuación 2.18, se considera que el fotón es emitido desde la pared del baffle, por lo tanto la altura de emisión es $z = -L$, y el punto dentro del baffle se determina por

$$r = \sqrt{\frac{1}{\pi} [A_{wc} - R_p (A_{wc} + A_{wb})] + R_o^2} \quad (2.20)$$

En el momento que un fotón toca una pared dentro de la cavidad, puede ser absorbido o reflejado. Se considera un fotón como absorbido cuando la razón de absorptancia R_α es menor a la absorptancia del material, la cual se interpreta como una probabilidad de absorción.

$$0 \leq R_\alpha \leq \alpha \quad (2.21)$$

Si queda fuera de este rango, se considera como un fotón emitido desde el punto de colisión, por lo tanto, se requiere determinar nuevamente todos los parámetros aleatorios para este mismo fotón y evaluar su trayectoria dentro de la cavidad hasta un nuevo punto de colisión o de salida de la cavidad dependiendo del caso.

Para determinar la orientación de salida del fotón, se suponen dos valores aleatorios R_θ y R_ϕ entre cero y uno, los cuales determinan respectivamente los ángulos de orientación θ y ϕ en un sistema de coordenadas esférico los cuales son, siguiendo a Heinisch et.al., 1973:

$$\theta = \text{sen}^{-1}(R_\theta^2) \quad (2.22)$$

$$\phi = 2\pi R_\phi \quad (2.23)$$

Ya que se determina el punto de partida del fotón \vec{r}_o de manera aleatoria, y la posición de la partícula \vec{r} con una dirección de salida con los ángulos θ y ϕ , lo cual definen el vector de dirección del fotón \hat{k} , se determina la magnitud de la trayectoria β del fotón dentro de la cavidad hasta colisionar con otro punto dentro de la misma cavidad o bien salir de ella, dependiendo del caso, así

$$\vec{r} = \vec{r}_o + \beta\hat{k} \quad (2.24)$$

La posición del fotón dentro de la cavidad en coordenadas rectangulares como se observa en la figura 2.11, se expresa en términos de la altura en el eje (z), la cual al ser multiplicada por la pendiente de inclinación del cono determinar el radio de posición en el plano xy, ya que se conoce el radio de posición en el plano xy, se calculan los valores de la posición en x, y a través del ángulo ψ que se forma en este plano como se observa en la figura 2.11.b. Por tanto el vector de posición del fotón resulta como

$$\vec{r} = mz \cos \psi \hat{i} + mz \text{sen} \psi \hat{j} + z \hat{k} \quad (2.25)$$

Para modelar el fenómeno físico de la trayectoria de un fotón dentro de la cavidad se requiere sustituir la ecuación 2.24 en la 2.25, y con ello resulta un sistema de ecuaciones, en donde se tiene como variable la magnitud de la trayectoria β dentro de la cavidad, así

$$x_o + \hat{k}_x \beta = -mz \cos \psi \quad (2.26)$$

$$y_o + \hat{k}_y \beta = -mz \text{sen} \psi \quad (2.27)$$

$$z_o + \hat{k}_z \beta = z \quad (2.28)$$

Debido a que el vector de dirección se encuentra en el plano sobre la superficie del cono \hat{k} como se muestra en la figura 2.11, se requiere aplicar una matriz de rotación para girar este sistema de coordenadas hacia el sistema principal de coordenadas \hat{k}_p , el resultado de aplicar esta matriz de rotación es

$$\vec{k}_p = \hat{n} \cos \theta + \hat{i}_v \cos \varphi \text{sen} \theta + \hat{i}_e \text{sen} \varphi \text{sen} \theta \quad (2.29)$$

donde el vector normal en este sistema de coordenadas se proyecta en el plano horizontal, y este a su vez se proyecta primero sobre el eje "x" y posteriormente sobre el eje "y", ver figura 2.11,

$$\hat{n} = -\cos \psi \cos \omega \hat{i} - \text{sen} \psi \cos \omega \hat{j} - \text{sen} \omega \hat{k} \quad (2.30)$$

Si consideramos a la trayectoria del fotón como la resultante entre los desplazamientos en las tres coordenadas, se puede hacer una suma de cuadrados de los desplazamientos en x, y e igualarlos a la resultante de éste, quedando

$$(x_o + \hat{k}_x \beta)^2 + (y_o + \hat{k}_y \beta)^2 = m^2 z^2 \quad (2.31)$$

Sustituyendo la ecuación 2.29 en la 2.31 resulta.

$$(x_o + \hat{k}_x \beta)^2 + (y_o + \hat{k}_y \beta)^2 = m^2 (z_o + \hat{k}_z \beta)^2 \quad (2.32)$$

Desarrollando el álgebra de la ecuación 2.32 resulta una ecuación cuadrática en función de la magnitud de la trayectoria β , la solución positiva de ésta es la solución de la intercepción con la superficie mientras que la negativa es una intercepción exterior a la cavidad.

$$A\beta^2 + B\beta + C = 0 \quad (2.33)$$

$$A = \hat{k}_x^2 + \hat{k}_y^2 - m^2 \hat{k}_z^2$$

$$B = 2(x_o \hat{k}_x + y_o \hat{k}_y - m^2 z_o \hat{k}_z)$$

$$C = (x_o^2 + y_o^2 - m^2 z_o^2)$$

La solución de la magnitud de la trayectoria del fotón β es:

$$\beta = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2.34)$$

Como se observa en la figura 2.11 el ángulo en el plano horizontal del punto de emisión del fotón, esta descrito por el ángulo ψ , el cual se puede expresar en términos de los valores “ x_o ” y “ y_o ” determinado por los valores trigonométricos de éstos.

$$\text{sen } \psi = \frac{y_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \quad (2.35)$$

$$\text{cos } \psi = \frac{x_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \quad (2.36)$$

De esta manera se puede describir la ecuación 2.30 de la siguiente manera

$$\hat{n} = -\frac{x_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \text{cos } \omega \hat{i} - \frac{y_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \text{cos } \omega \hat{j} - \text{sen } \omega \hat{k} \quad (2.37)$$

El vector \hat{i}_v sobre el plano de la superficie del cono, el cual es un vector perpendicular al vector normal (ecuación 2.37) y apunta en dirección al origen del sistema principal de coordenadas (ver figura 2.11), está descrito por

$$\hat{i}_v = -\frac{x_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \text{sen } \omega \hat{i} - \frac{y_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \text{sen } \omega \hat{j} + \text{cos } \omega \hat{k} \quad (2.38)$$

Por último, se tiene el vector \hat{i}_e el cual es tangente al plano formado por los dos vectores; el vector normal \hat{n} y el vector sobre el plano de la superficie de la cavidad

\hat{t}_v , (ecuaciones 2.37 y 2.38 respectivamente), se puede calcular como el producto cruz entre estos ambos vectores,

$$\hat{t}_e = \hat{n} \times \hat{t}_v \quad (2.39)$$

el resultado de este producto cruz es

$$\hat{t}_e = -\frac{y_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \hat{i} + \frac{x_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \hat{j} \quad (2.40)$$

Por lo tanto el vector de orientación \hat{k}_p en el sistema de coordenadas principal queda de la siguiente manera

$$\hat{k}_p = \begin{bmatrix} \left[-\frac{x_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \cos \omega \cos \theta - \frac{x_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \text{sen} \omega \cos \varphi \text{sen} \theta - \frac{y_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \text{sen} \varphi \text{sen} \theta \right] \hat{i} \\ \left[-\frac{y_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \cos \omega \cos \theta - \frac{y_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \text{sen} \omega \cos \varphi \text{sen} \theta + \frac{x_o}{\sqrt{x_o^2 + y_o^2}} \text{sen} \varphi \text{sen} \theta \right] \hat{j} \\ \left[-\cos \theta \text{sen} \omega + \cos \omega \cos \varphi \text{sen} \theta \right] \hat{k} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Este vector de orientación es válido para una superficie cónica infinita, esto implica que en ocasiones la proyección del fotón sigue una trayectoria por afuera de la cavidad, la cual se requiere delimitar por una superficie que en este caso es el bafle, el cual se encuentra en el plano horizontal en la posición $z = -L$.

Para el caso en el que los fotones son emitidos o colisionan con el bafle, se tiene que considerar la magnitud de la trayectoria del fotón a través de

$$\beta = \frac{-L - z_o}{\hat{k}_p} \quad (2.42)$$

El vector de orientación \hat{k}_p para el plano horizontal del bafle se describe de la siguiente manera

$$\hat{k}_p = \cos \varphi \text{sen} \theta \hat{i} + \text{sen} \varphi \text{sen} \theta \hat{j} + \cos \theta \hat{k} \quad (2.43)$$

Para comprender de una manera más simple el funcionamiento del algoritmo de cálculo del modelo de Monte Carlo, se presenta el diagrama de flujo del mismo, ver la figura 2.12. Este algoritmo consiste en lo siguiente: primer paso, se toma un fotón nuevo, se le asignan los parámetros de aleatoriedad: la posición R_p de donde va a ser emitido, las direcciones de salida R_θ y R_ϕ y la razón de absorción R_α de este fotón; después se calcula la trayectoria dentro del interior de la cavidad, se predice en que punto colisiona con alguna de las pared, ya sea la del cono o la del bafle, o bien, se observa si en lugar de chocar, éste salió por la apertura de la cavidad, en este caso se cuenta como fotón emitido y se comienza el procedimiento con un

nuevo fotón; si no salió, se compara su parámetro de aleatoriedad de la absorción R_α contra la absorción de la pared α , si R_α es mayor a ésta, se toma el punto de colisión como la nueva posición de donde será emitido, se le asignan nuevamente a este mismo fotón los parámetros aleatorios de dirección, absorción y se repite el procedimiento nuevamente desde este punto.

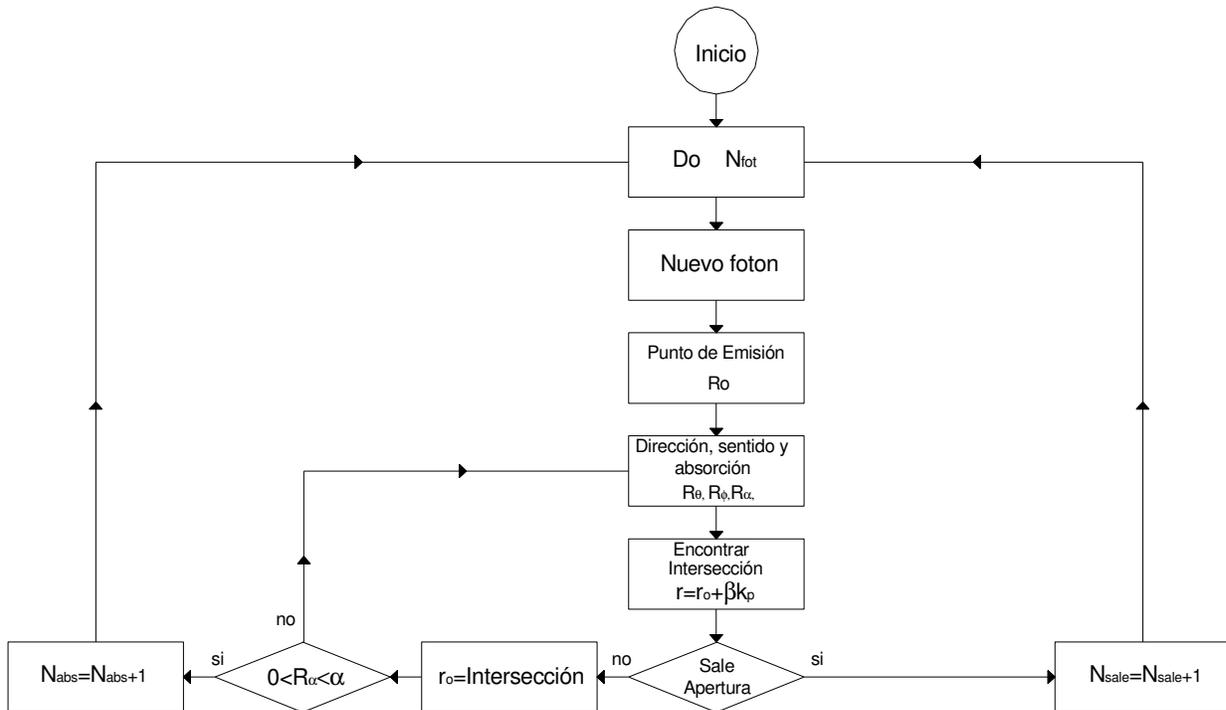


Figura 2.12. Diagrama de flujo del programa MC-C

Este programa se desarrolló en una plataforma Linux con el 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 apertura, relación de baffle (ver sección 3.1) o bien la altura del cono, el listado de este programa se puede ver en el apéndice A7.

2.5 Resultados de la simulación para la emitancia aparente

En esta sección se presenta el método para determinar el número de fotones mínimo N_{f_0} que se requiere emplear para obtener valores de emitancia aparente consistentes, por otra parte se presentan los resultados de la simulación con el modelo de Monte Carlo tanto para una cavidad sin baffle como con éste y se señalan algunos criterios de diseño.

Independencia de número de fotones

Para determinar el número mínimo de fotones N_{f_0} que se requieren para la simulación de la emitancia aparente de la cavidad, se calcula ε_a para una misma

condición, simulando esto con diferentes números de fotones; por ejemplo se puede tomar un caso como; suponer una cavidad con un ángulo de apertura $\omega = 15^\circ$, una emitancia de pared $\varepsilon = 0.5$ y una relación de baffle $\xi = 0.5$, donde la razón de baffle se considera como la relación que existe entre la diferencia del radio de la base R_o y el radio de apertura R_a dividido entre el radio de la base R_o .

$$\xi = \frac{R_o - R_a}{R_o} \quad (2.44)$$

Se calcula ε_a a partir de 100 fotones hasta 10 millones de estos, y se establece que para considerar una banda de error confiable ésta no debe exceder del 0.1 %, como se observa en la figura 2.13 donde se grafica ε_a vs N_{f_0} .

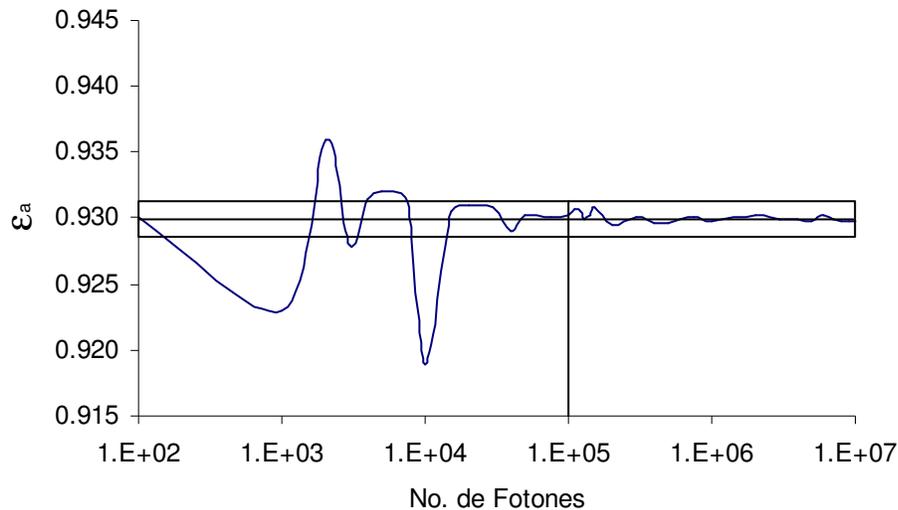


Figura 2.13. Gráfica comparativa entre el número de fotones contra el valor de la emisividad aparente ε_a .

Ahí se puede observar que para valores mayores a 10^5 fotones la desviación de la simulación es mucho menor al error de 0.10%, por lo tanto se toma éste como el número mínimo de fotones N_{f_0} empleados en las simulaciones. Para este caso ε_a fue de 0.93005.

Emitancia aparente ε_a

Para simular una cavidad cónica sin baffle, se requiere considerar que el diámetro de la apertura sea el mismo que el diámetro de la base del cono, es decir, $R_o = R_a$. La figura 2.14 muestra los resultados de la modelación con Monte Carlo para el cálculo de la emitancia aparente ε_a para una cavidad cónica sin baffle, esta simulación se realizó empleando 10^5 fotones distribuidos de manera aleatoria dentro de la cavidad. Como se puede ver en la figura, ε_a aumenta al disminuir ω , independientemente de ε .

Comparando los resultados del modelo analítico para el cálculo de ϵ_a en una cavidad cónica sin baffle MA-SJ (diamantes en la figura 2.14), y el cálculo de ϵ_a con el modelo MC-HSS (línea continua en la figura 2.14), se encuentra que para ángulos pequeños ($< 60^\circ$) la aproximación es buena ($< 1\%$), sin embargo la diferencia para el caso del cono totalmente abierto (placa plana) es mayor a 5.0%, la tabla 2.2 muestra estas diferencias. Por esto se considera que el MC-HSS es un modelo válido para calcular la ϵ_a siempre y cuando se consideren ángulos ω menores a 60° .

Tabla 2.2: Error porcentual del modelo Monte Carlo vs el analítico para una cavidad sin baffle

ω	ϵ		
	0.5	0.7	0.9
7.5	0.4%	0.8%	0.3%
30	0.7%	0.2%	0.4%
60	0.9%	1.0%	0.6%
90	8.4%	4.5%	1.3%

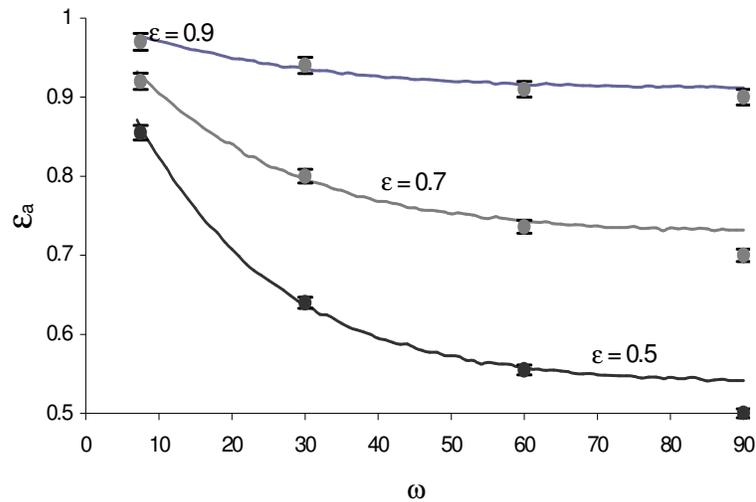


Figura 2.14. Gráfica de la emitancia aparente ϵ_a de la cavidad cónica sin baffle como función de ω , calculada con el modelo numérico de Monte Carlo.

Por otra parte, tomando nuevamente el caso extremo del cono totalmente abierto ($\omega=90^\circ$), la emitancia aparente ϵ_a se esperaría fuera igual a la emitancia de pared ϵ por corresponder el cono totalmente abierto a una placa plana. En la figura 2.14 se observa que para el modelo analítico MA-SJ esto si se cumple $\epsilon_a = \epsilon$, no así para el modelo MC-HSS en donde, existe un pequeño incremento de la emitancia aparente en relación a la emitancia de pared, como se observa en la tabla 2.2. Esto se debe a la serie de aproximaciones que se hacen en el MC-HSS.

La figura 2.15 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 $\varepsilon = 0.5, 0.7$ y 0.9 para el ángulo de apertura ω de 15° . La figura 2.16 presenta los mismos cálculos que la 2.15 pero con un ángulo de apertura ω de 30° .

En estas gráficas se observa que de manera independiente al ángulo de apertura de la cavidad, la relación de baffle, incrementa de manera sustancial la emitancia aparente de la cavidad, esto se debe a que el baffle también contribuye a absorber una porción de la radiación que entra en la cavidad, conforme se incrementa la relación de baffle ésta se aproxima a la emitancia aparente de un cuerpo negro, lo cual se tendrá que tomar en cuenta en el capítulo 3, para el diseño del receptor cónico con baffle. Comparando las figuras 2.15 y 2.16 se observa que al igual que la cavidad sin baffle, la ε_a es mayor para ángulos más pequeños.

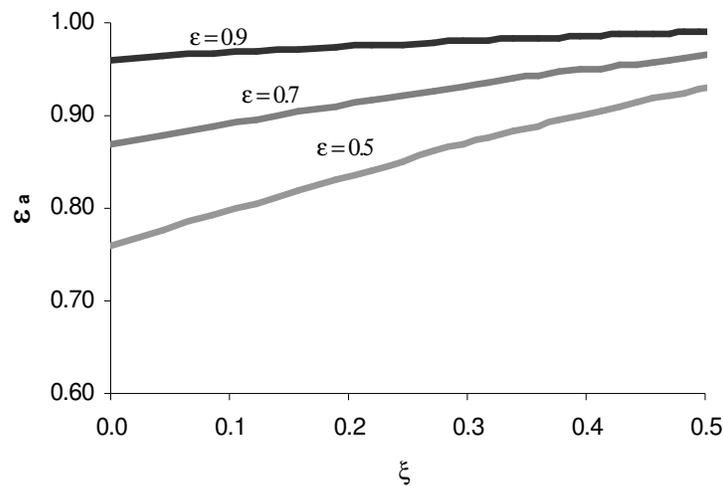


Figura 2.15. Gráfica de la ε_a en función de ε calculada con Monte Carlo para un ángulo de apertura ω de 15° .

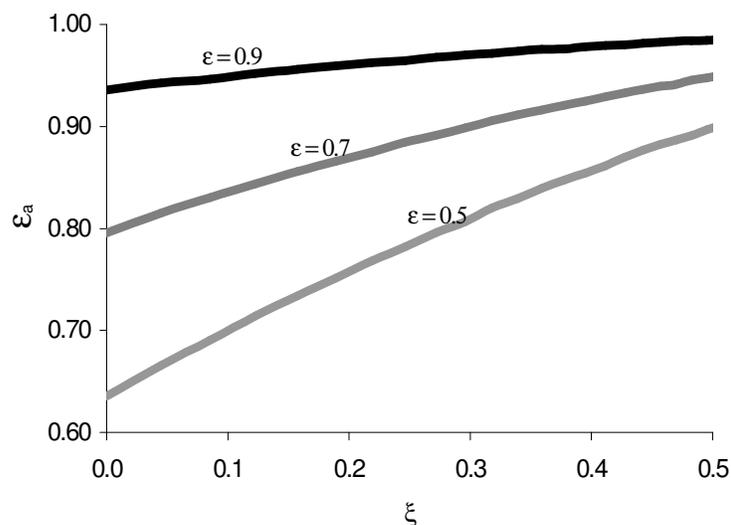


Figura 2.16. Gráfica de la ε_a en función de ε calculada con Monte Carlo para un ángulo de apertura ω de 30° .

2.6 Cálculo de las distribuciones de flujo radiativo

La determinación de la distribución de flujo energético en el interior de la cavidad permite conocer las condiciones en las que operará, así como pronosticar donde se esperarían las máximas temperatura. Para hacer este cálculo se empleó el mismo programa CIRCE2 de trazado de rayos mencionado en el Capítulo 1. Se consideraron los 18 espejos del DEFRACT con una área efectiva de 1.274 m^2 , una reflectancia de los espejos de $\rho = 0.95$ y para la cavidad cónica se consideraron los siguientes parámetros: $\xi = 0.62$, $\omega = 15^\circ$, $L = 15.99 \text{ cm}$, $R_a = 1.62 \text{ cm}$ y $R_o = 4.28 \text{ cm}$, que como se verá después, en el capítulo 3, son los parámetros de diseño de la cavidad.

El primer cálculo que se hace, es evaluar la distribución de flujo radiativo concentrado a diferentes distancias del receptor al plano del marco hexagonal, es decir, modificando la distancia del receptor al plano focal del DEFRACT. De esta manera se verá cual debe de ser la posición más adecuada para tener una distribución uniforme a lo largo de la cavidad cónica. El receptor se coloca en tres posiciones diferentes: a) la entrada de la cavidad se coloca en el spot solar del concentrador, b) el centro de la cavidad se pone en el spot solar, y c) por último el vértice de la cavidad se coloca en el spot, como se observa en la figura 2.17.

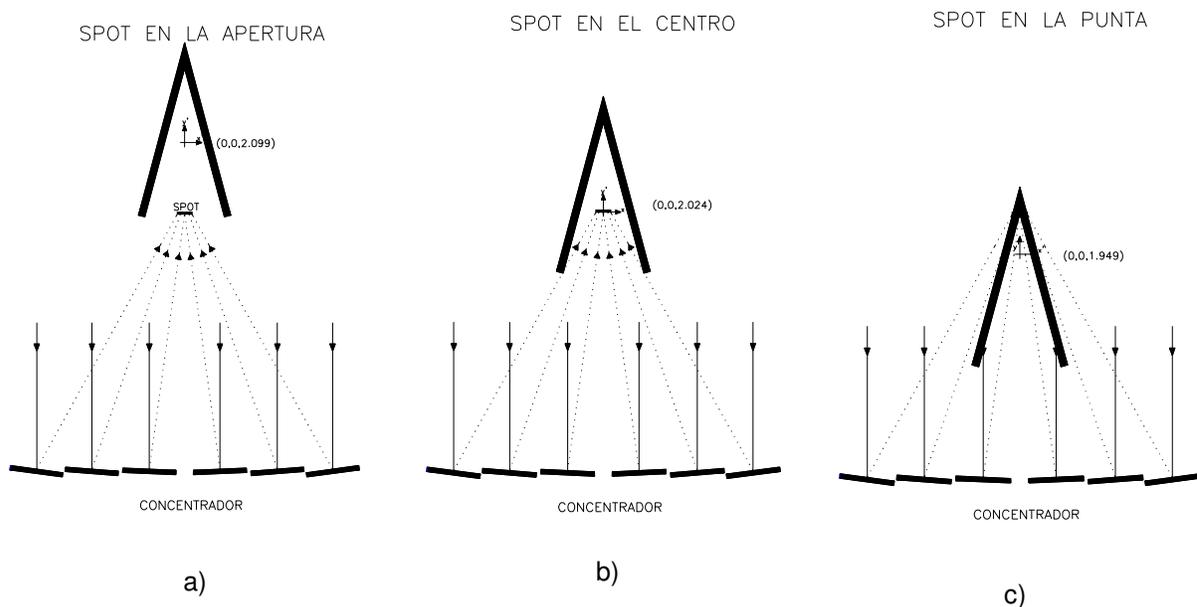


Figura 2.17. Diagramas de posición del receptor con respecto al marco hexagonal, a) el punto focal en la apertura de la cavidad, b) el punto focal en el centro de la cavidad, c) el punto focal en la punta de la cavidad.

La figura 2.18 muestra las distribuciones de flujo radiativo concentrado como función de la coordenada axial z para los tres casos considerados. Se observa que la distribución con el mayor valor de potencia concentrada corresponde al caso c), mientras que la de menor valor corresponde al caso a). Así mismo se observa que es en el caso a) donde la distribución empieza en cero, sube a su máximo valor y después disminuye hasta cero, esto es, el spot solar cae en la mayor área de la

pared del cono receptor. En los otros casos esto no sucede. Además al tener la posición de menor concentración se tendrá el caso de menor temperatura de operación de la pared de la cavidad.

Con estos resultados se comprueba que la distribución de flujo radiativo dentro de las paredes del receptor está en función de la distancia focal del receptor como se observó en los tres casos anteriores. Si se desea una distribución con una concentración máxima se tomaría el caso c), donde el máximo de la distribución es 132.0 W/cm^2 mientras que en el caso a) no se obtendrá una distribución mayor a 17.28 W/cm^2 , sin embargo es este caso donde la distribución abarca la mayor cantidad de área posible en el receptor.

Basado en esta simulación, se decide operar al receptor en la condición en la que la distribución de flujo radiativo cubre la mayor cantidad de área posible dentro del receptor, es decir el caso a), y con ello se tendrá una mayor eficiencia de absorción, y por tanto la distribución de temperaturas que se espera obtener serán más uniformes.

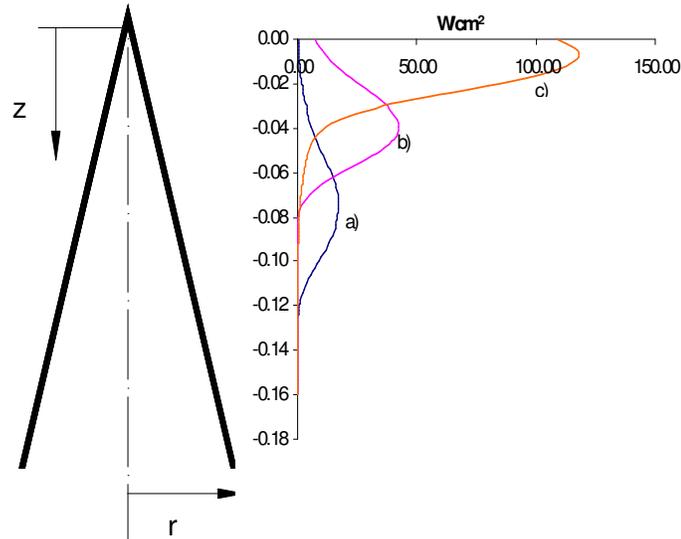


Figura 2.18. Distribución de flujo radiativo para diferentes posiciones del receptor, a) el punto focal en la apertura de la cavidad, b) el punto focal en el centro de la cavidad, c) el punto focal en la punta de la cavidad.

El segundo cálculo que se realizó fue el correspondiente a la distribución del flujo radiativo por grupo de espejos, así como para todos los espejos, es decir, se realiza la simulación considerando las diferentes posiciones de los grupos de espejos dentro del marco hexagonal como se describe en el apéndice A4, para esta simulación se considera la distribución del calorímetro del caso a) de la figura 2.17; se usaron los mismos parámetros que el problema anterior. La figura 2.19 muestra las distribuciones obtenidas. Allí se observa que para cada grupo de espejos existe un desplazamiento de las distribuciones siendo la del grupo A la más pegada al origen del sistema coordenado, siguiendo la del grupo B con un desplazamiento hacia abajo y finalmente la del grupo C con un desplazamiento aún mayor hacia abajo. La suma

de estas distribuciones, que corresponde a los 18 espejos también está graficada y se observa que el máximo valor de 17.28 W cm^{-2} ocurre en $z = -7.5 \text{ cm}$. Se espera que la distribución de temperaturas a lo largo de la cavidad cónica corresponda con esta distribución de flujo radiativo solar concentrado.

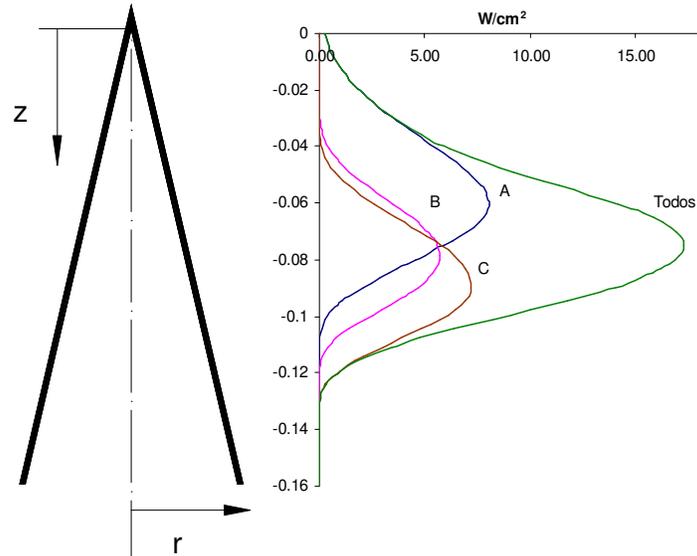


Figura 2.19: Distribución de flujo radiativo por grupo de espejos.

Capítulo 3

Diseño y Construcción del Calorímetro

En este capítulo se presentan en primer lugar las propiedades ópticas de la pintura aplicada a las paredes del receptor, así como el valor de la reflectancia de los espejos del DEFRAC. Posteriormente se definen los parámetros geométricos de la cavidad calorimétrica y se determina la emitancia aparente para esta cavidad. Después se presentan otras consideraciones importantes para el diseño del calorímetro y finalmente se describen el calorímetro y sus componentes ya construidas.

3.1. Absortancia de la pintura del receptor y reflectancia de los espejos

Para realizar un análisis paramétrico y poder determinar las dimensiones de la cavidad más apropiadas, se requiere conocer tanto la absortancia de la pintura a ser aplicada al interior del cono, como la reflectancia de los espejos.

Absortancia de la pintura negro mate

La absortancia de la pared de la cavidad se determinó en forma indirecta a través de la medición del porcentaje de la radiación espectral que logra reflejar la superficie con esta pintura. La superficie interior de la cavidad cónica fue cubierta con una pintura negra mate para altas temperaturas, con base alquidálico modificado especialmente con silicón para resistir temperaturas hasta de 650° C, marca COMEX.

Para medir las propiedades ópticas de esta pintura se empleó un espectrofotómetro marca Shimadzu (UV-3101PC UV-VIS-NIR) el cual mide en el intervalo entre 0.25 a 2.50 μm , la reflectancia espectral ρ_λ tanto directa (especular) como difusa, tomando como referencia un espejo aluminizado para la reflectancia especular y una pastilla de sulfato de bario como referencia para la difusa. La medición se realizó sobre muestras de pintura aplicada con un atomizador hasta que se observó que la distribución de la pintura era uniforme en un sustrato de

acero inoxidable de 2 x 2 cm, de igual manera como se aplicó en las paredes del receptor.

La reflectancia especular $\rho_{\lambda e}$ para esta pintura, debido a que es mate, fue muy próxima a cero, es decir, la radiación especular no fue reflejada por la superficie, y no pudo ser detectada por el instrumento de medición, por otra parte la reflectancia difusa $\rho_{\lambda d}$, estas mediciones fueron consistentes para cinco muestras medidas, de los cuales los resultados de la medición, se puede observar en la figura 3.1.

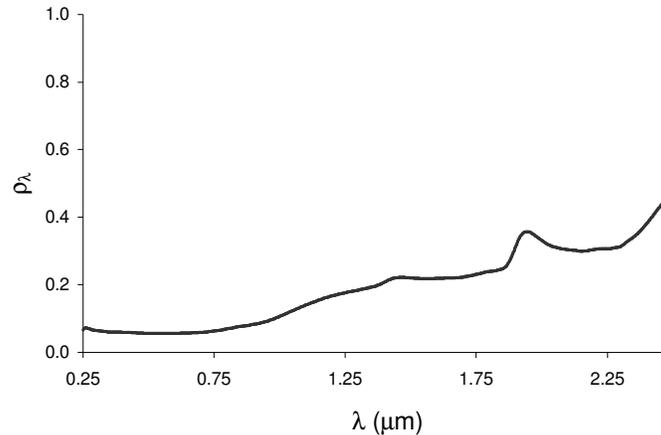


Figura 3.1. Reflectancia difusa $\rho_{\lambda d}$ para la pintura negro mate

Para calcular el valor global de la reflectancia ρ de la pintura, se requiere integrar la medición de la reflectancia espectral con del factor espectral Δf_j de la distribución de radiación solar para una masa de aire de dos atmósferas (caso típico de un día semi - nublado) [Duffie,1991], esta integración se puede realizar por medio de la sumatoria del producto de la reflectancia espectral multiplicada por el factor espectral como se observa en la tabla 3.1, esto es,

$$\rho = \sum_{j=1}^n \rho_j \Delta f_j \quad (3.1)$$

Tabla 3.1. Distribución espectral para la reflectancia de la pintura

λ	Δf_i	ρ_i	$\rho \times \Delta f_i$
0.30 - 0.48	0.10	5.7 %	0.59
0.48 - 0.56	0.10	5.3 %	0.56
0.56 - 0.63	0.10	5.4 %	0.56
0.63 - 0.71	0.10	5.5 %	0.58
0.71 - 0.80	0.10	6.1 %	0.64
0.80 - 0.89	0.10	7.6 %	0.76
0.89 - 1.04	0.10	9.4 %	0.99
1.04 - 1.21	0.10	13.8 %	1.43
1.21 - 1.60	0.10	19.0 %	1.95
1.60 - 5.00	0.10	29.3 %	3.06
		ρ	11.13 %

El resultado de este cálculo es $\rho = 0.11$. Así, la absorptancia para esta superficie negra mate opaca queda determinada como $\alpha = 1 - \rho = 0.89$. Gracias a que se realizó la integración espectral de una parte importante del espectro y considerando la ley de Kirchoff que dice que $\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$ se puede afirmar que $\alpha = \varepsilon$. Por lo tanto es razonable afirmar que la pintura negro mate utilizada, en condiciones de temperatura ambiente, tiene una absorptancia y por tanto una emitancia de 0.89.

Reflectancia de los espejos

También se midió la reflectancia de un espejo pequeño de 2.5 cm de diámetro de primera superficie, el cual fue fabricado junto con los espejos del DEFRAC, con el mismo depósito de aluminio de alta pureza (99.9%) y con recubrimiento de cuarzo, de tal suerte que se espera que la reflectancia de dicho espejo sea igual a los espejos del DEFRAC, en el apéndice A4 se pueden encontrar más detalles al respecto. Para medir la reflectancia se usó el mismo espectrofotómetro utilizado para las muestras de la pintura negro mate. Los resultados obtenidos de la reflectancia especular $\rho_{\lambda e}$ en el rango espectral entre 0.25 a 2.50 μm , se pueden observar en la figura 3.2. Este rango espectral representa más del 98% del espectro solar en la tierra [Duffie, 1991].

La reflectancia global ρ del espejo, se integra en forma similar a como se hizo con la pintura negro mate, a través del factor espectral Δf_j de la distribución de radiación terrestre para una masa de aire de dos atmósferas, como se observa en la tabla 3.2, dando como resultado $\rho = 0.95$.

Tabla 3.2. Distribución espectral para la reflectancia del espejo

λ	Δf_i	ρ_i	$\rho \times \Delta f_i$
0.30 - 0.48	0.10	88.67 %	8.87
0.48 - 0.56	0.10	92.19 %	9.22
0.56 - 0.63	0.10	93.27 %	9.33
0.63 - 0.71	0.10	94.24 %	9.42
0.71 - 0.80	0.10	96.05 %	9.60
0.80 - 0.89	0.10	98.75 %	9.87
0.89 - 1.04	0.10	96.46 %	9.65
1.04 - 1.21	0.10	96.40 %	9.64
1.21 - 1.60	0.10	96.78 %	9.68
1.60 - 5.00	0.10	96.05 %	9.61
		ρ	94.89 %

3.2 Definición de parámetros geométricos y emitancia aparente de la cavidad

Para definir los parámetros de diseño del calorímetro de cavidad, se requiere identificar la geometría básica del mismo; las dos piezas que integran esta geometría son: un cono y un baffle. El cono tiene una base de radio R_0 con un ángulo de apertura $\tilde{\omega}$ Para simplificar el número de variables en juego, la altura del

como L se puede expresar como una relación trigonométrica de las dos variables anteriores, ver la figura 3.3. La segunda pieza del receptor, el bafle, es un disco con un radio exterior igual al radio de la base del cono R_o , y una apertura central de radio R_a .

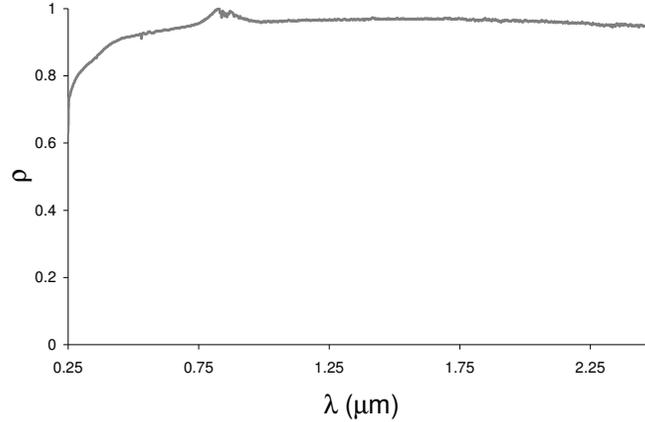


Figura 3.2. Reflectancia del espejo muestra.

De todas estas variables se considera como el parámetro de partida para el diseño el radio de apertura óptimo $[R_a]_{\text{óptimo}} = 1.62$ cm, el cual se obtuvo por medio del análisis de la eficiencia de absorción η_{ap} en la sección 2.2. Para integrar a este parámetro con las variables del cono, se considera la relación de bafle ξ , la cual ya se definió en el capítulo 2 como,

$$\xi = \frac{R_o - R_a}{R_o} \quad (3.2)$$

mientras que la altura del cono L como se expresa en función de esta relación y del ángulo de apertura ω como

$$L = \frac{R_a}{(1 - \xi)\tan \omega} \quad (3.3)$$

Una vez identificadas las variables de diseño (ω, R_o y R_a), y conociendo la emitancia de pared ($\epsilon = 0.89$), se puede aplicar el modelo de Monte Carlo desarrollado en la sección 2.3, para calcular la emitancia aparente teórica ϵ_a en función del ángulo de apertura ω del cono, para diferentes relaciones de bafle ξ .

La figura 3.4 muestra ϵ_a vs ω para una $\xi = 0.0, 0.3, 0.65, 0.8$. Se puede observar que conforme ω disminuye, ϵ_a aumenta.

Por otro lado, conforme se incrementa ξ , es decir, se incrementa el radio de la base R_o , la ϵ_a es más próxima a la unidad, por lo tanto, el receptor tendrá la máxima absorción aparente α_a y la cavidad absorberá casi en su totalidad la

energía concentrada. De aquí que debemos definir un cono con ángulo de apertura ω pequeño y con una relación de bafle ξ grande.

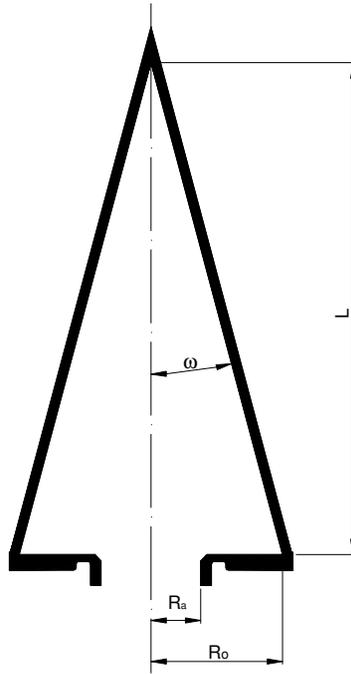


Figura 3.3. Parámetros de diseño a considerar.

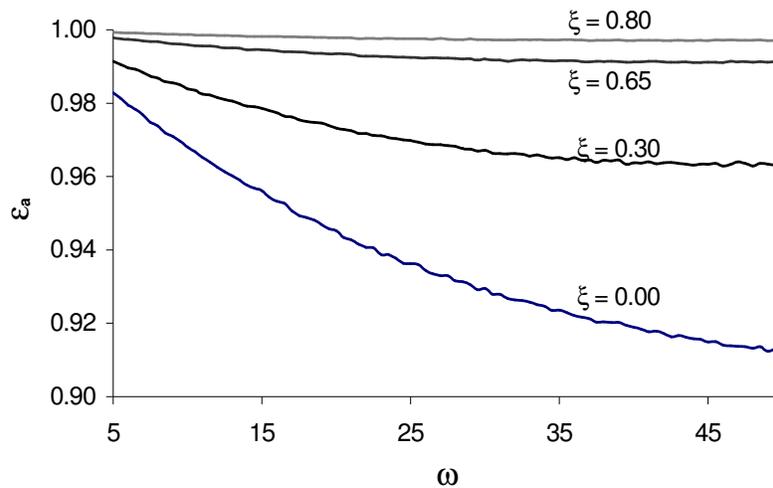


Figura 3.4. Gráfica de la ϵ_a en función de ω , para diferentes ξ .

Para poder hacer un análisis comparativo entre los resultados de la ϵ_a en función de ω , como se observa en la figura 3.4 y por otro lado la relación entre L en función de ω como se muestra en la figura 3.5, se hace una tercer relación pero ahora relacionando la ϵ_a en función de L todo esto para diferentes ξ , como se observa en la figura 3.6.

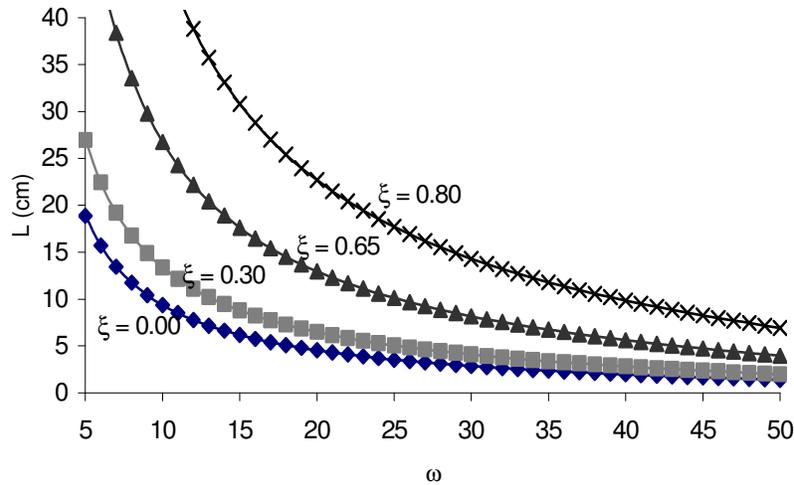


Figura 3.5. Gráfica de L en función de ω , para diferentes ξ .

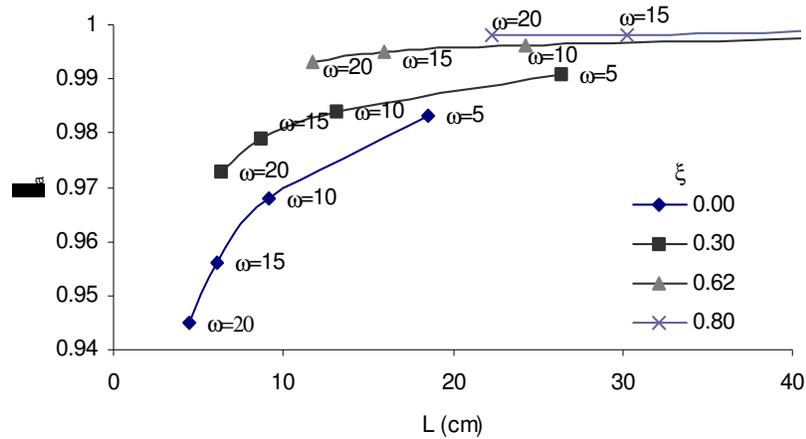


Figura 3.6. Gráfica de ϵ_a en función de L, para diferentes ξ .

Si se quiere una emitancia aparente por encima de 0.99 y si se considera una altura del cono inferior a 20 cm (esto por cuestiones de espacio dentro del DEFAC), se observa en la gráfica 3.6 que el valor idóneo para estas condiciones, es el punto con una $\xi = 0.62$, $\omega = 15^\circ$ y $L = 15.99$ cm.

Con base en este estudio paramétrico se toman a estos valores como los parámetros de diseño óptimos para la construcción del receptor cónico del calorímetro. La tabla 3.3 y la figura 3.7 muestran estos parámetros.

Tabla 3.3. Parámetros de diseño del cono receptor

R_a	1.62 cm
ξ	0.62
R_o	4.28 cm
ω	15°
L	15.99 cm

3.3 Descripción general del calorímetro

La figura 3.8 muestra un esquema del calorímetro construido. En esta figura se pueden observar las principales partes que lo componen, a saber: el cuerpo principal, el cono receptor con baffle, el difusor del flujo y la cámara receptora del fluido de enfriamiento. La cavidad cónica acoplada al cuerpo principal del calorímetro forma un intersticio entre ambos elementos de 5 mm de espesor a lo largo del cono y el baffle, esto se determinó a partir de la experiencia que se tuvo con el calorímetro de placa plana, donde se tenía una buena remoción de calor en la pared con espesor de intersticio. Dentro de esta cámara que se forma, se hace fluir agua para enfriar las paredes interiores del receptor.

La energía radiativa que proviene de los espejos y que pasa por la apertura del calorímetro se absorbe en la superficie de la pared del cono receptor y se transmite al interior del mismo por conducción. El fluido térmico que circula por el intersticio remueve por convección forzada esta energía. El fluido térmico que se usa como fluido de enfriamiento es agua, la cual ingresa al calorímetro a un costado del vértice de la cavidad cónica, recorre toda la superficie cónica del receptor y al llegar al baffle, cambia de dirección por el difusor de flujo, llegando a lo que se ha llamado la cámara receptora del fluido de enfriamiento. La pieza que alberga esta cámara tiene tres conductos equidistantes localizados en su perímetro exterior. El fluido de enfriamiento sale por estos tres conductos hacia el exterior del calorímetro.

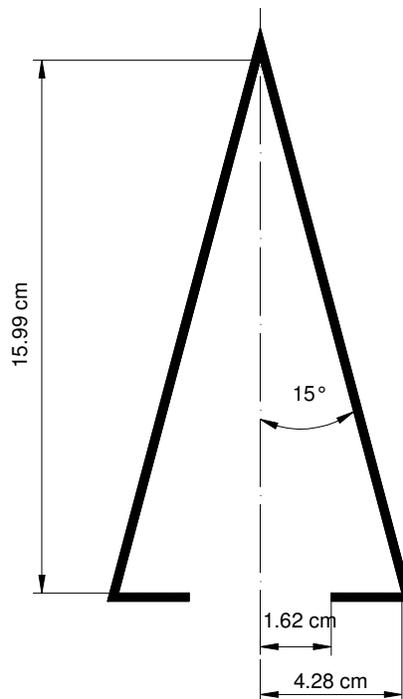


Figura 3.7. Diagrama de los parámetros de diseño para la construcción de la cavidad.

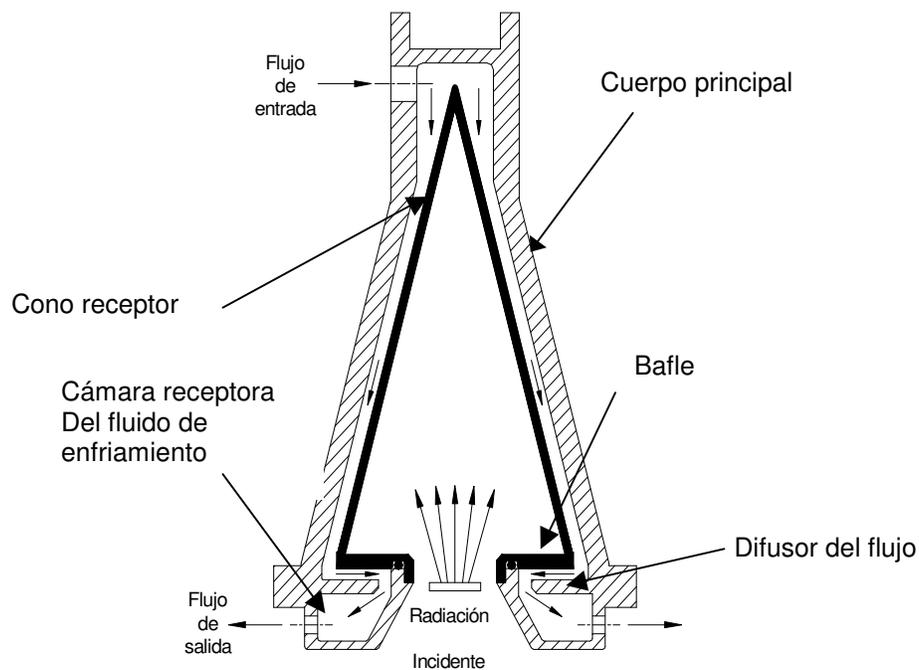


Figura 3.8. Distribución radial del flujo convectivo en el interior del calorímetro

La figura 3.9 muestra una vista del modelo en tres dimensiones del calorímetro armado, así como un corte en sección longitudinal del mismo, donde se ilustra claramente, la entrada y salida del flujo de enfriamiento.

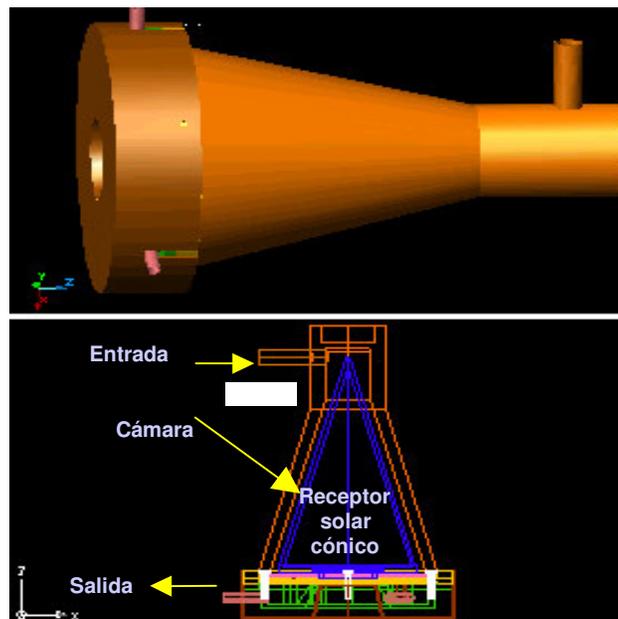


Figura 3.9. Vista 3D y corte longitudinal del calorímetro de cavidad cónica mostrando entrada y salida del fluido de enfriamiento.

3.4 Otras consideraciones de diseño

Además de los parámetros de diseño del cono que se determinaron en la sección anterior, existen otros aspectos a considerar para el diseño del calorímetro en su conjunto, Estos aspectos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de problemática de la que se trata, de la siguiente manera:

1. Materiales a emplear para la construcción del calorímetro
2. Flujo del fluido de enfriamiento del calorímetro
3. Ángulo de apertura del calorímetro

Materiales

La construcción de las diferentes piezas que constituyen al calorímetro requiere la selección de materiales adecuados a la función que tendrán dichas piezas. Por ello se identifican tres tipos principales de piezas: las sometidas a corrosión, las que requieren una alta conductividad térmica, y por último las piezas que requieren ser aislante térmico para la sujeción del calorímetro.

Debido a que el cuerpo principal del calorímetro tiene la función de conducir el fluido de enfriamiento y se encuentra a la intemperie, 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. Así, el material seleccionado para esta aplicación fue 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 (cabe mencionar esto debido a que el cobre es el material con el que se construyó el receptor del calorímetro). Las propiedades físicas de este material se muestran en la tabla 3.4. Este material también se uso para el resto de las componentes del calorímetro con excepción del cono receptor.

Para seleccionar el material empleado para la construcción del cono receptor, se emplean otros criterios; el primero y más importante, se requiere que exista una alta conductividad térmica a través de la pared del receptor, esto con la finalidad de que no exista una concentración de energía en la pared interior de la cavidad que produzca una elevación de la temperatura y que disminuya la eficiencia de absorción de la cavidad, como fue mencionado en la sección 2.2. El segundo criterio es que el material tenga un punto de fusión alto. El material seleccionado para construir el cono receptor que cumple con estas características y se encuentra comercialmente fue el cobre. La tabla 3.4. muestra algunas propiedades termofísicas del cobre.

Tipo de flujo del fluido de enfriamiento

El principio empleado en el calorímetro de placa plana para el enfriamiento de la pared receptora es a través de la transferencia de calor convectiva que existe entre ésta y el fluido de enfriamiento [Cruz, 1997], fluyendo de manera radial en el intersticio de la pared receptora y otra pared, el cual entra por el centro de la placa y sale en los extremos de la misma, forzando a retornar el flujo al centro del

calorímetro (ver figura 1.4).

Tabla 3.4. Propiedades físicas del acero inoxidable AISI 316 y del cobre.

Propiedad		Valor	Unidades
Acero inoxidable AISI 316			
Densidad	ρ	7900	Kg m^{-3}
Conductividad térmica	K	14.9	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ a 300 K
Calor específico	C_p	477	$\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Punto de fusión		1670	K
Cobre			
Densidad	ρ	8933	Kg m^{-3}
Conductividad térmica	K	401	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ a 300 K
Calor específico	C_p	385	$\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Absortancia	α	0.47	
Punto de fusión		1358	K

Desarrollando este mismo principio de hace pasar el fluido de enfriamiento a lo largo de la pared del receptor, ahora en lugar de que el flujo sea radial, es un flujo cónico, entrando por el centro de la parte superior del calorímetro, fluyendo hacia abajo entre la pared del cono y el cuerpo del calorímetro, entre los cuales se forma una cámara de enfriamiento. Una vez que el flujo termina de recorrer la pared del cono, por medio de un difusor se obliga a que el flujo pase por la pared del baffle de manera radial, a diferencia del caso del calorímetro de placa plana, esta vez el flujo es desde el extremo del baffle hacia el centro, como se observa en la figura 3.8.

Ángulo de apertura del calorímetro

El ángulo que forma la proyección del cono solar reflejado por los diferentes grupos de espejos y el eje principal del concentrador, es lo que determina el ángulo crítico de apertura de la cavidad α_{\max} como se muestra en la figura 3.10.

Si consideramos que la distancia radial de los espejos para cada uno de los grupos r_i es: para el grupo A de 31.7 cm, para el grupo B de 54.8 cm y para el grupo C de 63.3 cm, como se observa en la figura 3.11 y partiendo que la distancia focal del concentrador es de 200 cm, (como se puede observar en el apéndice A4), que es la misma distancia del plano de los espejos a la apertura de la cavidad cónica R . Con esta información se puede evaluar tanto la distancia focal real para cada grupo, así como el ángulo normal α_i para cada uno, por medio de la ecuación

$$\tan(2\alpha_i) = \frac{r_i}{R} \quad (3.4)$$

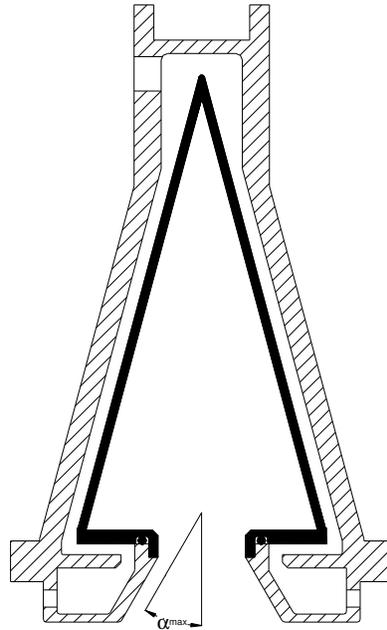


Figura 3.10. Flujo cónico en el interior del calorímetro

Las distancias focales y los ángulos de la normal para cada grupo es como se muestra en la tabla 3.5.

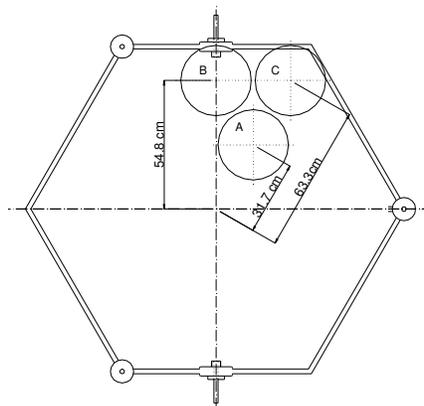


Figura 3.11. Diagrama de los espejos en el marco hexagonal

Tabla 3.5. Distancia focal y ángulo normal de los espejos

espejos	distancia focal	ángulo normal
A	202.5 cm	4.50°
B	207.4 cm	7.66°
C	209.8 cm	8.78°

Con esto podemos determinar que la distancia focal de nuestro sistema es de 206.13 ± 3.64 cm. Y el ángulo de la apertura de la cavidad debe ser mayor al ángulo máximo de la normal del grupo de espejos C. El ángulo de diseño α_{\max} se define de 15° .

3.5 Descripción de los componentes

Las partes principales que constituyen el calorímetro son:

- a) Cuerpo principal
- b) Difusor del flujo
- c) Cámara receptora del flujo interno
- d) Cono receptor
- e) Tolva protectora de la cavidad
- f) Conectores

De las cuales se presenta a continuación una descripción de su funcionamiento así como las características más importantes para su fabricación, los materiales empleados y el proceso de fabricación empleado para su elaboración.

Cuerpo principal

El cuerpo principal del calorímetro fue construido en dos piezas de acero inoxidable AISI 316 las cuales fueron soldadas; el cono y la brida. El cuerpo principal consiste de un cilindro hueco el cual tiene una abertura lateral en la parte superior de 1.27 cm ($1/2''$) de diámetro, la cual tiene rosca estándar para ser acoplada a cualquier conector o válvula. El cilindro de entrada del cono del cuerpo principal, tiene un diámetro exterior de 5.0 cm, un diámetro interior de 3.0 cm y una altura de 4.3 cm, como se puede observar con más detalle en los planos del apéndice A6. en la base de este cilindro se abre un cono con un ángulo de abertura de 15° con una altura de 13.1 cm y un diámetro en la base de 10.3 cm y un espesor de pared de 8 mm. El ángulo de abertura del cono del cuerpo principal es el mismo del receptor cónico del calorímetro, que 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 de 8 mm constante.

El cono del cuerpo principal se une con soldadura a la brida de sujeción, la cual tiene 6 perforaciones para tornillería de 0.64 cm ($1/4''$). La figura 3.12 muestra tres vistas del diagrama de esta pieza y una foto de la pieza terminada.

Esta pieza se ensambla al resto del calorímetro. Para evitar fugas del fluido el cuerpo principal del calorímetro cuenta con un canal para alojar un sello de fluoro-elastómero (VITON) de 0.32 cm ($1/8''$) de espesor que resiste temperaturas hasta de 204° C. La sujeción del calorímetro al sistema concentrador se hace desde la parte superior de esta pieza, con una abertura roscada de 3.18 cm ($1 \frac{1}{4}''$) de diámetro misma que se acopla a un cople aislante como se puede observar en el apéndice A6.

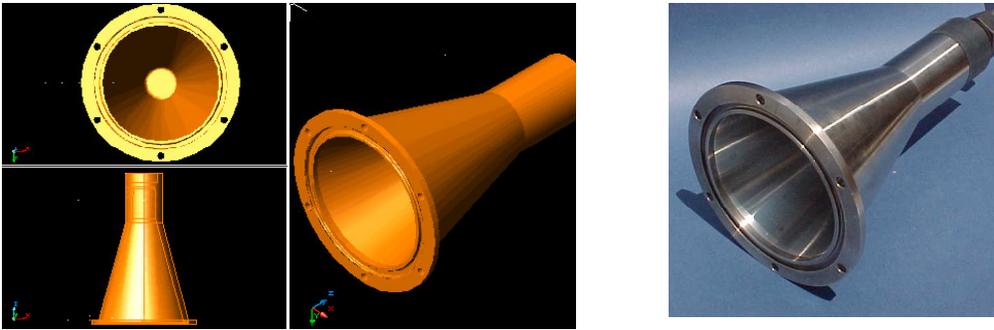


Figura 3.12 Diagrama y fotografía del cuerpo principal

Difusor del flujo

En la figura 3.13 se presenta el diagrama y la fotografía del difusor del flujo, esta pieza consiste en un disco de acero inoxidable AISI 316, el cual tiene un diámetro exterior de 14.14 cm y una abertura central de 6.00 cm con un espesor de 5 mm. Este disco cuenta con 6 barrenos, los cuales tienen el mismo diámetro que los barrenos del cuerpo principal, y tienen la finalidad de sujetar tanto al cuerpo principal como a la cámara receptora de flujo.

La finalidad de esta pieza, es la de cambiar la dirección del flujo del fluido dentro del calorímetro, inicialmente el fluido de enfriamiento baja por la cámara que se forma entre el cuerpo principal y el cono del receptor, en la parte inferior este flujo topa contra el difusor, forzando a que el fluido circule hacia el centro del calorímetro entre el baffle y esta pieza, terminando en el centro de la cámara receptora.

Para evitar fugas del fluido en el calorímetro, el difusor cuenta en su cara interior con dos canales, los cuales alojan dos sellos de VITON, la ranura exterior es de la misma dimensión que el sello del cuerpo principal, esto con la finalidad de tener un diseño con mayor intercambiabilidad. El canal interior tiene la finalidad de separar el flujo en el interior de la cámara receptora. Las dimensiones como las especificaciones de construcción de esta pieza se puede ver con mayor detalle en los planos que se encuentran en el apéndice A6.

Cámara receptora del flujo interno

La cámara receptora consiste en dos cavidades concéntricas de acero inoxidable AISI 316, con una altura de 1.7 cm, la pared interior de la cámara la cual tiene una apertura central de 3.24 cm y es a través de esta abertura por donde entra la radiación al interior del receptor, esta pared tiene una inclinación de 30° lo que permite por un lado una incorporación del flujo que baja por el difusor y entrar en esta cámara de manera más suave y por otro lado esta inclinación permite que toda la radiación entre a la cavidad sin ninguna interferencia como se mencionó en la sección 3.4.

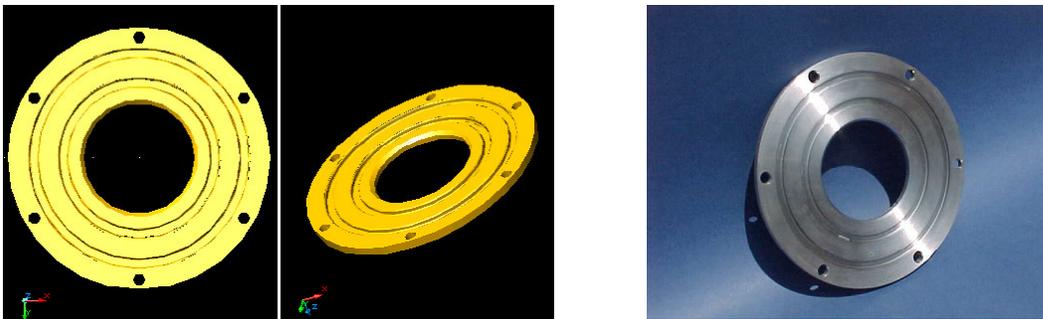


Figura 3.13 Diagrama y fotografía del difusor del flujo

Las dos cavidades de esta pieza se encuentran separadas por una pared la cual tiene tres aperturas distribuidas de manera simétrica, es decir, están distribuidas concéntricamente separadas 120° una de otra. Por otra parte estas aperturas se encuentran colocadas de manera centrada a las salida del fluido de la cámara exterior, esto para que el flujo sea lo más homogéneo posible. Las tres salidas de la cavidad son por medio de tubos de 0.32 cm (1/8") de diámetro. La figura 3.14 muestra tres vistas y una fotografía de esta pieza.

La apertura de la cámara tiene una rosca la cual sirve para unir esta pieza con el bafle del receptor cónico, debido a que estas piezas son de materiales distintos (acero y cobre respectivamente), se requiere poner entre estas dos piezas un sello para evitar fugas.

El cuerpo de la cámara se acopla al resto del calorímetro con una brida que se atornilla al difusor y el cuerpo principal.

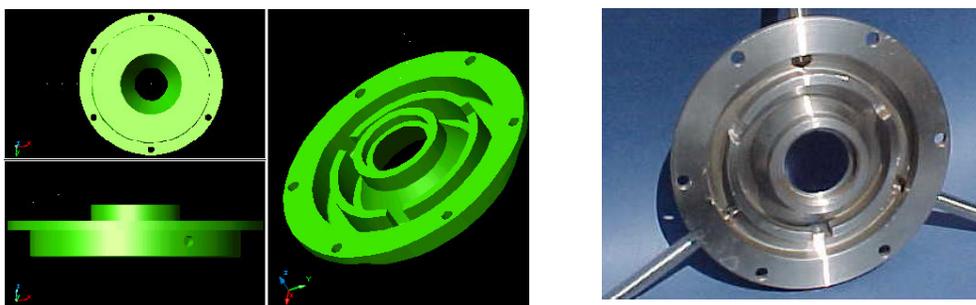


Figura 3.14. Diagrama y fotografía de la cámara receptora del flujo interno

Cono receptor

La figura 3.15 muestra tres vistas en 3D y una fotografía del cono receptor. Esta es una pieza fundamental del calorímetro, la cual se construyó con base en el análisis paramétrico desarrollado en la sección 3.2; el material empleado para ello fue cobre y sus propiedades físicas se describen en la sección 3.4, las paredes de esta cavidad tiene un espesor uniforme de pared de 3.0 mm.

Este elemento consisten de dos partes, las cuales se encuentran soldadas entre si con soldadura de plata, una de estas dos piezas es el “bafle”, el cual es un disco que tiene un diámetro de abertura interior de 3.24 cm y un diámetro exterior de 8.56 cm, con un espesor de pared de 3.0 mm, la abertura del bafle tiene roscada estándar, la cual une al receptor con la cámara del flujo interior.

La apertura del bafle tiene un canal para alojar un sello de VITON el cual resiste temperaturas de hasta 204° C, esto garantiza que no se tendrán fugas entre el difusor y el receptor, como se observa en la figura 3.15.

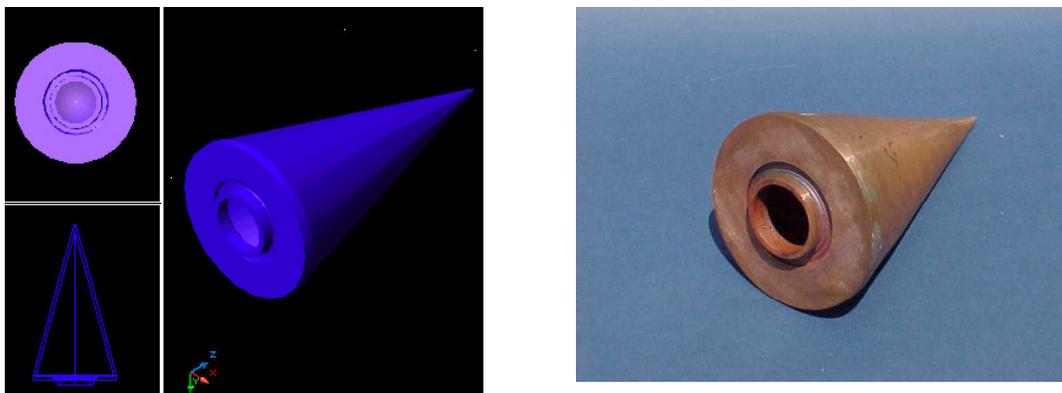


Figura 3.15. Diagrama y fotografía cono receptor

La construcción del cono fue hecha con lamina de cobre, para dar la forma del cono se construyó primero un cono de acero con una apertura de 15°, la lamina de cobre por medio de forjado se hizo que tomara la forma del cono y soldada en el costado. Las especificaciones de esta pieza se pueden observar en los planos del apéndice A6.

Tolva protectora de la cavidad

La figura 3.16 muestra tres vistas en 3D y una fotografía de la tolva de la cavidad. Esta pieza tiene la finalidad de proteger al calorímetro de cualquier tipo de daños por desenfoque, a través de la reflexión de la mayor parte de la radiación que incide en pared de la tolva, que de lo contrario incidiría directamente en el calorímetro, provocando puntos muy calientes. Esta tolva consiste en una tapadera de acero inoxidable de 1.35 mm (1/16”) de espesor, la cual se sujeta a presión al cuerpo del calorímetro, en el centro esta tapadera cuenta con una apertura cilíndrica de 4.5 cm de diámetro, que embona con la cámara interior de la cavidad, dicha apertura fue diseñada con la finalidad de permitir la entrada sin interferencia de toda la radiación incidente, incluso de la radiación concentrada de los espejos mas alejados, que son los que tienen un ángulo de incidencia mayor (aproximadamente 7.5°).

Otra finalidad de la tolva es reducir al mínimo las pérdidas convectivas de la parte inferior del calorímetro, por ello entre la tolva y el calorímetro se forma una cámara que se rellena con un polímetro aislante marca “Armaflex” de ¾” de espesor con una conductividad de $k = 0.040 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

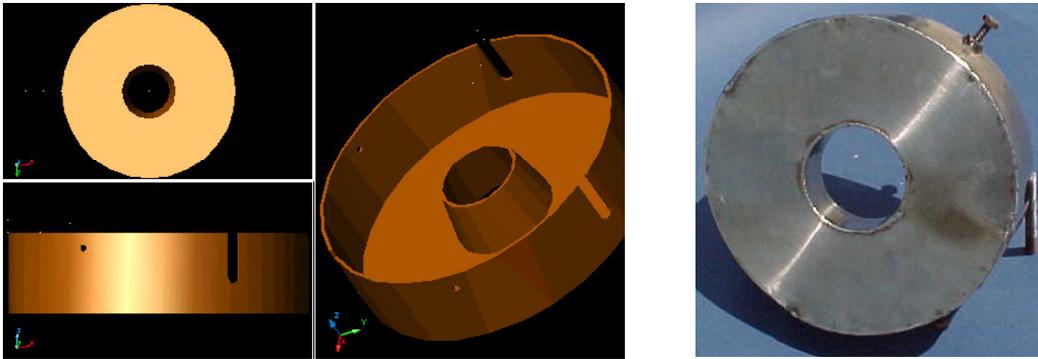


Figura 3.16. Diagrama y fotografía tolva protectora de la cavidad

Tubería de entrada del calorímetro y pasamuros

Una componente que se tuvo que fabricar y no forma parte del calorímetro pero permite su instrumentación es el pasamuros. La finalidad de esta componente es hacer pasar los cables de los termopares al interior del calorímetro sin que éste tenga fugas, para ello este dispositivo consta de dos piezas, la primera es una taza con brida que sella en la parte superior y la tapadera con orificios por donde entran los termopares y se sellan con silicón, esta pieza se conecta por una T a la tubería de entrada al calorímetro. La figura 3.17 muestra un diagrama de esta pieza y una fotografía de la misma, donde se puede apreciar el paso de los termopares.

Vistas del Calorímetro

En la figura 3.18 se muestra varias vistas de todas las componentes de la cavidad calorimétrica construidas y de la cavidad armada como un todo

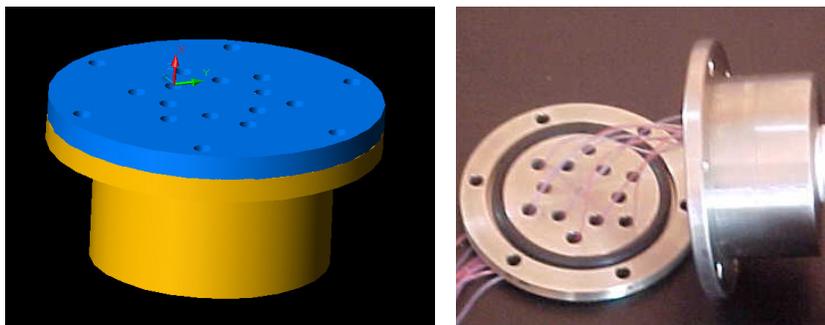


Figura 3.17. Diagrama y fotografía del pasamuros del calorímetro

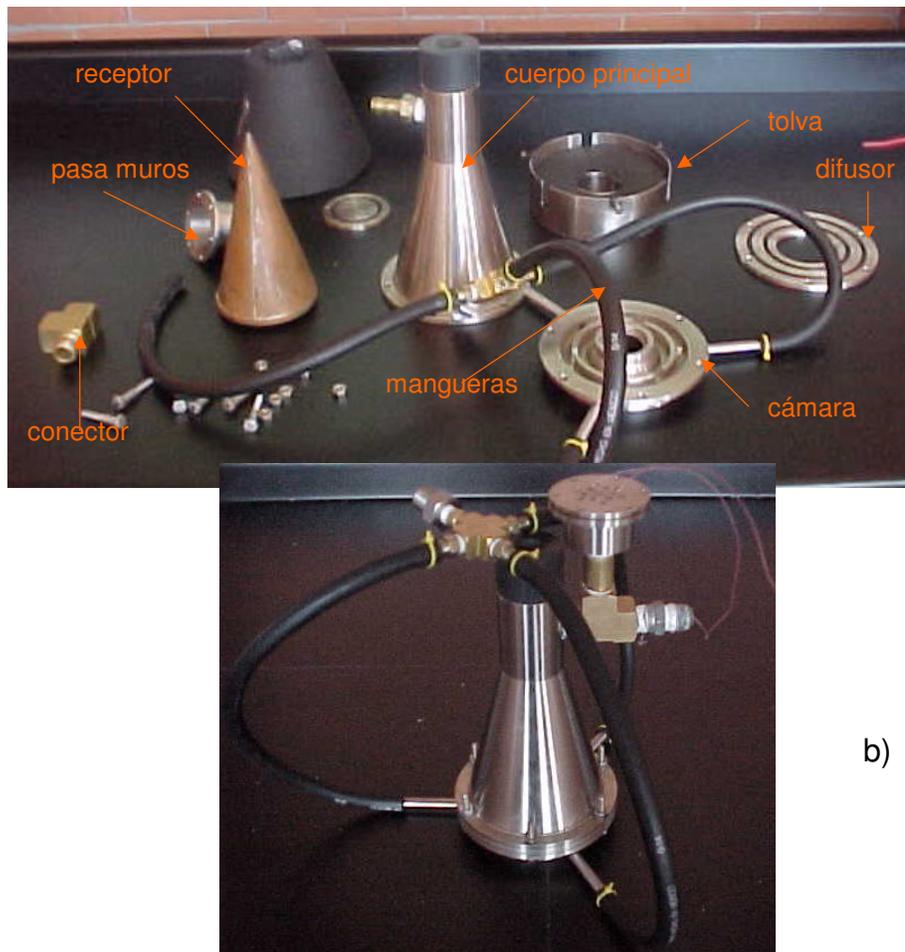


Figura 3.18. Fotografías del calorímetro de cavidad cónica a) sus partes, b) armado.

Capítulo 4

Instrumentación y operación del sistema

En este capítulo se presenta la descripción de la instrumentación y montaje experimental, tanto para las pruebas de concentración con el calorímetro de cavidad cónica en el DEFAC, así como para la operación general de todo el sistema para la experimentación. También se muestra el diseño experimental, así como la metodología empleada para la realización de los experimentos.

4.1. Instrumentación y montaje del calorímetro

Termopares

Para hacer el estudio térmico detallado del calorímetro de cavidad cónica, se requiere instrumentar con termopares su interior, no sólo para conocer las temperaturas del fluido a la entrada y a la salida del calorímetro, sino también para conocer la distribución de temperaturas a lo largo de la pared del receptor.

Conociendo las temperaturas de entrada y salida del fluido de enfriamiento y midiendo el flujo másico que pasa por el calorímetro, se puede determinar la cantidad de energía que el fluido remueve de la pared del receptor por unidad de tiempo cuando se concentra la radiación solar dentro de la cavidad. Considerando el balance energético presentado en la sección 1.5, se puede decir que este flujo de energía removido es proporcional al flujo de energía solar concentrado por el DEFAC.

Por otra parte, la distribución de temperaturas a lo largo de la cavidad, permite hacer un análisis comparativo entre esta distribución y la distribución de flujo radiativo incidente en la cavidad. La distribución del flujo radiativo se calculó por medio del trazado de rayos, y fue presentada en la sección 2.5. Con esta información se podrán conocer los puntos críticos dentro de la cavidad.

Las temperaturas de la pared interior del receptor cónico y las temperaturas del fluido de enfriamiento del calorímetro, se miden usando termopares tipo "T". Este

tipo de termopares es una unión bimetálica cobre-constantan; el calibre empleado para esta experimentación fue el 36; se seleccionó este calibre por ser delgado y debido a que la unión bimetálica es pequeña, con lo cual se tiene una inercia térmica baja en las lecturas; Además, por sus características estos termopares son adecuados para medir temperaturas en superficie planas y en flujos pequeños [Hernández, 2001]; El rango de medición para estos termopares es entre -200 y 350 °C.

La instrumentación con estos termopares es de la siguiente manera:

1. La medición de la temperaturas de entrada y salida del fluido de enfriamiento (agua), se hace con dos termopares, etiquetados como T10 y T11 respectivamente. El termopar que mide la temperatura del flujo de entrada se coloca a la mitad del diámetro del ducto de entrada del calorímetro, con esto se espera que la lectura que se haga de la temperatura sea muy próxima a la temperatura promedio del fluido. El termopar a la salida, se encuentra fijo a la mitad del espacio que forma el difusor y la cámara receptora del flujo interno, este termopar se sujeta por medio de un pegamento cerámico resistente, ver figura 4.1.b.
2. Las mediciones de las temperaturas en la pared interior de la cavidad se hacen con 7 termopares distribuidos con una separación entre ellos de 2.5 cm a lo largo de la cara del cono receptor que da a la cámara donde circula el fluido de enfriamiento. Estos termopares se etiquetan del T2 al T8. Además, para medir la temperatura en el baffle se coloca uno en el centro, el cual se nombra como termopar T9 (ver la figura 4.1a). Para fijar los termopares a la pared de la cavidad y tener una lectura de la temperatura superficial, se hicieron perforaciones para cada termopar con una profundidad de 0.25 mm y se fija cada termopar a estos pequeños orificios con un pegamento cerámico resistente a altas temperaturas, como se observa en la figura 4.1b.
3. La medición de la temperatura del medio ambiente T_a , se realiza por medio de un termopar tipo T, del mismo calibre que los empleados para medir la temperatura de las paredes del receptor.

Una vez fijos los termopares a las paredes del receptor se fueron juntando y protegiendo con silicón hasta llegar a la punta del cono donde se canalizan en un solo grupo para ocupar la menor área posible dentro del calorímetro. Todos los termopares juntos se hacen pasar a través de la entrada del calorímetro. En el tubo de entrada al calorímetro se colocó una unión T como adaptador que permite conectar el pasamuros de termopares al calorímetro. Cada termopar se hace pasar por los orificios del pasamuros, sellando con silicón los orificios con los termopares por dentro, para evitar fugas. Los termopares, ya fuera del calorímetro, se unen nuevamente y se meten dentro de un tubo de látex como protección; esta canalización tiene una longitud aproximada de 4 metros de largo, distancia suficiente para salir del calorímetro y llegar sin ningún problema hasta la tarjeta adquisidora de datos (ver la figura 4.4) .

Sistema de adquisición de temperaturas y radiación

Para el registro automático y control de los datos experimentales que se obtienen durante las corridas se emplea 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 almacena los datos en una PC. Este equipo de adquisición de datos tiene las ventajas de convertir la señal de los termopares de mili-volts a valor digital con 2 cifras significativas de la temperatura, esto gracias a que el sistema aplica de manera interna el polinomio de transformación. Los valores de las temperaturas de todos los termopares se almacenan en una base de datos a un tiempo determinado.

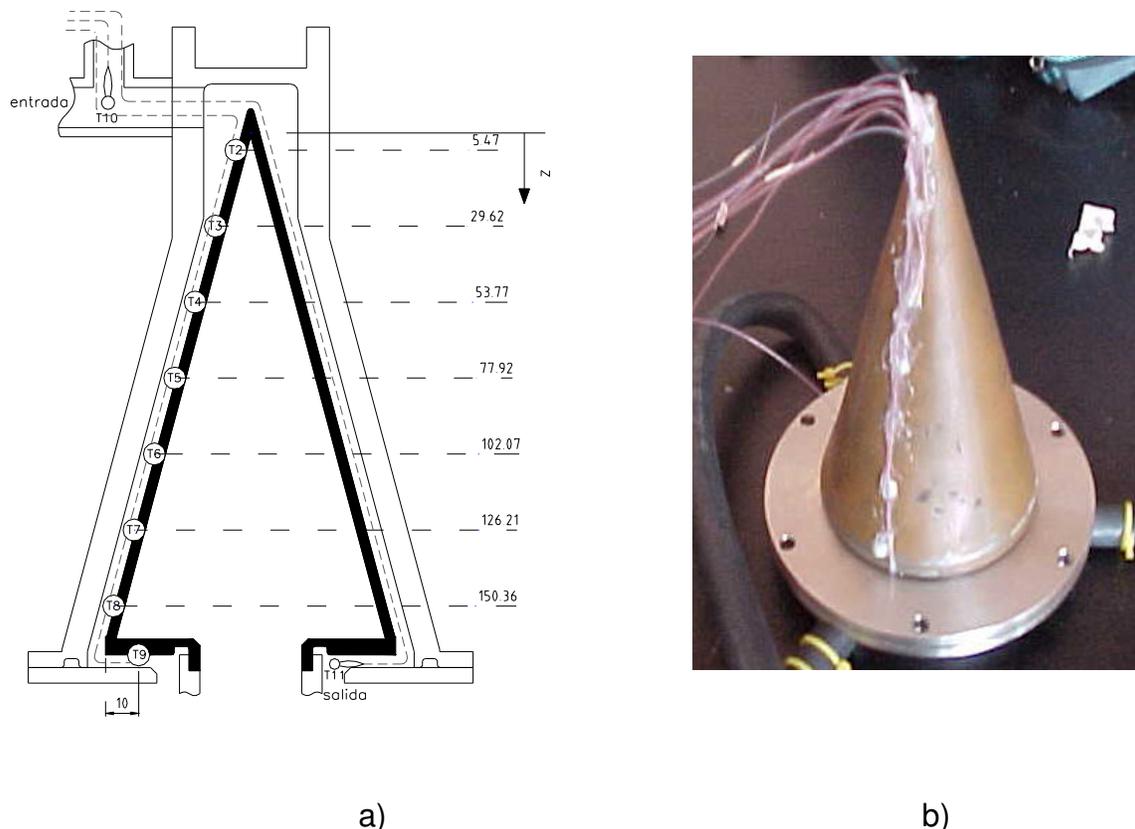


Figura 4.1. Distribución de los termopares a lo largo de la cavidad cónica: a) esquema de las posiciones de los termopares y b) fotografía de los termopares fijados en la cavidad cónica.

Pirheliómetro

Para conocer la cantidad de la energía solar que llega al DEFRAC durante la experimentación se requiere medir de manera sistemática el flujo radiativo directo I_d incidente en el plano de los espejos concentradores. Esta medición se hace por medio de un instrumento llamado pirheliómetro, el cual consiste en una termopila

la cual está dentro de un cilindro que no permite entrar la radiación sólo de manera directa. Para hacer la medición durante todo el tiempo de experimentación se acopla este instrumentó a una montura ecuatorial con seguimiento constante del sol, el equipo empleado fue un pirheliómetro con seguimiento modelo NIP marca Epplay, con numero de serie 31821E6, el cual hasta su última calibración (noviembre del 2002) tiene la constante $8.33 \times 10^{-6} \text{ V m}^2 \text{ W}^{-1}$, ver la figura 4.2. Estas mediciones de igual manera que las de la temperatura, se almacenan de manera automática con el adquirente de datos.



Figura 4.2. Pirheliómetro con el equipo de seguimiento del sol

Armado del calorímetro

Con todas las piezas del calorímetro listas y fijados previamente todos los termopares en su sitio, tanto en la pared del receptor como a la entrada y salida del calorímetro (ver la figura 4.1.b), se arma 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. El difusor se coloca con sus respectivos sellos sobre la cámara receptora del flujo.
3. Se rosca el receptor cónico a la cámara receptora del flujo con presión para evitar fugas y garantizar que el sello asiente bien.
4. Una vez que se tienen las tres piezas ensambladas, el receptor, el difusor y la cámara, se ensamblan estas tres piezas al cuerpo principal del calorímetro. Las bridas del cuerpo principal, el difusor y la cámara receptora se atornillan con seis tornillos de acero inoxidable. Estos tornillos se aprietan hasta garantizar que los sellos asienten perfectamente

y así evitar cualquier tipo de fugas entre los componentes del calorímetro.

5. En las salientes de la cámara receptora del flujo se colocan tres tubos roscados, a los cuales se les coloca mangueras. Estas tres mangueras se unen en una conexión tipo T, juntando los flujos de salida, y esta unión se canaliza a la manguera de salida.
6. Posteriormente, una vez armado el calorímetro, se le coloca un aislante de Armaflex con un espesor de 1.9 cm para evitar pérdidas convectivas, y una cubierta de papel aluminio con alta reflectancia para evitar las ganancias de calor radiativo.

El calorímetro armado se puede ver en la figura 4.3, donde se presenta sin el recubrimiento de aislante, y sin la tapadera protectora del bafle.



Figura 4.3. Calorímetro armado e instrumentado listo para hacer experimentación.

Flujo de agua en el calorímetro

Debido a que una de las variables más importantes en juego durante la experimentación es el flujo másico de enfriamiento con agua, es importante que este flujo sea continuo durante todo el experimento y la temperatura de entrada al calorímetro sea constante. Para lograr estas dos condiciones se usó un tanque aislado, elevado a una altura de 5 metros, esta altura es mayor a la requerida para superar la altura física del experimento (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 en la salida del calorímetro, sin variaciones durante la experimentación, se hace circular agua al tanque elevado continuamente hasta el límite donde éste bordea el agua excedente.

Para evitar ganancia térmica producto de la absorción radiativa en las paredes negras de las mangueras, éstas se forran de papel aluminio, el cual tiene una alta reflectancia. El flujo másico se controla por medio de una válvula de globo. La figura 4.4 muestra el arreglo general del sistema experimental con el tanque elevado y la tubería de acceso al calorímetro.

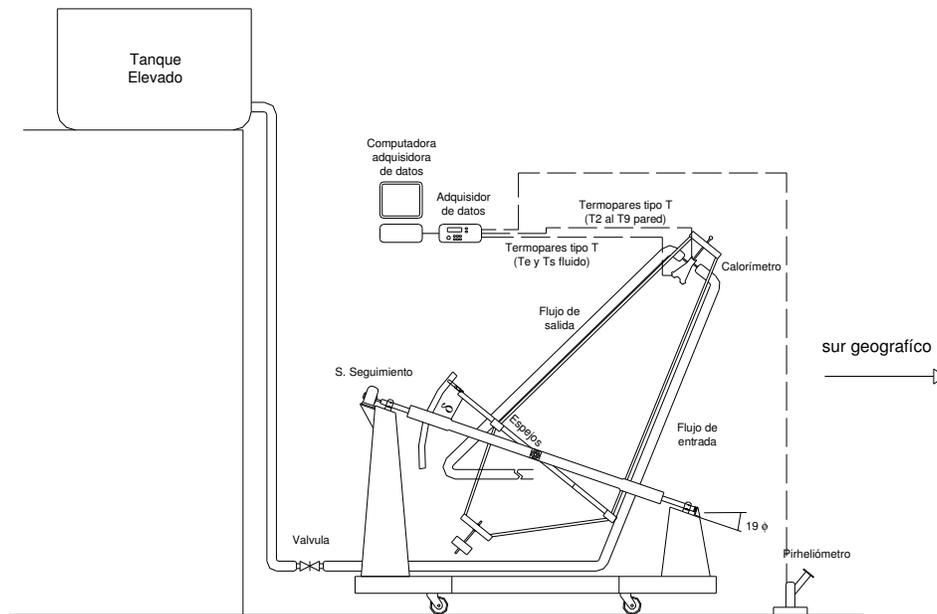


Figura 4.4. Esquema del arreglo general y la orientación del sistema experimental.

La medición del flujo másico que pasa a través del calorímetro se realiza por medio de la medición del tiempo que tarda en llenarse un volumen definido previamente, a la salida de la manguera del calorímetro. Este procedimiento se realiza 10 veces durante la experimentación. Con ello se calcula el flujo másico dividiendo el volumen entre el promedio del tiempo. Con el cálculo de la desviación estándar del tiempo se determina la incertidumbre del flujo másico por medio de la propagación de errores.

4.2 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 puesta en operación del equipo. Para tener la radiación solar concentrada por el DEFRAC dentro de la cavidad se requiere seguir los siguientes procedimientos principales:

- Selección del día, orientación y alineación del DEFRAC
- Seguimiento del movimiento aparente del sol por el DEFRAC
- Enfoque de los espejos

Selección del día, orientación y alineación del DEFRAC

Para hacer experimentación con sistemas de concentración solar de foco puntual, y en particular con el DEFRAC, se requiere seleccionar 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 a 800 W/m^2 al menos durante 15 minutos. Esto permite alcanzar un estado estacionario en el experimento.

El DEFRACT 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 a su eje óptico principal. El eje principal del DEFRACT 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 DEFRACT tiene montura ecuatorial, esto implica que para conseguir el seguimiento solar, el sistema debe de orientarse de tal forma que el eje que une a las chumaceras del marco principal, llamado eje principal, quede paralelo al eje de rotación de la tierra. La inclinación de este eje principal con respecto a la horizontal es de $\phi = 19^\circ$, igual a la latitud del CIE en la ciudad de Temixco, Morelos. Basta con orientar el concentrador en la dirección del eje norte-sur geográfico para que los ejes terrestre y el principal del DEFRACT queden paralelos, ver figura 4.5. Cabe mencionar que el eje geográfico para Temixco tiene un ajuste de 7° en dirección este con respecto al eje norte-sur magnético [Campos-Enriquez,1991].

Debido a que la inclinación del plano que forma la trayectoria del sol a lo largo del día (a la cual se le denomina declinación δ) no es constante y depende del día del año, se tiene que ajustar el plano de los espejos del concentrador a este plano 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, como se observa en la figura 4.5.

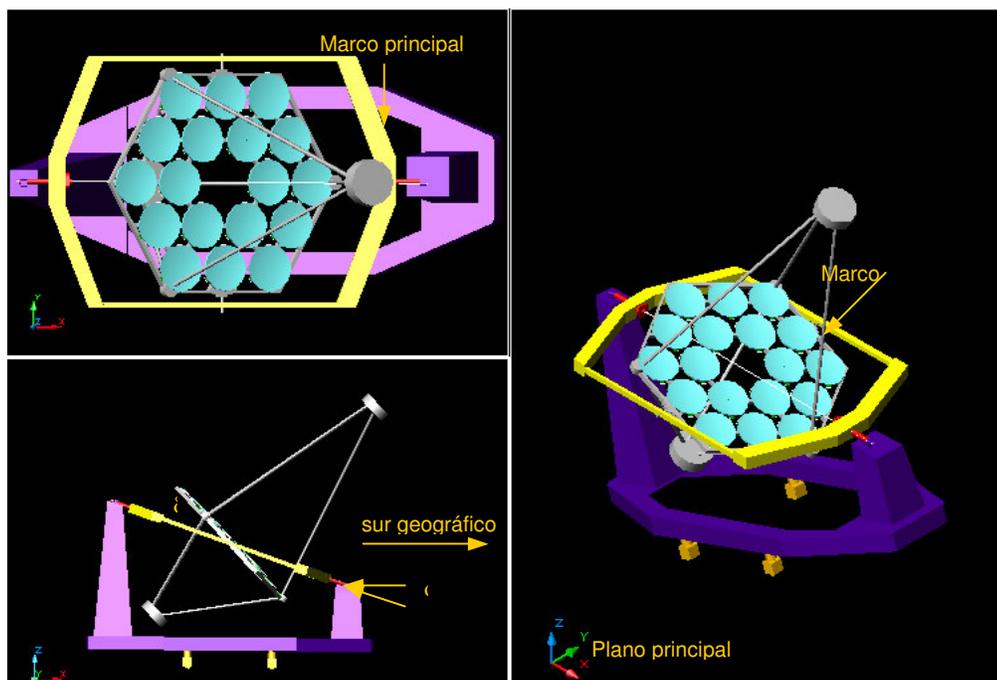


Figura 4.5 Orientación e inclinación del marco principal del DEFRACT con la horizontal.

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, esta velocidad 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°/hora, velocidad necesaria para el seguimiento del movimiento aparente del sol. Este sistema se explica con mayor detalle en el apéndice A3.

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 tiene que el eje del sistema es paralelo a la dirección de los rayos solares, como se observa en la figura 4.6a.

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 sabiendo 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 4.6b.

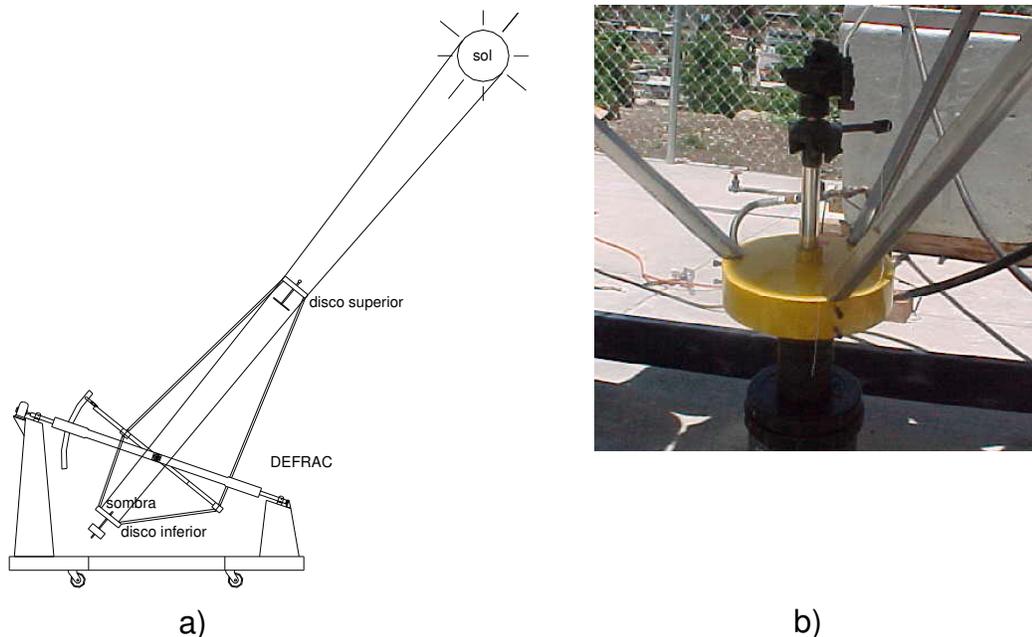


Figura 4.6. a) Proyección del disco superior en el disco inferior, b) imagen del ajuste de la sombra en el disco inferior.

Una vez orientado y alineado hacia el sol el DEFAC, se inicia el seguimiento del movimiento aparente del sol 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. Una vez alineado y enfocado el concentrador, el movimiento de seguimiento del sol es continuo.

Enfoque de los espejos

Debido a que existen tres diferentes distancias entre el centro de los espejos y el eje del sistema óptico del DEFAC, se designan tres grupos de 6 espejos cada uno, llamados Grupos A, B y C (ver apéndice A4). Esta clasificación se muestra en la figura 4.7.

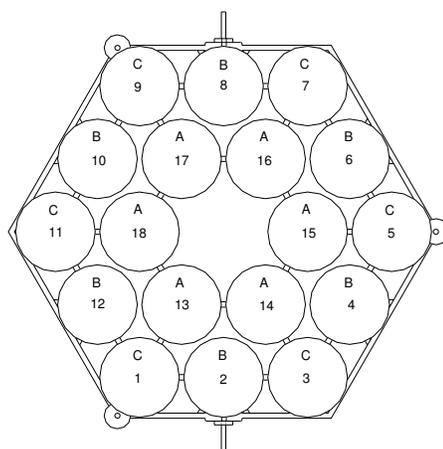


Figura 4.7. Clasificación de los espejos por su distancia al eje principal del DEFAC.

Se fija la distancia del receptor a una distancia de 202.5 cm con respecto a la base del marco hexagonal, que es ligeramente mayor (3.7 cm) a la distancia donde coinciden los focos de los tres grupos de espejos.

Una vez ajustado el receptor a la distancia focal del sistema, se enfoca cada uno de los espejos colocando la mancha solar en el centro de la apertura del receptor. Esto se realiza por separado para cada espejo; es decir, se destapa un espejo, se enfoca y se vuelve a tapar. Se procura de que ninguno de los spot se quede en el bafle o en la periferia de la apertura del receptor (ver la figura 4.8).

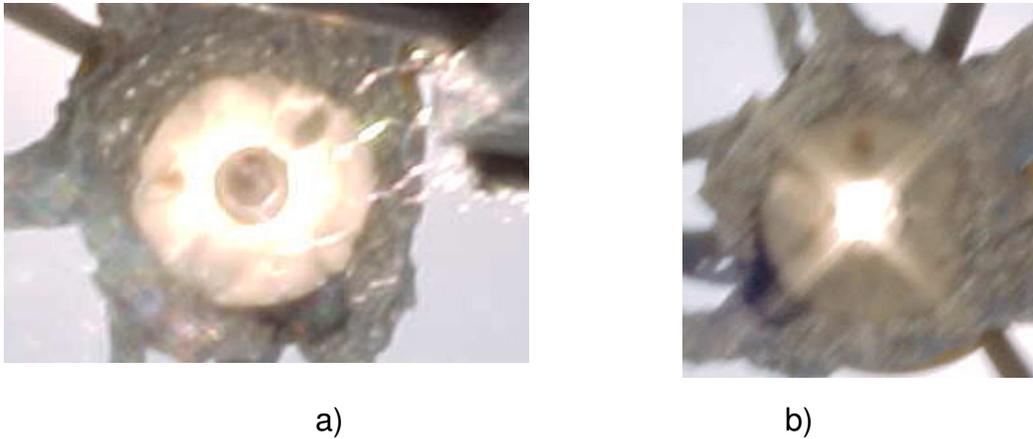


Figura 4.8. Ajuste de espejos del concentrador, a) muestra como la imagen solar se encuentra en la periferia de la apertura b) muestra como los espejos ajustados forman una sola imagen dentro de la apertura.

El enfoque de los espejos se realiza por medio de tres tornillos con resortes que soportan a la base del espejo y por medio de opresores se ajusta la dirección del espejo con la combinación de las tres distancias. Cabe mencionar que debido a que los resortes no presentaban la suficiente rigidez y los tornillos se atascaban, el enfoque de cada espejo no era permanente debido a que en cada experimentación se requería volver a enfocar cada uno de ellos.

4.3. Diseño experimental

Se realizaron varios experimentos con diferentes condiciones para verificar la operación y funcionamiento del sistema en general y del calorímetro en particular. Con base en la experiencia adquirida y para calcular la potencia de concentración del DEFRAC y las condiciones de operación del calorímetro, se determinó realizar 4 experimentos calorimétricos: uno con cada grupo de espejos (A, B y C) y uno con los tres grupos de espejos (18 espejos). Los parámetros que se fijaron al inicio de cada experimento son el flujo másico y la temperatura de entrada del fluido de enfriamiento al calorímetro. La radiación solar directa y la temperatura ambiente son condiciones que se imponen al sistema y dependen del medio ambiente. Las variables que se miden son todas las temperaturas dentro de la cavidad, incluyendo la entrada y salida, así como la de la tolva y la del aire del medio ambiente. También se miden el flujo radiativo solar directo y el flujo másico del agua de enfriamiento.

El flujo másico se define como el cambio de la cantidad de masa por unidad de tiempo, esto es

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (4.1)$$

pero como $\Delta m = \rho \Delta V$ entonces

$$\dot{m} = \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} \quad (4.2)$$

Así, para medir \dot{m} , se establece un volumen de control a la salida del flujo y se mide el tiempo que tarda este volumen en llenarse; es decir, se afora el gasto volumétrico y se multiplica éste por la densidad del agua a la temperatura promedio de experimentación. Debido a que la medición del tiempo de llenado del volumen se realiza por medio de un cronómetro de manera manual, se tiene un error importante en la medición. Este error experimental se determinó haciendo varias repeticiones de la misma medida y calculando su desviación estándar.

Como se mencionó en la sección 4.1, el gasto volumétrico del agua del tanque elevado es controlado por medio de una válvula de globo, para que siempre permanezca constante y de esta manera garantizar un gasto constante.

Las mediciones de las temperaturas se realizaron tomando lecturas de los termopares cada 2 segundos con auxilio del sistema de adquisición de datos y se promediaron estas temperaturas en el intervalo de tiempo durante en el cual, las temperaturas permanecieron constantes dentro de un rango de ± 0.8 °C, a lo que se le considera como el estado estacionario de calentamiento. Estos datos

se almacenan en un archivo.

En forma similar el flujo radiativo solar incidente en los espejos del DEFRAC se midió, como se mencionó en la sección 4.1, por medio del pirheliómetro conectado al sistema adquirente de datos, almacenando las mediciones cada determinado tiempo en la misma base de datos que las temperaturas.

A todos los cálculos que se realizaron, se les aplicó la teoría de propagación de errores con la finalidad de calcular su incertidumbre (ver apéndice A5).

4.4. Metodología experimental

Antes de realizar los cuatro experimentos que se presentan en el capítulo 5, se hizo una serie de experimentos preliminares, con los cuales, se determinaron algunas condiciones de operación del sistema para obtener buenos resultados en los experimentos:

- a. el flujo másico debe ser de 1.0 ± 0.2 l/min para una garantizar una buena remoción de calor con incremento de la temperatura de salida del agua no mayor a 5 °C.
- b. la radiación directa mínima para experimentar debe ser 800 ± 25 W/m² durante un tiempo mayor a la experimentación, con ello se garantiza la máxima potencia concentrada para cada experimento.

- c. El tiempo de calentamiento del calorímetro es de 3 minutos, al finalizar este tiempo se puede considerar las mediciones de temperatura dentro del estado estacionario.
- d. Una vez que la cavidad se encuentra en estado estacionario, en este estado se requiere sostener el experimento por lo menos durante 5 minutos más.
- e. La temperatura de operación del agua dentro del calorímetro se mantendrá dentro de un rango que va de 25 a 35 °C.

En cada experimento realizado la secuencia de acciones que se llevaron a cabo fue la siguiente:

1. Para iniciar la experimentación, se observa si las condiciones climatológicas son apropiadas.
2. Se orienta y alinea el DEFRAC
3. Una vez orientado el equipo, se instala el sistema de cómputo que controla el seguimiento del sol.
4. Se conecta la manguera de la entrada del calorímetro al tanque elevado; se hace recircular agua en este tanque para mantener la altura efectiva constante y por último se fija en la válvula a la entrada del calorímetro un flujo másico de 1 ± 0.2 l/min.
5. Se conecta toda la instrumentación, tanto los termopares del calorímetro como el pirheliómetro al adquisidor de datos y se corre el programa de adquisición de datos.
6. Una vez que se tiene alineado el DEFRAC, funcionando el sistema automático de seguimiento solar y se está circulando agua por el calorímetro, se ajustan los espejos uno por uno, procurando que toda la mancha solar entre por la apertura.
7. Ya que se tienen ajustados todos los espejos, se espera un momento hasta que las temperaturas de entrada y salida del flujo se mantengan constantes dentro de un rango de ± 0.5 °C, para garantizar que el calorímetro está en estado estacionario. Una vez que se tiene todo listo, se selecciona un grupo de espejos, y se destapan para que concentren la energía en el calorímetro.
8. Se revisa que el gasto sea constante y el nivel de radiación sea mayor a 800 W/m^2 y permanezca constante dentro de un rango de $\pm 25 \text{ W/m}^2$. Por otra parte se verifica que la temperatura de la pared del bafle protector permanezca constante durante la experimentación, en caso contrario, esto indicaría que hay uno o varios espejos que están mal enfocados y su radiación no está entrando por la apertura de la cavidad.

9. Durante toda la experimentación se revisa que el DEFRAC siempre se encuentre orientado hacia el sol.
10. La temperatura de salida del flujo de enfriamiento debe de permanecer constante dentro de un rango de ± 0.5 °C, para que se considere que se encuentra en estado estacionario.
11. Una vez que se alcanzó el estado estacionario, se deja correr el experimento al menos 10 minutos y posteriormente se procede a desenfocar al DEFRAC. Esto se consigue fácilmente moviendo el marco hexagonal manualmente o con el sistema automático, desde la PC, comandando un cambio en la velocidad de seguimiento solar.
12. El sistema adquirente de datos continua funcionando hasta que se enfría totalmente el calorímetro.

Capítulo 5

Resultados Experimentales y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados experimentales de la calorimetría de agua fría realizados para cada uno de los diferentes grupos de espejos, así como, los resultados con todos los espejos del DEFRAC. Con estos valores se presenta el cálculo de la potencia concentrada, la evaluación de la eficiencia de absorción de la cavidad y por último el análisis de los resultados.

5.1 Características generales de los elementos comunes en las experimentaciones

Durante los experimentos hubo aspectos generales que se mantuvieron constantes para todos los experimentos, como son: las características ópticas de los espejos, el factor de sombreado para cada grupos de espejos, la ubicación de los termopares dentro del calorímetro y por último las propiedades termofísicas del agua; que a continuación se describen.

Propiedades termofísicas del agua

El agua fue el fluido térmico que se usó como refrigerante en el calorímetro. La tabla 5.1 presenta las propiedades termofísicas del agua considerando que la temperatura promedio del fluido durante la experimentación fue de 30 °C. Los valores de estas propiedades se utilizan para el cálculo del calor removido por el fluido desde las paredes del receptor. Cabe señalar que se obtienen los mismos resultados si se considera las propiedades termofísicas del agua con la temperatura mínima y la temperatura máxima de experimentación.

Tabla 5.1. Propiedades termofísicas del agua

Calor específico C_p	4172.0 J/kg K a 30 °C
Densidad ρ_{agua}	995.6 kg/m ³ a 30 °C
Viscosidad μ	797.7 x 10 ⁻⁶ Pa·s

Características de los espejos

Como se mencionó en la sección 1.3 el DEFRAC es un concentrador solar de foco puntual, formado por tres grupos de 6 espejos cada uno, sumando el conjunto 18 espejos. Cada espejo es de 30 cm de diámetro y 1.9 cm de espesor. Los espejos concentran la radiación solar en la zona focal del concentrador que se localiza a 2.0 m de distancia del plano que soporta a los espejos. Para medir la energía radiativa reflejada por los espejos al receptor, se requiere conocer la reflectancia ρ de la superficie, en la sección 3.1 se presentó la medición del promedio de la reflectancia ρ de los espejos, la cual es de $\rho = 0.95$.

Factor de sombreado

El área total de captación de los espejos, es disminuida por la sombra que proyectan sobre algunos de éstos, los tres tirantes de las estructuras metálicas que soportan al receptor calorimétrico y las mangueras de enfriamiento del calorímetro (ver figura 1.2).

El área sombreada en los espejos, se midió por medio de la proyección de la estructura sobre los espejos, considerando que la forma en la que incide la radiación es perpendicular al plano principal del DEFRAC, y de esta manera se evalúa el área de cada sombra por espejo, sumando todas las áreas por grupo, como se presenta en la tabla 5.2, para esta medición existe un margen de error en la sombra, debido a que el grosor de las mangueras no puede estar completamente alineado al larguero. Considerando como el caso extremo cuando la manguera se encuentra a la mitad de los largueros, la sombra que forma esta configuración reduce el área efectiva que se muestra en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Factor de sombreado por grupo de espejos

Grupo	Número de espejos	Área total	Área efectiva	Factor de sombreado
A	6	0.424 m ²	0.404 m ²	0.93 ± 0.02
B	6	0.424 m ²	0.424 m ²	1.00
C	6	0.424 m ²	0.404 m ²	0.93 ± 0.02
Todos	18	1.272 m ²	1.231 m ²	0.95 ± 0.03

Cabe mencionar que debido a que el plano del marco principal permanece perpendicular al vector de posición del sol durante los experimentos, tanto la posición como las dimensiones de las sombras sobre los espejos permanecen también constantes durante toda la experimentación.

Posición de los termopares dentro del calorímetro

En la sección 4.1 se presentó con detalle la instrumentación del calorímetro, pero para tener una mejor comprensión de las lecturas descritas en este capítulo, es

conveniente presentar nuevamente un diagrama ilustrando las posiciones de los termopares en la pared interior de la cavidad. La figura 5.1 muestra la posición de cada uno de los termopares con respecto al eje z en milímetros por debajo del vértice del cono, en la tabla 5.3 se presentan sus valores.

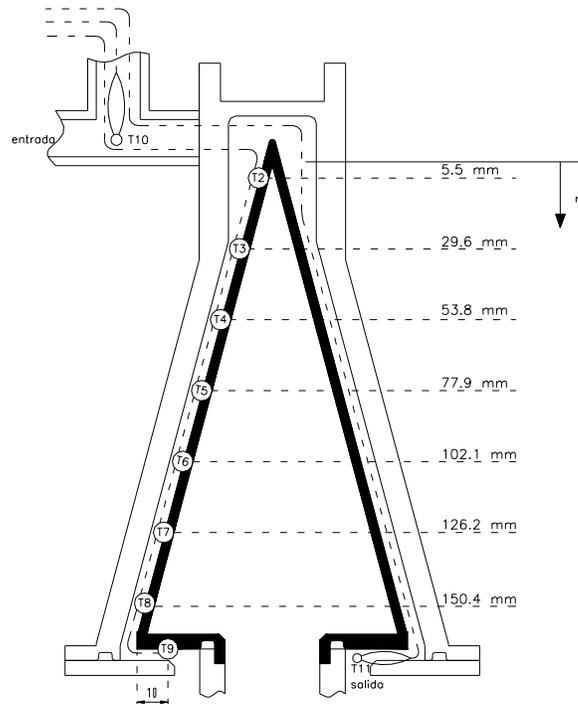


Figura 5.1. Distribución de los termopares a lo largo de la cavidad cónica.

Tabla 5.3. Posición en z de cada termopar

Termopar	Z (mm)
T2	5.5
T3	29.6
T4	53.8
T5	77.9
T6	102.1
T7	126.2
T8	150.4
T9	159.9 (al centro del baffle)

5.2 Resultados experimentales con el grupo A de espejos

Durante la corrida experimental realizada con el grupo de espejos A se efectuaron varias mediciones que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Medición del flujo másico del agua que pasa a través del calorímetro.
- Medición de la radiación incidente.

- c) Mediciones de las temperaturas en la pared interior del receptor.
- d) Medición de las temperaturas de entrada y salida del fluido de enfriamiento y de la temperatura ambiente.

Esta corrida experimental se realizó el día 5 de septiembre del 2002, iniciando el enfoque a las 12:34 p.m. y terminando a las 12:43 p.m.; es decir, una duración de 9 minutos. A continuación se presentan los resultados de estas mediciones.

Gasto volumétrico y temperatura ambiente

Para conocer la cantidad de energía que remueve el fluido de enfriamiento de la pared del receptor, se requiere medir la cantidad de masa que circula a través del calorímetro durante la corrida experimental, para ello se mide el gasto volumétrico del fluido de enfriamiento como se mencionó en la sección 4.3.

El promedio de los 6 tiempos de llenado de un volumen de 1.0 litros por el flujo de agua a la salida del calorímetro fue de $t = 37.86$ segundos con una desviación estándar $\sigma_t = 0.56$ segundos. Con estos datos se obtiene el flujo volumétrico y considerando que la densidad del agua es de $\rho = 1$ kg/l se calcula el flujo másico, estos valores aparecen en la tabla 5.3. La incertidumbre del flujo másico se determina usando la teoría de propagación de errores que se presenta en el apéndice A5. También en la tabla 5.4 aparece el valor promedio de la temperatura ambiente que se registró durante este experimento.

Tabla 5.4. Gasto másico y temperatura ambiente para el experimento con el grupo A de espejos.

gasto volumétrico en l/min	1.58 ± 0.03
gasto másico \dot{m} en kg/s	0.0264 ± 0.0005
Temperatura ambiente T_a en °C	25.3 ± 0.5

Radiación incidente

La radiación directa I_d fue medida durante la prueba experimental de manera continua con un pirheliómetro y la información de estas mediciones se almacenó en una base de datos a través del adquisidor, el cual se describió en la sección 4.1, con lecturas entre medición y medición cada dos segundos.

En la grafica de la figura 5.2, se observa el comportamiento a través del tiempo de la radiación directa I_d para esta experimentación. Se puede observar que durante toda la corrida el flujo radiativo permaneció relativamente constante, gracias a que durante esta experimentación se contaba con cielo despejado. La radiación directa I_d promediada durante la experimentación, considerando el tiempo en el que se inició con el enfoque de los espejos y terminando en el desenfoque, el promedio fue $I_d = 882.23 \pm 2.90$ W/m².

Temperaturas de pared del receptor

La medición de las diferentes temperaturas de pared del receptor cónico, se realizaron repetidamente a lo largo del experimento, éstas se hicieron con el

adquisidor de datos, para este experimentos el tiempo entre lectura y lectura de las mediciones fue de dos segundos.

También en la figura 5.2 se presentan las temperaturas de pared, donde se registraron cada una en los puntos señalados en las posiciones que se marca en el diagrama de la figura 5.1. En esta gráfica se puede observar que el tiempo de calentamiento fue de 1 minuto 58 segundos, esto es, el tiempo que tardan todos los puntos del receptor en tener una temperatura estacionario, mientras que el tiempo de enfriamiento, contado a partir del desenfoco del sistema fue de 2 minutos 18 segundos.

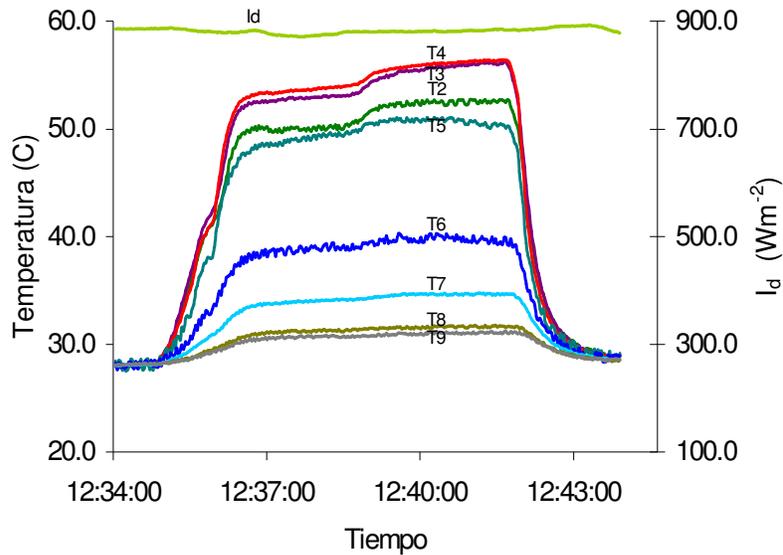


Figura 5.2. Distribución de temperaturas en la pared interior del cono durante la exposición, con el grupo de espejos A.

Cabe destacar que debido a la forma como se enfocan y desenfocan los espejos, como ya se mencionó en el capítulo 4, los tiempo de calentamiento y de enfriamiento del receptor, se encuentra afectados en gran medida por la destreza del enfoque y desenfoco del sistema, por lo que no se puede afirmar que estos tiempos sean los tiempos característicos o tiempos de respuesta del calorímetro.

Temperaturas del fluido

Las temperaturas de entrada y salida del fluido de enfriamiento, se tomaron de igual forma que las temperaturas de pared del receptor y el flujo radiativo, haciendo lecturas de cada una de las mediciones de manera repetida, con intervalos de dos segundos entre medición y medición.

Para determinar la potencia térmica removida por el fluido durante el estado estacionario, se requieren conocer las temperaturas del mismo tanto a la entrada como a la salida del calorímetro. Para ello se selecciona una sección de las mediciones de los termopares colocados en estos lugares, como se muestra en la figura 5.1, es decir, un tiempo mayor al tiempo que tardó el receptor en calentarse o bien enfriarse, con esto es razonable suponer que durante ese tiempo, el flujo

radiativo que incide en el receptor es igual al flujo de calor removido por el fluido de enfriamiento.

En la figura 5.3 se muestra el comportamiento de las temperaturas, tanto de entrada T_e como de salida T_s del flujo de enfriamiento para un lapso de tres minutos. En esta gráfica se observa la media aritmética de cada una de las temperaturas, $T_e = 28.4 \text{ }^\circ\text{C}$ y $T_s = 31.4 \text{ }^\circ\text{C}$. Se calcularon las desviaciones estándar para cada caso y se observa que para la temperatura de entrada es $\sigma_{T_e} = 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ y para la de salida es $\sigma_{T_s} = 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$. Por otra parte, la incertidumbre de los termopares tipo "T" está dentro de un rango de $\pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$. Como se observa en la gráfica esta banda de error enmarca mucho más del 68 % de los resultados para ambos casos, por lo que se puede afirmar que el comportamiento de las temperaturas de salida T_s a pesar de tener una pequeña variación, es constante en este lapso de tiempo.

Como se observa en la gráfica de la figura 5.3, el flujo a la salida del calorímetro tiene un comportamiento oscilatorio dentro de una banda de $\pm 0.26 \text{ }^\circ\text{C}$ mucho mayor a la oscilación de la temperatura a la entrada del calorímetro ($\pm 0.10 \text{ }^\circ\text{C}$), esta oscilación indica que el flujo es turbulento, que es de esperarse por la geometría irregular de la trayectoria del fluido dentro de éste, y por el calentamiento del fluido desde la pared del receptor cónico principalmente. También puede influir la instrumentación y la inclinación del calorímetro durante la experimentación.

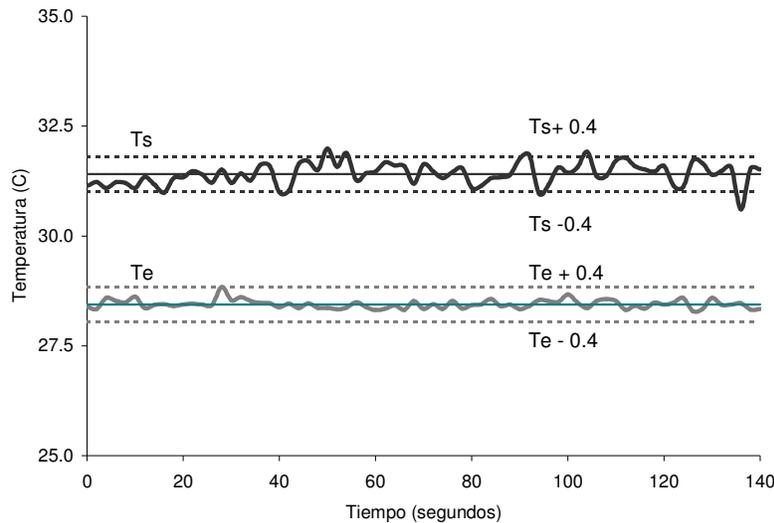


Figura 5.3. Temperaturas del flujo refrigerante en estado estacionario, para el experimento con el grupo de espejos A.

Considerando lo anterior, se pueden tomar como las temperaturas de entrada T_e y salida T_s del fluido las medias aritméticas como los valores representativos de las mediciones, tomando en cuenta a éstas como el valor central de las mediciones que se encuentra dentro de las respectivas bandas de error del instrumento. Por otra parte, por medio de propagación de errores (ver apéndice A5) se calcula la incertidumbre de la diferencia de temperaturas, estos resultados se presentan con

una cifra significativa en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Temperaturas del flujo de enfriamiento para el exp. con el grupo A

Temperatura de entrada (T_e)	$28.4 \pm 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$
Temperatura de salida (T_s)	$31.4 \pm 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$
$(T_s - T_e)$	$2.9 \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Mediciones de las temperaturas de pared en estado estacionario

En la figura 5.4 se presenta una ampliación de las mediciones de temperaturas que se mostraron anteriormente en la figura 5.2, para un lapso de tiempo de 2 minutos en los cuales éstas se mantienen prácticamente constantes. En esta gráfica se observa que el punto más caliente corresponde a T4 y muy próximo a éste el punto de T3, lo que indica que el lugar donde incide el centro de la distribución del flujo radiativo está alrededor de estos dos termopares.

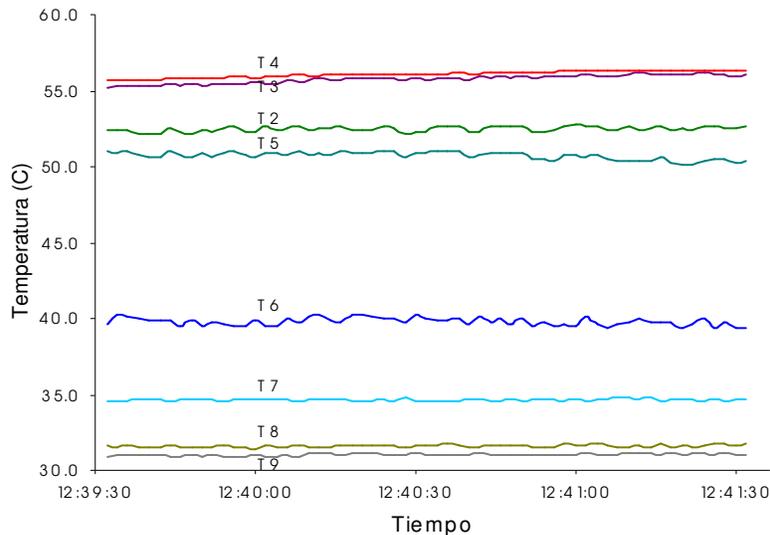


Figura 5.4. Mediciones a través del tiempo de las temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, para los experimentos con el grupo de espejos A.

Por otra parte en la figura 5.5 se presenta, en estado estacionario, la distribución de temperaturas de la pared interior del receptor; T2 – T8 distribuidos a lo largo del cono y T9 en el centro del baffle. En esta gráfica se muestra un perfil de cómo se distribuye la temperatura en el receptor, así como las temperaturas del fluido a la entrada y a la salida del calorímetro. Se puede observar que el punto con mayor temperatura corresponde al termopar T4, el cual se encuentra en la posición de 53.7 mm por debajo del vértice del cono y alcanza una temperatura de $56.7 \text{ } ^\circ\text{C}$. Por otra parte se observa que la región con la menor temperatura del receptor se localiza en la zona inferior del cono y el baffle, que son el punto T8 en la parte inferior del cono y el punto T9 que es el centro del baffle. Estos dos puntos se encuentran casi a la misma temperatura, $31.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ y $31.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ respectivamente. La temperatura de salida del fluido $T_s = 31.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ se encuentra en medio de estos dos

valores; dado que esta temperatura se encuentra dentro de la banda de error, se puede decir que en el fluido en este punto llegan a equilibrarse las temperaturas dentro de un rango de ± 0.8 °C, y esto permite suponer que no existen pérdidas convectivas significativas en esta zona.

También en esta gráfica se muestra la distribución del flujo radiativo Q_{in} que incide en la pared interior del receptor calculada como se describe en la sección 2.6. En ésta distribución se observa que el punto con el valor más alto se encuentra a 60.3 mm por debajo del vértice, es decir, este punto está en medio de los termopares T3 y T4, coincidiendo con la zona donde se registraron las temperaturas más elevadas. La distribución de la temperatura tiene un comportamiento más homogéneo en comparación con la distribución del flujo radiativo, en gran parte por la difusión de calor a lo largo de la pared del receptor, y por el flujo de calor convectivo en la parte interna de la pared por el flujo de agua en sentido hacia la parte inferior del receptor.

Desde el punto de vista cualitativo, es congruente que el máximo de la distribución del flujo radiativo coincida con el máximo de la distribución de temperatura de la pared. Por otra parte, es razonable pensar que debido a la conductividad térmica de la pared del receptor y la convección en el interior de receptor, la distribución de temperaturas es menos pronunciada que la distribución de radiación, Además si se considera que la cantidad de masa se incrementa conforme se baja a lo largo del cono, esto hace que la forma de la distribución de temperaturas sea mayor en parte superior del cono, si se invirtiera el sentido del flujo de agua podría esperarse que las temperaturas de pared en la parte inferior de la pared fueran ligeramente más bajas.

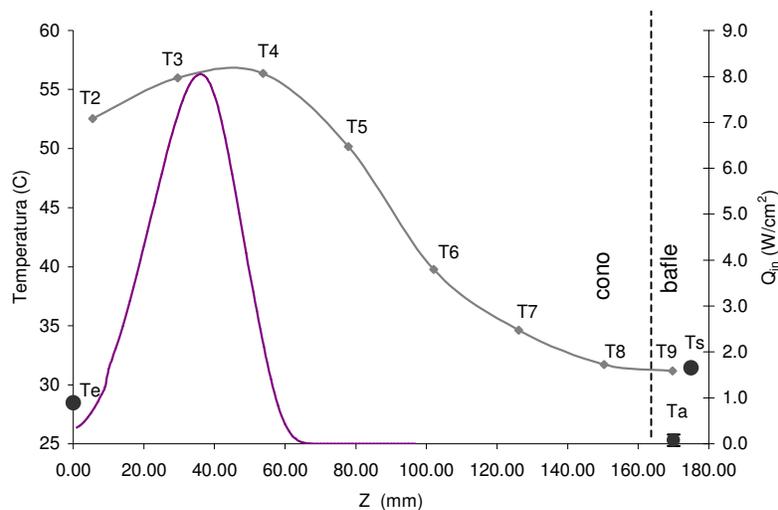


Figura 5.5. Distribución de temperaturas a lo largo del eje Z en la pared interior del receptor para el estado estacionario, durante la experimentación con el grupo de espejos A.

Por otra parte se observa en esta gráfica que la temperatura ambiente durante la experimentación $T_a = 25.3$ °C se encuentra por debajo de todas las temperaturas de la experimentación incluso de la temperatura de entrada al calorímetro $T_e =$

28.4 °C, con lo que se puede suponer que existe alguna ganancia de calor a través de las mangueras de entrada al calorímetro.

5.3 Resultados experimentales con el grupo B de espejos

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas efectuadas con el grupo de espejos B realizadas el día 5 de septiembre del 2002, iniciando las pruebas a las 12:49 p.m., con el enfoque de los espejos y terminando a las 1:02 p.m., con lo cual el experimento tuvo una duración de 13 minutos.

Radiación incidente

La radiación directa I_d para la corrida experimental con el grupo de espejos B, tuvo los niveles de un día con cielo despejado, pero a media experimentación se presentó una pequeña perturbación en el flujo radiativo, producto del paso de una pequeña nube, esto se puede observar en la gráfica de la figura 5.7. Allí puede verse que el flujo radiativo I_d presenta a las 12:54:30 horas una disminución desde 870 W/m² hasta valores de 631 W/m², tendiendo otros dos incrementos interrupciones menores posteriores a esta última, hasta que se estabiliza a sus valores normales. En esta prueba se obtuvo un promedio de radiación directa incidente de $I_d = 867.87 \pm 12.23$ W/m².

Temperaturas de pared del receptor

También en la figura 5.6 se presentan las temperaturas a lo largo de la pared del receptor como se señala en el diagrama de la figura 5.1. En esta gráfica se puede observar que el tiempo de calentamiento fue de 1 minuto 28 segundos, esto es, el tiempo que tardan todos los puntos del receptor en tener una temperatura constante, mientras que el tiempo de enfriamiento, contado a partir del desenfoque del sistema fue de 1 minutos 52 segundos.

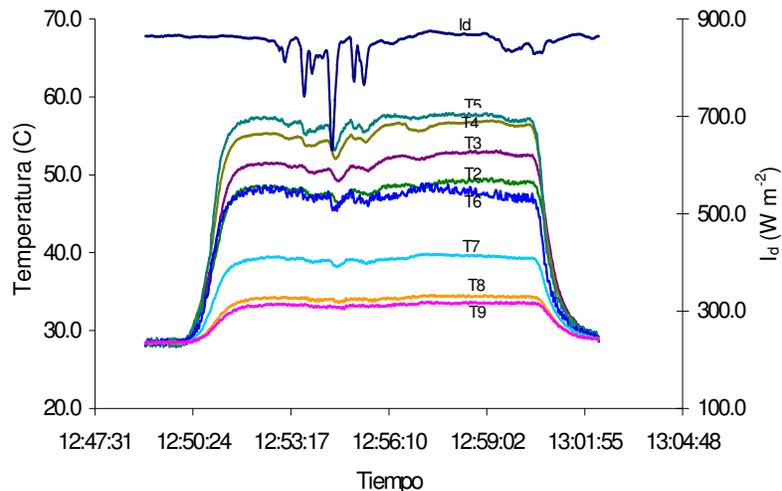


Figura 5.6. Distribución de temperaturas en la pared interior del cono durante toda la exposición, con el grupo de espejos B.

También en esta gráfica se observa como las temperaturas sufren una variación al modificarse el flujo radiativo incidente I_d . La perturbación en el I_d permite observar la sensibilidad del calorímetro. La figura 5.7 es una ampliación de la grafica de la figura 5.6, allí se observa que los puntos que fueron más sensibles a este cambio en I_d fueron los termopares T2, T3, T4 y T5, siendo este último el que presentó una mayor sensibilidad a las perturbaciones en la radiación, como se observará más adelante en la figura 5.10, la temperatura máxima se tiene en la posición del termopar T5, donde coincide con el máximo de la distribución de flujo radiativo.

También se observa en la figura 5.8 que solamente para el termopar T5, el comportamiento es muy similar al del flujo radiativo, para el resto de los puntos, existe un una disminución en la influencia del flujo de calor para el resto de los termopares, debido a la conducción térmica a lo largo de la pared.

Gasto volumétrico y temperatura ambiente

En forma similar a lo descrito en la sección 5.2, se obtuvieron los valores del gasto volumétrico, del gasto másico y de la temperatura ambiente para este experimento con el grupo de espejos B. La tabla 5.6 presenta los valores y sus incertidumbres.

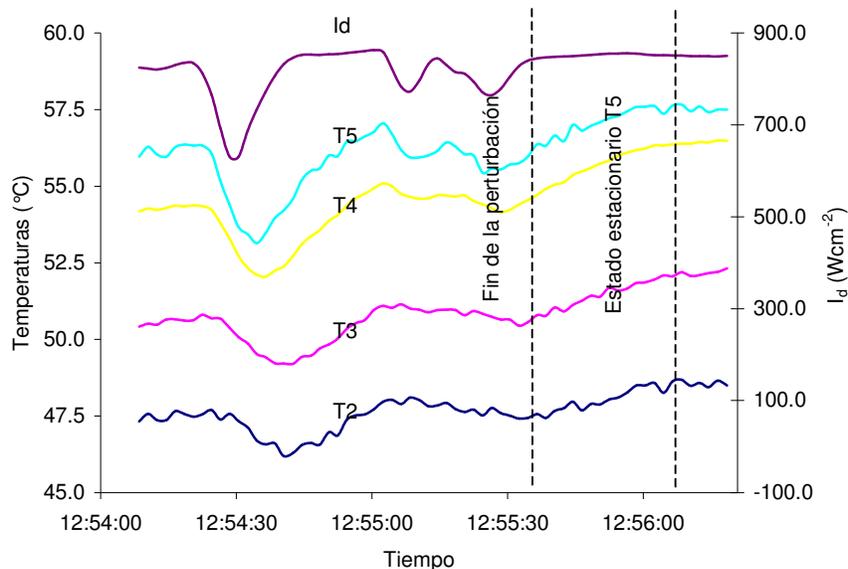


Figura 5.7. Gráfica que muestra la perturbación en el flujo radiativo y el tiempo de respuesta para los puntos más altos del receptor cónico.

Tabla 5.6. Gasto másico para el experimento con el grupo B

Gasto volumétrico en l/min	0.875 ± 0.0238
Gasto másico \dot{m} en kg/s	0.0146 ± 0.0004
Temperatura ambiente T_a en $^{\circ}\text{C}$	25.6 ± 0.70

Temperaturas del fluido

La figura 5.8 muestra el comportamiento de las temperaturas de entrada T_e y salida T_s del fluido de enfriamiento, en un lapso de 144 segundos. También se muestra la media aritmética de cada una de las temperaturas, $T_e = 28.7^{\circ}\text{C}$ y $T_s = 34.6^{\circ}\text{C}$ y la banda de error producto de la incertidumbre del termopares tipo "T" de $\pm 0.4^{\circ}$; ver la tabla 5.7. Se calcularon las desviaciones estándar para cada caso, las cuales fueron $\sigma_{T_e} = 0.17^{\circ}\text{C}$ y $\sigma_{T_s} = 0.90^{\circ}\text{C}$. Para el caso de T_e esta banda de error enmarca más del 68 % de los resultados, pero para el caso de T_s solamente enmarca el 31% de las mediciones. Esta última temperatura presenta un comportamiento oscilatorio muy intenso, que pareciera ser producto, como en el experimento anterior, de la existencia de flujo en régimen turbulento. Pero justamente como el flujo de fluidos es turbulento, se puede tomar la media aritmética como una medida representativa de la temperatura del fluido.

Las perturbaciones en la temperatura de entrada del calorímetro, a los 44 y 80 segundos de haber iniciado el experimento, hace suponer que no existe un control muy estricto en el flujo másico que pasa a través del calorímetro, por lo que se sugiere hacer una medición de este flujo de manera continua antes de la entrada.

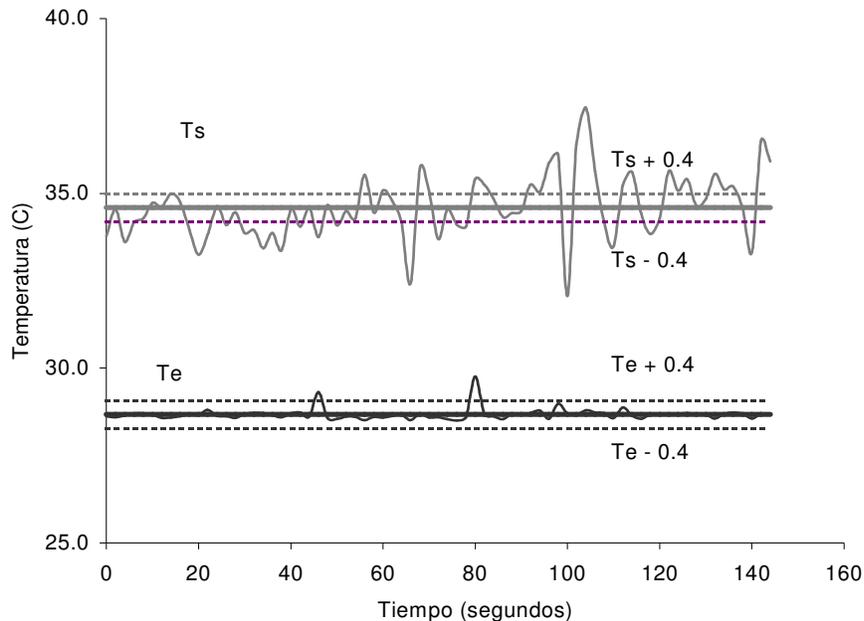


Figura 5.8. Temperaturas del flujo de enfriamiento en estado estacionario, para el experimento con el grupo de espejos B.

Tabla 5.7. Temperaturas del flujo de enfriamiento para el exp. con el grupo B

Temperatura de entrada (T_e) en °C	28.67 ± 0.40
Temperatura de salida (T_s) en °C	34.60 ± 0.40
$(T_s - T_e)$ en °C	5.93 ± 0.57

Mediciones de las temperaturas de pared en estado estacionario

En la figura 5.9 se presenta el estado estacionario de las temperaturas en la pared del receptor, se observa que la temperatura más elevada corresponde al termopar T5, próximo a este se encuentra el termopar T4. Se observa también que el termopar en el punto T6 es el que presenta más oscilaciones en su lectura, con una desviación estándar de $\sigma = 0.51$ °C. La temperatura baja significativamente entre los termopares T6 y T7. Por último, se observa que los puntos T8 y T9 que se encuentran en el extremo del receptor presentan las temperaturas más bajas y los valores de temperaturas de estos dos puntos son muy próximos.

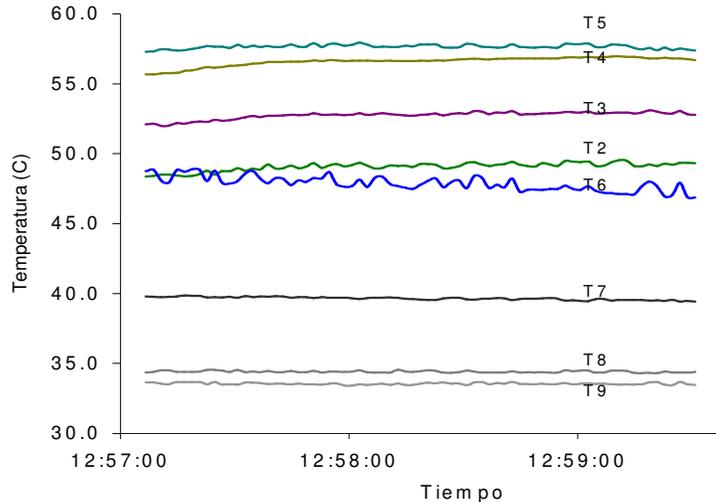


Figura 5.9. Mediciones a través del tiempo de las temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, con el grupo de espejos B.

La figura 5.10 presenta la distribución de temperaturas en la pared interior del receptor en estado estacionario, donde los termopares de las posiciones T2 – T8 están distribuidos a lo largo del cono y T9 se encuentra situado en el centro del baffle. También se presentan las temperaturas del fluido a la entrada y a la salida del calorímetro. Se observa que el termopar T5 ubicado a 77.9 mm por debajo del vértice del cono tiene la temperatura mayor con un valor de 57.58 °C. También se observa que la región con la menor temperatura del receptor, se localiza en la zona inferior del cono y el baffle, que corresponden al punto T8 en la parte inferior del cono y al punto T9 que es el centro del baffle; estos dos puntos se encuentran casi a la misma temperatura, 34.3 °C y 33.0 °C respectivamente. La temperatura de salida del fluido $T_s = 34.6$ °C se encuentra ligeramente por encima de esas dos temperaturas, esta diferencia entre el fluido y la temperatura de pared del baffle, indica que el fluido logra remover tal cantidad de calor a lo largo del cono que para cuando llega a esta zona, es el fluido el que transfiere calor a la pared del receptor,

esto indica que se puede aumentar el flujo másico de tal forma que disminuya la temperatura a la salida del calorímetro, haciendo con esto más eficiente la remoción de calor.

Por otra parte, en esta gráfica también se muestra la distribución del flujo radiativo Q_{in} que incide en la pared interior del receptor. En esta distribución se observa que el punto con el valor más alto de la distribución se encuentra a 78.3 mm por debajo del vértice, es decir este punto se encuentra en la posición del termopar T5, coincidiendo con la zona donde se registraron las temperaturas más elevadas. Lo que se observa aquí es análogo a lo observado con el grupo de espejos A. Se esperaba una concordancia mayor entre las dos distribuciones, esta solo se produjo en la región de los máximos valores.

Nuevamente al igual que el caso del grupo de espejos A, el máximo de la distribución del flujo radiativo obtenido por la simulación numérica coincide con el máximo de la distribución de temperaturas y la distribución de temperaturas es más homogénea como se explicó en ese caso.

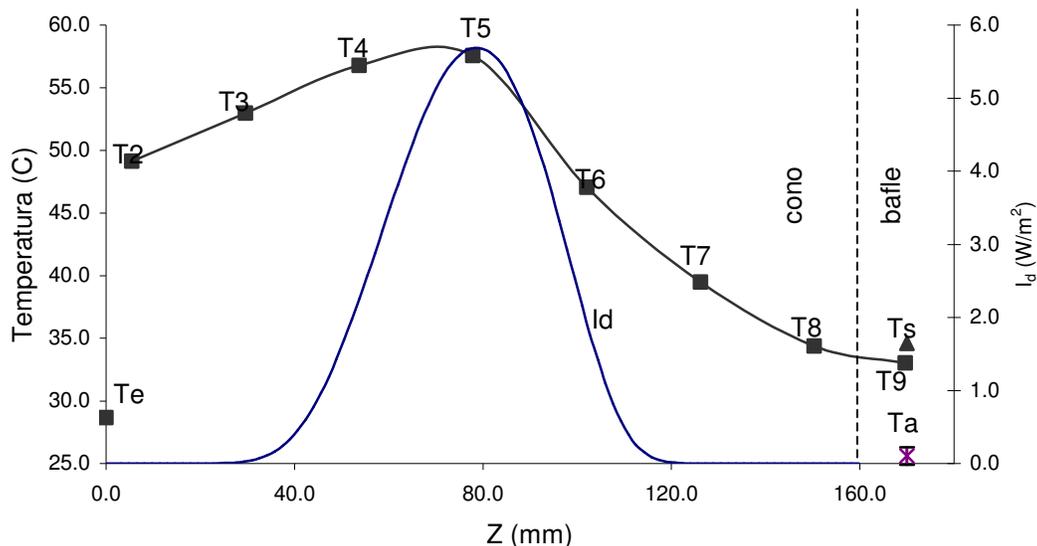


Figura 5.10. Distribución de temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, para el experimento con el grupo de espejos B.

5.4 Resultados experimentales con el grupo C de espejos

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos durante la corrida con el grupo de espejos C, la cual se realizó el día 1 de octubre del 2002, iniciando el enfoque a la 1:47 p.m. y terminando con el desenfoco del sistema, a la 1:59 p.m., teniendo una duración de 12 minutos.

Radiación incidente

La radiación directa I_d promediada durante la experimentación, considerando el tiempo en el que se inició con el enfoque de los espejos y terminando en el desenfoco, el promedio fue $I_d = 852.73 \pm 5.56 \text{ W/m}^2$. En la figura 5.11 se observa que durante toda la corrida el flujo radiativo permaneció prácticamente constante.

Temperaturas de pared del receptor

En la figura 5.11 se presentan las lecturas de las temperaturas de pared, para la experimentación con el grupo de espejos C. En esta gráfica se observa como las temperaturas de los diferentes puntos de la pared del receptor permanecen constantes durante un lapso mayor a 3 minutos, siendo de nueva cuenta el termopar T5 el que alcanzó la temperatura más alta de $36.7 \text{ }^\circ\text{C}$, este punto se encuentra a 77.9 mm por debajo del vértice del cono.

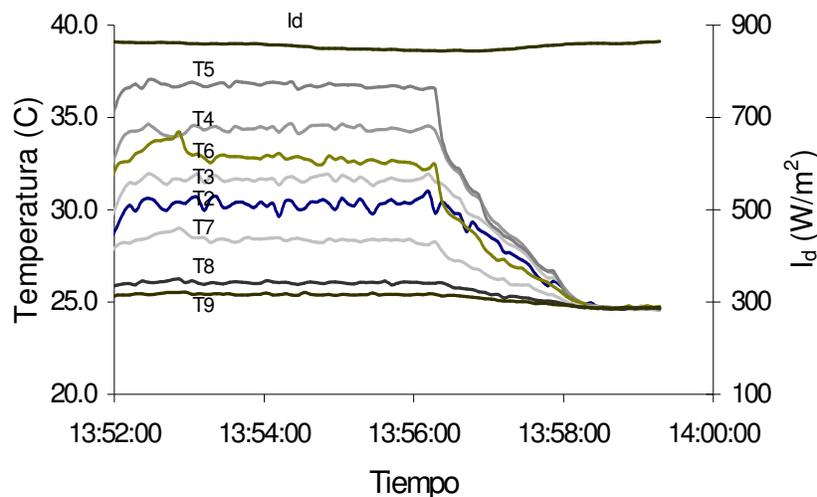


Figura 5.11. Historias de temperaturas en la pared interior del cono durante toda la exposición, con el grupo de espejos C.

Gasto volumétrico y temperatura ambiente

En forma similar a las secciones 5.2 y 5.3, se obtuvieron los valores del gasto volumétrico, del gasto másico y de la temperatura ambiente para este experimento con el grupo de espejos C. La tabla 5.8 presenta los valores y sus incertidumbres.

Tabla 5.8. Gasto másico y temperatura ambiente para el experimento con el grupo C de espejos.

gasto volumétrico en l/min	2.901 ± 0.046
gasto másico m en kg/s	0.0484 ± 0.0008
Temperatura ambiente T_a en $^\circ\text{C}$	30.0 ± 0.3

Temperaturas de entrada y salida del fluido

La figura 5.12 muestra el comportamiento de las temperaturas de entrada T_e y de salida T_s del agua, en un lapso de 130 segundos. También se muestra en la gráfica la media aritmética de cada una de las temperaturas que fueron $T_e = 24.7$ °C y $T_s = 26.5$ °C y la banda de error producto de la incertidumbre del termopares tipo "T" de ± 0.40 °C. Por otra parte, se calcularon las desviaciones estándar para cada caso, las cuales fueron $\sigma_{T_e} = 0.06$ °C y $\sigma_{T_s} = 0.66$ °C. Se observa en la gráfica para T_e la banda de error enmarca la totalidad de los resultados, pero para el caso de T_s solamente el 23% de las mediciones quedaron dentro de esta banda, esta última medición presenta un comportamiento oscilatorio muy intenso, producto, como en los dos experimentos anteriores, de la existencia de flujo en régimen turbulento. La tabla 5.9 presenta las temperaturas T_e y T_s del fluido de enfriamiento y su diferencia para este experimento.

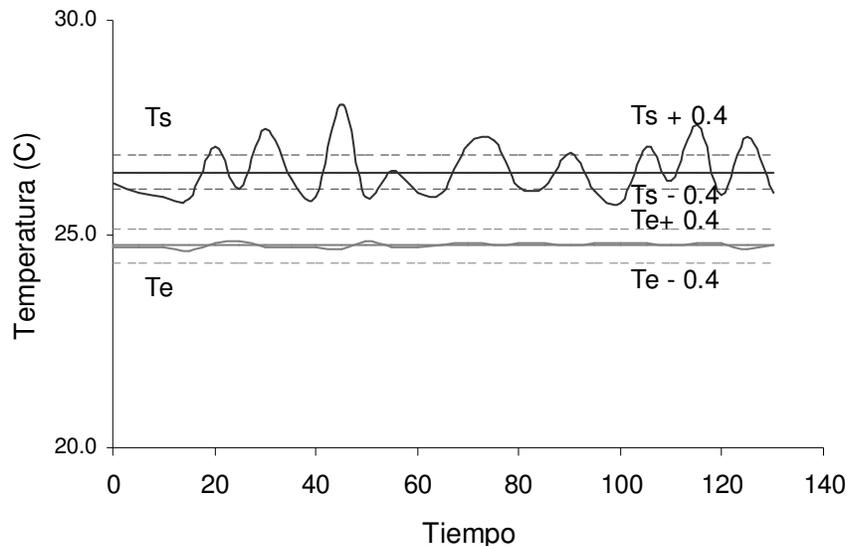


Figura 5.12. Historia de temperaturas del fluido refrigerante en estado estacionario, con el grupo de espejos C.

Tabla 5.9. Temperaturas del fluido de enfriamiento para el experimento con el grupo de espejos C.

Temperatura de entrada (T_e) en °C	24.7 ± 0.40
Temperatura de salida (T_s) en °C	26.3 ± 0.40
$(T_s - T_e)$ en °C	1.7 ± 0.57

Mediciones de las temperaturas de pared en estado estacionario

La figura 5.13 presenta para un lapso de tiempo de 2 minutos, el estado estacionario de las temperaturas en la pared del receptor, se observa que la temperatura más elevada corresponde al termopar T5 cuyo valor medio es de 35.9 °C.

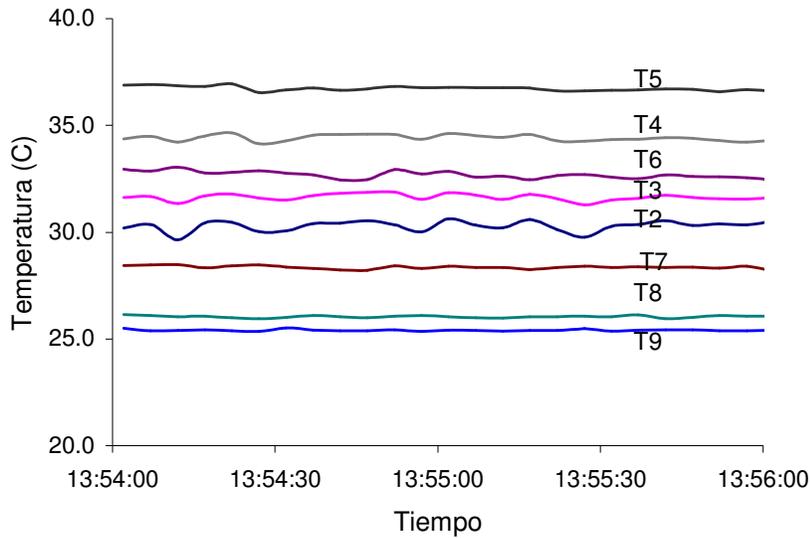


Figura 5.13. Mediciones a través del tiempo de las temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, con el grupo de espejos C.

La figura 5.14 presenta la distribución de temperaturas en la pared interior del receptor en estado estacionario, así como las temperaturas del fluido a la entrada y a la salida del calorímetro. Se observa, como ya se mencionó, que el punto con mayor temperatura corresponde al termopar T5 ubicado a 77.9 mm por debajo del vértice del cono y alcanzando una temperatura de 35.9 °C. Al igual que los caso anteriores la región con menores temperaturas corresponden a la parte inferior del receptor; termopares T8 y T9, estos dos puntos se encuentran casi a la misma temperatura, 25.9 °C y 25.4 °C respectivamente.

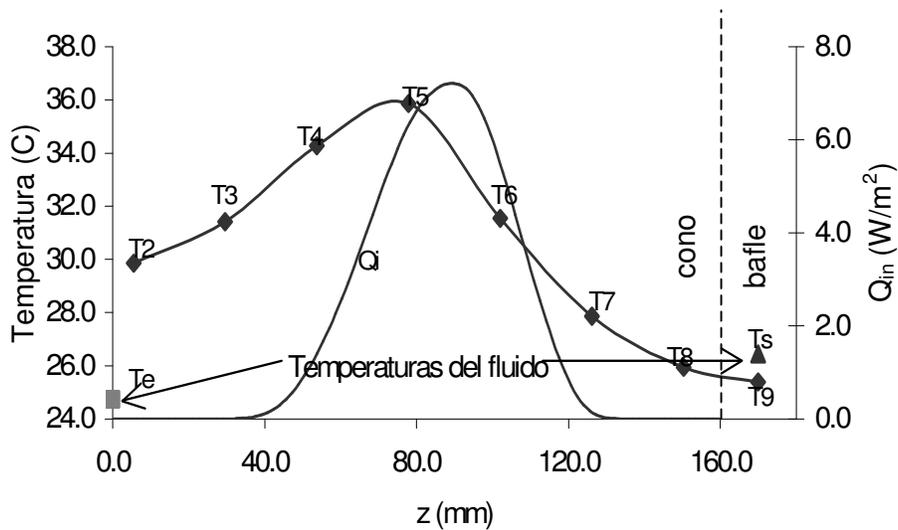


Figura 5.14. Distribución de temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, con el grupo de espejos C.

Por otra parte la temperatura de salida del fluido $T_s = 26.5 \text{ }^\circ\text{C}$ se encuentra ligeramente por encima de las temperaturas de los termopares T8 y T9, por lo que hace suponer que la remoción de calor de calor a lo largo del cono fue tan buena, que para cuando el fluido llega a estos puntos, en lugar que las paredes calienten al fluido, es el fluido quien trasfiere calor a las paredes, con lo que se puede incrementar el flujo másico para reducir la temperatura a la salida y con ello aumentar la eficiencia de remoción de calor.

También en ésta gráfica se muestra la distribución del flujo radiativo Q_{in} que incide en la pared interior del receptor. En ésta distribución se observa, en forma similar a los casos anteriores, que el punto con el valor más alto de la distribución se encuentra a 89.7 mm por debajo del vértice, es decir, este punto se encuentra cercano al termopar T5. Lo que se observa aquí es análogo a lo observado con los grupos de espejos A y B. Se esperaba una concordancia mayor entre las dos distribuciones, pero ésta sólo se produjo en la región de los máximos valores, por ello se requieren estudios más profundos que permitan explicar este desacoplamiento entre las dos distribuciones.

5.5 Resultados experimentales para los 18 espejos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con la experimentación realizada con los 18 espejos del DEFAC, la cual se realizó el día 1 de octubre del 2002, iniciando el enfoque a las 2:57 p.m. y terminando a las 3:07 p.m., ésta corrida tuvo una duración de 10 minutos. Es importante señalar que esta es la primera vez que se puede experimentar con la concentración de la energía solar producida por los 18 espejos del DEFAC y que el calorímetro de cavidad fue expresamente construido con este propósito.

Radiación incidente

La radiación directa I_d durante la corrida experimental, fue la de un día con cielo despejado, siendo la radiación directa promedio de $I_d = 816.86 \pm 7.38 \text{ W/m}^2$. Esta medición se puede observar en la figura 5.15, donde se muestra la gráfica de la radiación a través del tiempo, en ella se puede observar que durante la corrida, el flujo radiativo I_d permaneció prácticamente constante.

Temperaturas de pared del receptor

Similarmente a los casos anteriores, en la figura 5.15 se presentan las lecturas de las temperaturas de pared, para la experimentación con los 18 espejos del DEFAC. En esta gráfica se puede observar que el tiempo de calentamiento de la pared interna del receptor, para esta corrida, fue de 2 minutos y 55 segundos. También en esta gráfica se observa como las temperaturas de los diferentes puntos de la pared del receptor permanecen constantes durante un lapso mayor a 3 minutos.

Cabe destacar que debido a la forma como se enfocan y desenfocan los espejos, como ya se mencionó en el capítulo 4, el tiempo de calentamiento se encuentra afectado en gran medida por la destreza de enfoque de los espejos.

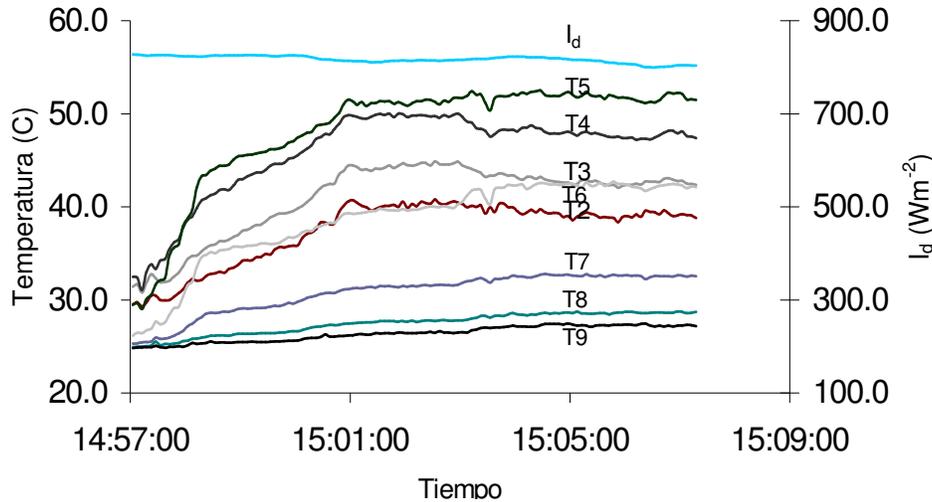


Figura 5.15. Distribución de temperaturas en la pared interior del cono durante toda la exposición, con todos los espejos.

Gasto volumétrico y temperatura ambiente

En forma similar a las secciones anteriores, se obtuvieron los valores del gasto volumétrico, del gasto másico y de la temperatura ambiente para este experimento con el grupo de los 18 espejos. La tabla 5.10 presenta los valores y sus incertidumbres.

Tabla 5.10. Gasto másico y temperatura ambiente para el experimento con el grupo de los 18 espejos

Gasto volumétrico en l/min	2.590 ± 0.048
Gasto másico m en kg/s	0.0432 ± 0.0008
Temperatura ambiente T_a en °C	29.9 ± 0.32

Temperaturas de entrada y salida del fluido

La figura 5.16 muestra el comportamiento de las temperaturas de entrada T_e y de salida T_s del agua, para un lapso de 240 segundos. También se muestra en la gráfica la media aritmética de cada una de las temperaturas que fueron $T_e = 24.8$ °C y $T_s = 29.9$ °C y la banda de error producto de la incertidumbre del termopares tipo "T" de ± 0.40 °C. Por otra parte, se calcularon las desviaciones estándar para cada caso, las cuales fueron $\sigma_{T_e} = 0.05$ °C y $\sigma_{T_s} = 0.49$ °C. Se observa en la gráfica que para T_e la banda de error enmarca la totalidad de los resultados, pero para el caso de T_s solamente el 22.4 % de las mediciones quedaron dentro de esta banda. T_s presenta un comportamiento oscilatorio intenso, producto, como en los tres experimentos anteriores, de la existencia de flujo en régimen turbulento.

Como el flujo de fluidos es turbulento, se puede tomar la media aritmética como una medida representativa de la temperatura del fluido. La tabla 5.11 presenta las temperaturas T_e y T_s del fluido de enfriamiento y su diferencia para este experimento.

Tabla 5.11. Temperaturas del flujo de enfriamiento para el experimento con todos los espejos

Temperatura de entrada (T_e) en °C	24.8 ± 0.40
Temperatura de salida (T_s) en °C	29.9 ± 0.40
$(T_s - T_e)$ en °C	5.1 ± 0.57

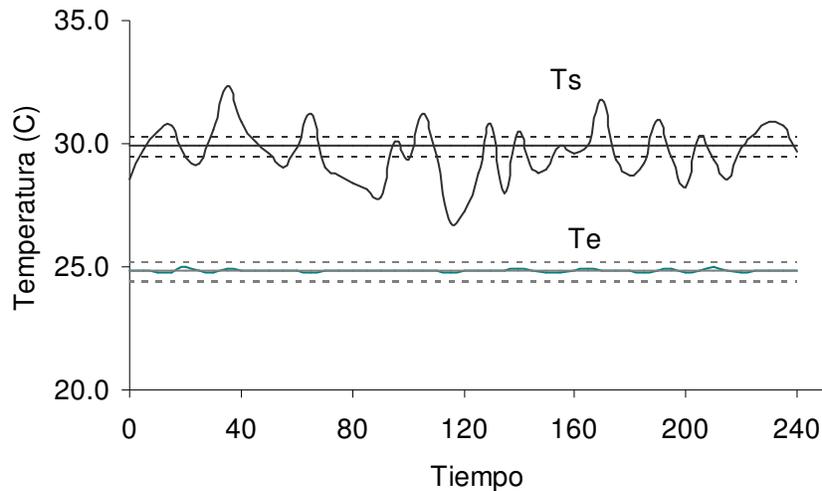


Figura 5.16. Distribución de temperaturas del flujo refrigerante en estado estacionario, con todos los espejos.

Mediciones de las temperaturas de pared en estado estacionario

La figura 5.17 presenta para un lapso de tiempo de 4 minutos, el estado estacionario de las temperaturas en la pared del receptor, se observa que la temperatura más elevada corresponde al termopar T5 cuyo valor medio es de 51.1 °C.

La figura 5.18 presenta la distribución de temperaturas en la pared interior del receptor en estado estacionario, así como las temperaturas del fluido a la entrada y a la salida del calorímetro. Se observa, como ya se mencionó, que el punto con mayor temperatura corresponde al termopar T5 ubicado a 77.9 mm por debajo del vértice del cono y alcanzando una temperatura de 51.1 °C. Al igual que los casos anteriores la región con menores temperaturas corresponden a la parte inferior del receptor; termopares T8 y T9. Estos dos puntos se encuentran casi a la misma temperatura 27.7 °C respectivamente. La temperatura de salida del fluido $T_s = 29.9$ °C se encuentra ligeramente por encima de estas dos temperaturas, por lo que se podría pensar, como en los casos anteriores, que después del centro del baffle (T9) existe una zona que sigue aportando calor, suponemos debido a la radiación que pega en esta zona por el desenfoque de los espejos.

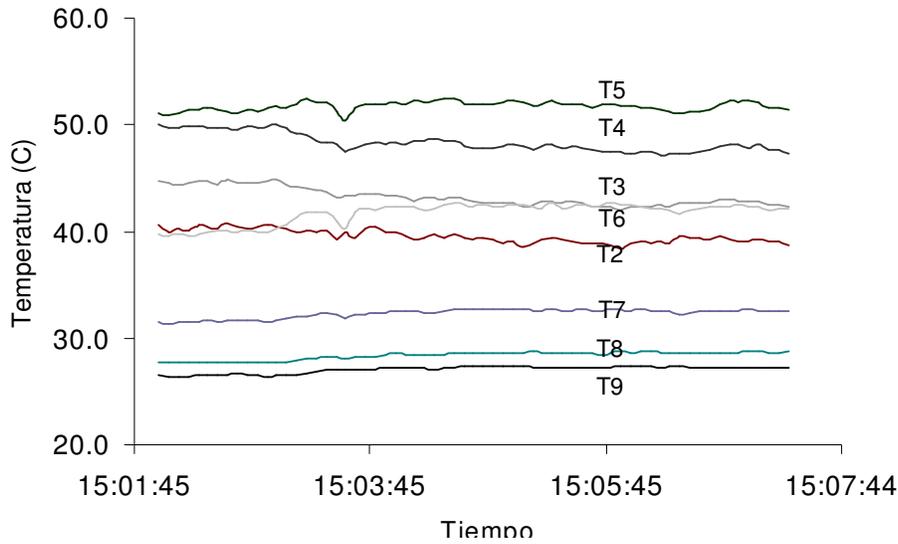


Figura 5.17. Mediciones a través del tiempo de las temperaturas en la pared interior del cono en estado estacionario, con todos los espejos.

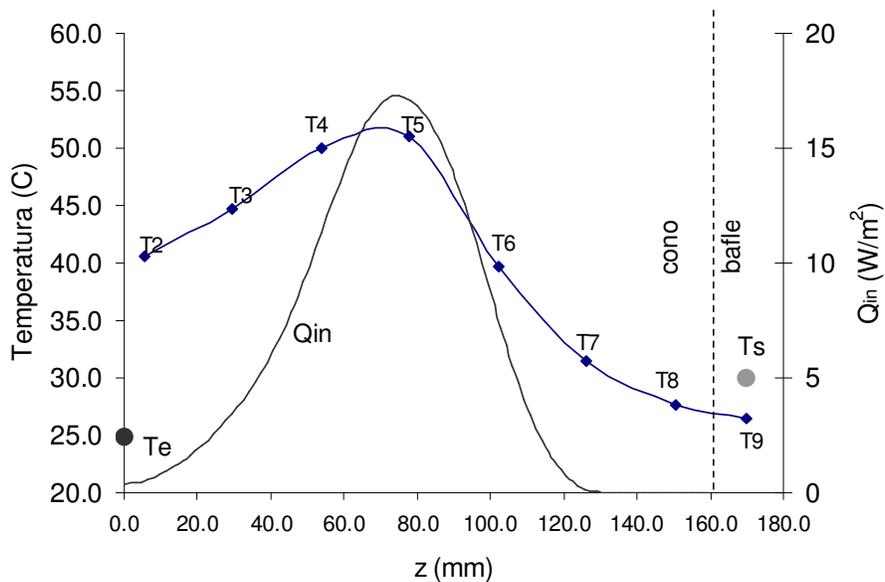


Figura 5.18. Distribución de temperaturas a lo largo del eje Z en la pared interior del receptor en estado estacionario, para el exp. con los 18 espejos.

A 95 segundos de haber iniciado el experimento (15:03:32) existió una pequeña perturbación en la distribución de temperaturas, que se observa claramente en la lectura de los termopares T5 y T6. Esta perturbación se atribuye a un problema en el seguimiento del concentrador no así a la radiación incidente debido a que esta permaneció constante durante todo el experimento.

También en esta gráfica se muestra la distribución del flujo radiativo Q_{in} que incide en la pared interior del receptor. En esta distribución se observa, en forma similar a los casos anteriores, que el punto con el valor más alto de la distribución se

encuentra a 75.0 mm por debajo del vértice, es decir, este punto se encuentra muy cercano al termopar T5. Lo que se observa aquí es análogo a lo observado con los grupos de espejos A, B y C. Se esperaba una concordancia mayor entre las dos distribuciones, pero esta solo se produjo en la región de los máximos valores, por ello se requieren estudios más profundos que permitan explicar este desacoplamiento entre las dos distribuciones.

5.6 Potencia de concentración del DEFRAC y eficiencia térmica de la cavidad

Potencia de concentración

Conociendo las propiedades termofísicas del fluido de enfriamiento, en especial su calor específico, teniendo la relación de la masa que circuló por unidad de tiempo a través del calorímetro y conociendo el incremento de temperaturas entre la entrada y la salida, se puede calcular la cantidad de calor que se remueve del receptor por medio de,

$$Q_c = mC_p (T_s - T_e) \quad (5.1)$$

El cálculo de la incertidumbre de la potencia removida por el fluido se realizó tomando en cuenta la incertidumbre en la medición del flujo másico m , el incremento de temperaturas ΔT , y el procedimiento descrito en el apéndice A5.

Si se supone que las pérdidas convectivas del receptor con el medio ambiente son tan pequeñas que se pueden despreciar, entonces la potencia incidente en el receptor Q_{in} se puede calcular de manera calorimétrica, esto es, consideramos que toda la energía absorbida por el receptor es la misma energía que se remueve por el fluido en el interior de calorímetro. Y si además suponemos como correcta la absorptancia de la cavidad calculada durante el diseño cuyo valor fue de 0.98, entonces

$$[Q_{in}]_{\text{calorimétrica}} = \frac{Q_c}{\alpha_a} \quad (5.2)$$

En la tabla 5.12 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para los cuatro experimentos, así como los valores calculados de Q_c y $[Q_{in}]_{\text{calorimétrica}}$

Por otra parte, como se conoce el valor del flujo radiativo directo I_d que incide durante el experimento, se puede calcular la potencia incidente Q_{in} a través de,

$$Q_{in} = \rho_e \cdot FAI_d \quad (5.3)$$

donde I_d es el flujo radiativo, A es el área de captación, F es el factor de sombreado y ρ_e es la reflectancia de los espejos. En la tabla 5.13 se muestran los resultados de este cálculo.

Tabla 5.12. Valores promedios de parámetros registrados en la experimentación para el cálculo de la potencia removida por el fluido en los experimentos.

Parámetros	Grupo A	grupo B	grupo C	18 espejos
Flujo másico, \dot{m} (kg/min)	1.585 ± 0.028	0.875 ± 0.024	2.901 ± 0.046	2.590 ± 0.048
Temperatura de entrada, T_e (°C)	28.4 ± 0.4	28.7 ± 0.4	24.7 ± 0.4	24.8 ± 0.4
Temperatura de salida, T_s (°C)	31.4 ± 0.4	34.6 ± 0.4	26.5 ± 0.4	29.9 ± 0.4
Diferencia, $T_s - T_e$ (°C)	2.9 ± 0.6	5.9 ± 0.6	1.7 ± 0.6	5.1 ± 0.6
Potencia removida Q_c (W)	327.6 ± 62.75	332.4 ± 35.9	313.2 ± 114.5	922.1 ± 103.5
Potencia incidente $[Q_{in}]_{\text{calorimétrica}}$ (W)	330.9 ± 63.38	365.0 ± 36.2	349.9 ± 115.7	931.4 ± 104.6
% de incertidumbre	19.2 %	9.9 %	33.0 %	11.2 %

La incertidumbre de la medición de la potencia incidente $[Q_{in}]_{\text{calorimétrica}}$ resulta ser muy grande para los experimentos A y C, no así para los experimentos con el grupo de espejos B y C.

Tabla 5.13. Resumen de valores de radiación incidente para los experimentos.

Parámetros	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Todos
Flujo radiativo, I_d (Wm^{-2})	882.23 ± 2.90	867.87 ± 12.23	852.73 ± 5.56	816.86 ± 7.38
Área, A (m^2)	0.424	0.424	0.424	1.272
Factor de sombreado, F	0.95 - 0.2	1.00	0.95 - 0.02	0.97 - 0.03
Potencia incidente Q_{in} (W)	337.69 ± 7.19	349.67 ± 4.93	326.39 ± 7.18	957.74 ± 30.81

Para efectos de comparación, la tabla 5.14 presenta, para cada experimento, los valores de la potencia incidente Q_{in} obtenidos calorimétricamente (ecuación 5.2), los obtenidos con la radiación directa (ecuación 5.3) y su diferencia. Como se puede observar en esta tabla, el experimento con el grupo de espejos C fue el que presentó la mayor diferencia. Esto se podría explicar si se considera que este mismo grupo fue el que presentó las incertidumbres más altas en las mediciones realizadas de los cuatro experimentos. Por otro lado, la menor diferencia se obtuvo para el grupo A de espejos, seguida y con un valor comparable, por el grupo de los 18 espejos.

Tabla 5.14. Tabla comparativa de la potencia incidente Q_{in} , evaluado por calorimetría y por flujo radiativo.

Potencia incidente Q_{in}	Grupo A (W)	Grupo B (W)	Grupo C (W)	18 espejos (W)
Calorimetría	330.92 ± 63.38	365.03 ± 36.23	349.89 ± 115.66	931.44 ± 104.56
Flujo radiativo	337.69 ± 7.19	349.67 ± 4.93	326.39 ± 7.18	957.74 ± 30.81
% de error	2.00%	4.39%	7.20%	2.75%

Como se puede observar en la tabla 5.10, el experimento con el grupo de espejos C fue el que presentó el mayor error, pero es este mismo que producto de sus incertidumbres en la medición del flujo másico y de las temperaturas que fueron a su vez las más altas de las cuatro experimentaciones.

Eficiencia de absorción

Se define la eficiencia de absorción a través de la apertura de la cavidad, como la razón que existe entre el calor removido por el fluido Q_c entre el calor del flujo que incide en el receptor Q_{in} .

$$\eta_{ap} = \frac{Q_c}{Q_{in}} \quad (5.4)$$

La tabla 5.15 presenta estos cálculos para los experimentos realizados. Es interesante ver como la diferencia porcentual entre la η_{ap} promedio de los tres grupos de espejos A, B y C con respecto a la η_{ap} de los 18 espejos es de tan solo 0.25 %.

Tabla 5.15. Eficiencia de apertura de la cavidad cónica.

	A	B	C	Promedio	A + B + C	Todos
Flujo radiativo, I_d (Wm^{-2})	882,23	867,87	852,73	867,61	867,61	816,86
Potencia incidente Q_{in} (W)	337,69	349,67	326,39	337,92	1013,75	957,74
Potencia removida Q_c (W)	327,95	332,37	313,21	324,51	973,53	922,13
η_{ap}	0,9712	0,9505	0,9596	0,9604	0,9600	0,9628

Como se menciono en la sección 2.2 la apertura del receptor fue diseñada para una eficiencia η_{ap} de 0.95 para temperaturas menores a 500 K, con lo que se observa que los resultados son congruentes a este parámetro de diseño.

Temperatura promedio de pared

Para calcular la distribución temperatura en la pared exterior del receptor, se utiliza la ecuación de Fourier, conociendo los datos experimentales, tanto de la distribución de las temperaturas de la pared interior, como la distribución de flujo radiativo $Q_{in}(z)$. Se considera que el flujo de calor conductivo a través de la pared es un flujo preferencialmente unidimensional y en dirección transversal a la misma, como se puede observar en la figura 5.19.

Para simplificar el problema, se divide el receptor en secciones de cono de altura constante, donde se tienen áreas diferenciales ΔA_i , las cuales tienen como centro el punto donde se colocó cada uno de los termopares; cada una de estas secciones se supone a una temperatura constante, la cual corresponde a la lectura de cada uno de los termopares ($T_2 - T_8$), respectivamente, y por otro lado a cada sección se promedia el flujo radiativo que incide en esta sección del lado de la pared exterior, como se muestra en la figura 5.19.

Con esto se determinó $[T_w]_{ext}$ y se encontró, que gracias a que existe una muy buena conducción de calor a través de las paredes del receptor, la pared exterior del cono se mantuvo casi a la misma temperatura que la pared interior. Esto se debe en gran parte a la alta conductividad térmica del cobre ($k = 401 Wm^{-1}K^{-1}$), y por otro lado, a que el flujo del agua en el interior del calorímetro es lo

suficientemente grande (0.87 l/min) para extraer casi la totalidad de la energía térmica de la pared.

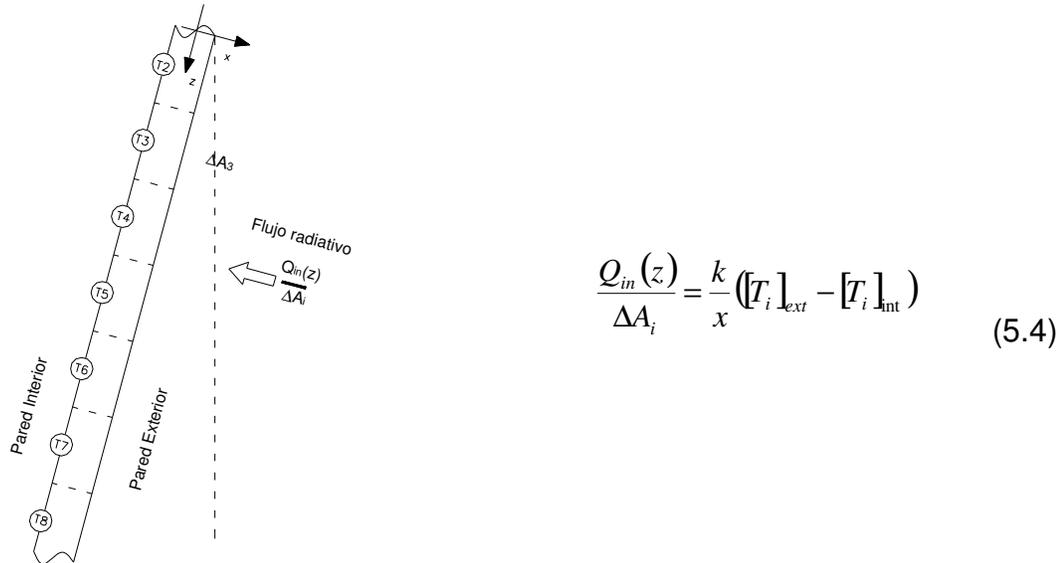


Figura 5.19. Esquema representativo del flujo conductivo a través de las paredes del receptor.

Esto se puede observar claramente en la figura 5.20, donde se presenta el caso del experimento con el grupo de espejos B. Con este ejemplo es razonable suponer que la temperatura de la pared interior $[T_w]_{int}$ es prácticamente igual a la temperatura de la pared exterior $[T_w]_{ext}$. Si ese es el caso, entonces la temperatura media de la pared en el exterior se puede calcular a partir de la integración de la distribución de temperaturas experimentales pesadas por el área de las particiones. En la tabla 5.16 se presentan los valores obtenidos de T_w .

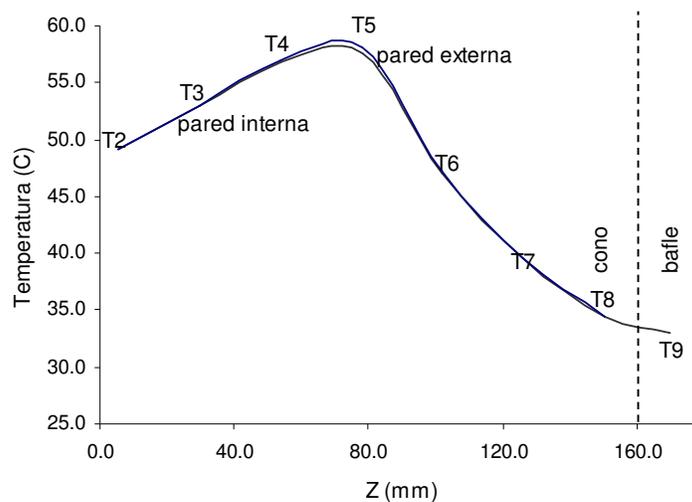


Figura 5.20. Distribución de temperaturas a lo largo del eje Z en la pared interior y exterior, para el exp. con el grupo de espejos B.

Tabla 5.16. Temperatura de pared $[T_w]_{int}$.

	grupo A	grupo B	Grupo C	Todos
$[T_w]_{int}$ (C)	40.51	44.61	29.99	37.41
$[T_w]_{int}$ (K)	313.67	317.77	303.15	310.57

Esta temperatura de pared T_w , permite estimar la potencia térmica que pasa por la apertura de la cavidad. El calor removido por el fluido es igual al calor radiativo que entra por la apertura Q_{ap} menos las pérdidas radiativas a una temperatura T_w que se considera constante, esto es

$$Q_c = Q_{ap} - \pi R_a^2 \epsilon \sigma T_w^4 \quad (5.5)$$

De esta ecuación se puede determinar el calor que pasa por la apertura de la cavidad. La tabla 5.17 muestra estos valores para cada experimento.

Tabla 5.17. Potencia térmica que pasa por la apertura de la cavidad.

	grupo A	grupo B	Grupo C	Todos
Q_{ap} (W)	328,41	332,85	313,61	922,57

Pérdidas convectivas y radiativas

Con la información que se tiene es posible hacer un estimado de las pérdidas convectivas en la cavidad. Haciendo un balance global de energía en el receptor (ver figura 5.21), el cual se toma como volumen de control, se obtiene:

$$\dot{E}_{entrada} + \dot{E}_{generada} = \dot{E}_{salida} + \dot{E}_{almacenada} \quad (5.6)$$

Para este caso:

$$\dot{E}_{entrada} = \alpha Q_{in}$$

$$\dot{E}_{generada} = 0$$

$$\dot{E}_{salida} = Q_c + Q_R + Q_{conv}$$

y si se considera este balance en estado estacionario

$$\dot{E}_{almacenada} = 0$$

Así de la ecuación 5.6 se tiene

$$Q_{conv} = \alpha Q_{in} - Q_c - Q_R \quad (5.7)$$

y como

$$Q_{conv} = hA(T_w - T_{amb}) \quad (5.8)$$

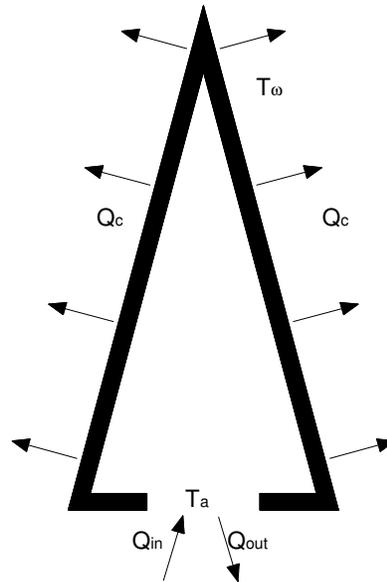


Figura 5.21. Receptor con los flujos de calor involucrados en el proceso.

entonces se puede estimar el coeficiente convectivo de pérdidas de calor desde la cavidad al medio ambiente para los experimentos realizados. La tabla 5.18 presenta la estimación de los coeficientes convectivos de pérdidas de calor desde la cavidad. Es interesante ver que los valores de h obtenidos para los experimentos con los grupos A y B están dentro de los valores esperados para procesos de convección natural (entre 2 y $25 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$) [Incropera], y que los valores para el grupo C y para el grupo de los 18 espejos están ligeramente arriba de los esperados. De cualquier forma estos valores son solo estimativos, pero nos permiten ver que estamos en los rangos esperados.

Tabla 5.18. Estimación del coeficientes de perdidas convectivo en la cavidad.

	A	B	C	Todos
Potencia incidente Q_{in} (W)	$337,69 \pm 7.20$	$349,67 \pm 4.93$	$326,39 \pm 7.19$	$957,74 \pm 30.86$
Potencia removida Q_c (W)	$327,95 \pm 62.75$	$332,37 \pm 35.87$	$313,21 \pm 114.50$	$922,13 \pm 103.51$
Absortancia aparente α_a	0.98	0.98	0.98	0.98
Perdidas radiativas (W)	0.08	0.11	0.03	0.06
Perdidas convectivas (W)	2.90	10.20	6.63	16.39
Coeficiente convectivo ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	8.32	23.17	57.78	58.55

5.7 Comparación con experimentos anteriores

En esta sección se presenta una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente por Acosta Olea [2001] y los resultados experimentales obtenidos en este trabajo.

Como se mencionó en la sección 1.5, Acosta [2001] evaluó la potencia concentrada por el DEFRAC utilizando el método calorimétrico de agua fría, considerando que esta prueba se realizó con un calorímetro de placa plana la cual presentaba zonas con temperaturas relativamente elevadas, como se observa en la tabla 5.19, y por ello las pérdidas convectivas y radiativas, eran relativamente altas, para la precisión que se desea tener. Para hacer un comparativo entre los resultados obtenidos con ambos calorímetros, considerando que para el caso del receptor de placa plana sólo se experimentó con grupos de 6 espejos, tomamos como referencia los experimentos con el grupo de espejos A.

Tabla 5.19 Valores de los resultados del cálculo numérico.

Número de espejos	Acosta 2001 (grupo "A")	Experimento Grupo "A"	%
Radiación solar directa	895.9 W/m ²	882.23 W/m ²	
Flujo volumétrico	1.11 l/min	1.58 l/min	
Temperatura ambiente (T_a)	25.7 °C	25.3 °C	
Temperatura de entrada (T_e)	24.6 °C	28.4 °C	
Temperatura de salida (T_s)	34.7 °C	31.4 °C	
Temperatura promedio de placa (T_p)	42.3 °C	40.5 °C	
Temperatura máxima exterior $T(0,0)$	470.4 °C	56.9 °C	
Temperatura máxima interior $T(0, z_0)$	144.5 °C	56.7 °C	
Temperatura máxima experimental T_5	145.6 °C	56.7 °C	
Calor absorbido por el receptor (Q_0)	335.6 W	330.92 W	
Calor perdido por convección exterior (Q_c)	4.5 W	2.90 W	- 64.44 %
Calor perdido por radiación (Q_r)	3.2 W	0.08 W	- 2.50 %
Calor perdido por convección interior (Q_{ci})	327.7 W	337.7 W	
Calor total (Q)	335.4 W	327.9 W	

En la tabla 5.19 se presentan los datos de los dos experimentos y sus diferencias porcentuales. Los dos experimentos tuvieron condiciones de insolación muy similares, sólo una diferencia porcentual del 1.5%. Sin embargo se observa que para el caso del receptor de cavidad cónica hubo una reducción en las pérdidas tanto convectivas como radiativas del 35.56% y del 97.50%, respectivamente. Esto debido a que el receptor no llega a tener puntos con altas temperaturas, gracias a que tiene una buena remoción de calor y el máximo de la distribución de flujo radiativo en el interior de la cavidad, debido a que es mucho mayor su área es mucho que en el caso del máximo en el flujo para el receptor circular plano. Por otra parte, se observa que a diferencia del caso del receptor de placa plana de acero inoxidable, con el cual se tuvo una diferencia significativa entre la temperatura de pared interior y exterior, no así en el caso del receptor de cavidad cónica, el cual debido a el material con que fue construido (cobre) y el diseño del flujo de remoción de calor, el cual se observa que es más eficiente que el caso radial del calorímetro de placa plana.

Es evidente por los resultados obtenidos, que el calorímetro de cavidad cónica desarrollado en esta tesis es un mejor instrumento para evaluar la potencia de concentración del DEFAC que el calorímetro de placa plana.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se diseñó, construyó y se puso en operación un calorímetro de cavidad cónica para la determinación de la potencia térmica del DEFRAC. La finalidad al construir este tipo de calorímetro de cavidad fue lograr concentrar la potencia total de los 18 espejos del concentrador y reducir al máximo posible las pérdidas de energía y aumentar la eficiencia de absorción del mismo.

A continuación se presentan las conclusiones más importantes de este trabajo de investigación:

A través de la técnica de trazado de rayos se encontró la distribución de flujo radiativo concentrado por el DEFRAC en la apertura de una cavidad. Con esta distribución se evaluó la eficiencia de absorción η_{ab} de la cavidad en función del radio de apertura R_a . Esta eficiencia se definió como la razón entre la energía absorbida por la cavidad y la potencia solar concentrada. Para este cálculo se supone que la cavidad actúa como un cuerpo gris, es decir, la emitancia aparente es igual a la absorptancia aparente y por otra parte se consideró que la temperatura de pared de la cavidad es homogénea. El radio óptimo de apertura de la cavidad se obtiene maximizando la eficiencia de absorción con respecto a éste. Obteniéndose para este radio de apertura de 1.62 cm un valor de la eficiencia es mayor al 95% para un rango de temperatura de operación de 0 a 500 K.

Por otro lado, para evaluar la emitancia aparente, se considera una cavidad cónica infinita como cuerpo gris ($\varepsilon_a = \alpha_a$), con una distribución de temperaturas de pared homogénea y una emitancia constante. La emitancia aparente de la cavidad se define como la razón entre la brillantez y la emisión de cuerpo negro de la cavidad, la brillantez se considera como la radiación emitida más la reflejada por el cono. A través de la solución analítica de Sparrow [1963] para el factor de forma del cono, fue posible evaluar la emitancia aparente en función del ángulo de apertura, la emitancia y temperatura de pared. A partir de dichos cálculos se observa que conforme es menor el ángulo de apertura se incrementa el valor de la emitancia

aparente. También se ve que este incremento es mayor conforme es menor la emitancia de pared.

Es de esperar, que al agregarle un bafle en la apertura de una cavidad, aumente significativamente su absortancia aparente. Para esta condición el modelo analítico anterior ya no es válido, por lo que se requiere resolver numéricamente este problema. Para esto se usó el método de Monte Carlo (MC-HSS) [Heinisch,1973] haciendo las mismas consideraciones que el caso del modelo analítico. Para estos cálculos se definió un nuevo parámetro, conocido como relación de bafle, el cual se define como la razón entre el radio de apertura del bafle y el radio de la base del cono. Los caso extremos de la relación son cuando el radio de la base del cono es igual a la apertura, es decir no existe bafle, y por otro lado cuando el radio de la apertura es igual a cero, o sea una cavidad cerrada. La modelación de la emitancia aparente se hace en función del ángulo de la apertura del cono, la relación de bafle, la emitancia y la temperatura de pared. Para verificar los resultados que se obtienen con el modelo numérico, se hace una comparación entre éste y el modelo analítico para el caso de relación de bafle igual a cero, que es donde ambos deberían coincidir. Se encontró que para ángulos de apertura menores a 60° el error es menor al 1%. Una vez verificado el método MC-HSS se llevó a cabo el estudio paramétrico de la emitancia aparente. Se encontró que para condiciones iguales de ángulo de apertura y emitancia de pared, al aumentar la relación de bafle la emitancia aparente de la cavidad aumenta y conforme es menor el ángulo de apertura esto es más notorio.

Debido a las limitaciones geométricas del concentrador la altura del cono debe ser menor a 20 cm. Incorporando esta limitación se hicieron estudios adicionales con el MC-HSS. En éstos se modeló la emitancia aparente buscando la mínima longitud y la máxima relación de bafle posible, obteniéndose que el ángulo de apertura menor para el que se tiene la máxima emitancia aparente es 15° . Como conclusión de todos los estudios anteriores se obtuvieron los parámetros de diseño que son: el radio de apertura óptimo de la cavidad $R_a = 1.62$ cm, el ángulo de apertura del cono $\omega = 15^\circ$, la relación de bafle $\xi = 0.65$, el radio de la base $R_o = 4.28$ cm y la altura del cono $L = 15.99$ cm. Se determinaron los materiales a utilizar en la construcción del calorímetro: el receptor se construyó de cobre por su alta conductividad térmica y por su alto punto de fusión, el resto del calorímetro fue construido con acero inoxidable por su baja conductividad con respecto al cobre y su resistencia a la corrosión al estar en contacto con un fluido.

Por otra parte a través de la técnica de trazado de rayos [Romero,1994], se evaluó la distribución de flujo concentrado por el DEFRAC cuando se colocaba al receptor a diferentes alturas. Se encontró que la distancia más adecuada es cuando la mancha solar se coloca exactamente en la apertura de la cavidad, debido a que en tal caso la distribución radiativa es más homogénea en la pared del receptor.

Una vez construida la cavidad y determinada la distancia a la que se colocaría el receptor, se procedió a probar experimentalmente el sistema a través de mediciones con termopares. Con ello se determinó el campo de temperaturas en la parte interna del cono receptor del calorímetro, bajo diferentes condiciones de flujo másico y flujo de calor con cada grupo de espejos por separado y con los 18

espejos. Estas distribuciones experimentales de temperaturas se compararon con los resultados del análisis teórico descrito en el párrafo anterior. Existe una correspondencia cualitativa muy buena entre la distribución de flujo radiativo y la distribución de temperaturas y sus máximos coinciden cuantitativamente dentro de la incertidumbre experimental. Las diferencias observadas en las formas de las curvas son atribuibles a los procesos físicos de transporte de calor en la pared del receptor.

De los resultados experimentales se calcularon los valores de la potencia incidente, tanto de forma calorimétrica $[Q_{in}]_{calorimétrica}$, como por medio de la medición del flujo radiativo directo $[Q_{in}]_{pirheliómetro}$. $[Q_{in}]_{calorimétrica}$ se calculó por medio del flujo másico, la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del fluido en estado estacionario y la absortancia aparente calculada teóricamente con MC-HSS. Por otra parte, para el cálculo de $[Q_{in}]_{pirheliómetro}$ la única incertidumbre que se tomó en cuenta fue la de la medición del flujo radiativo, debido a que el resto de las incertidumbres, o bien se consideraban despreciables (área de los espejos), no se conocían con certeza (factor de sombreado y reflectancia de los espejos). Esto hizo que aunque los valores de $[Q_{in}]_{calorimétrica}$ y $[Q_{in}]_{pirheliómetro}$ fueron muy próximos entre sí, con una diferencia menor a un 7.2%, $[Q_{in}]_{calorimétrica}$ tuvo una incertidumbre hasta de un 33.0 %, en el caso del experimento con el grupo de espejos C. Por otro lado, para la medición de $[Q_{in}]_{calorimétrica}$ con los 18 espejos, la incertidumbre fue de 11.2%. Con esto se demostró que el calorímetro puede recibir la potencia total del concentrador (931.4 W) y hacer mediciones de calorimetría con incertidumbres menores al 15%. Y esta incertidumbre se puede reducir significativamente controlando las incertidumbres en el flujo másico.

Más aun, analizando los resultados obtenidos con el calorímetro podemos concluir que éste podría recibir una potencia concentrada incluso mucho mayor a la de los 18 espejos del DEFRAC. Esto debido a que el sistema produce una distribución de temperaturas relativamente homogénea, sin que existan puntos con temperaturas demasiado elevadas la máxima temperatura alcanzada fue de 57 °C. En estos experimentos la eficiencia de absorción fue de 96.3% y la absortancia aparente teórica fue de 99.0 %, Con estos resultados hacen suponer que el receptor de cavidad cónica es una buena opción para emplearse como un receptor-intercambiador en otro sistema de concentración tipo disco parabólico.

Finalmente, se realizó una comparación entre los resultados experimentales obtenidos y los reportados por Acosta [2002] para el experimento con el grupo de espejos A. En ellos se encontró una reducción en las pérdidas convectivas de 1.34% en el caso de placa plana a 0.86% en el caso de la cavidad cónica, mientras que en el caso de radiativas se redujo de 1.0%, en el caso de placa plana, a un 0.02%, en el caso de cavidad cónica. Esto se debe en primer lugar a la reducción en la magnitud de la temperatura en la pared del receptor de la cavidad cónica con respecto a la placa plana. En segundo lugar, la absortancia aparente de la cavidad fue mayor a la absortancia de la pintura de la placa plana. Por último, la forma de cavidad redujo considerablemente las pérdidas convectivas. Además es conveniente volver a mencionar que en el caso de placa plana nunca

se logró concentrar los 18 espejos del DEFAC, debido a problemas de deterioro de la superficie del receptor.

Las recomendaciones para estudios futuros que se hacen son las siguientes:

- Se sugiere realizar la medición del flujo másico con instrumentos más precisos.
- Se sugiere modificar el sistema de enfoque de los espejos; en primer lugar, para que entre prueba y prueba no se requiera estar enfocando y en segundo lugar, para poder enfocar y desenfocar todo el conjunto de espejos a la vez.
- Se sugiere hacer la medición de la temperatura del fluido refrigerante a la salida del calorímetro en los tres tubos de desfogue y hacer un promedio de estas tres temperaturas. Se considera que así se evitaría una posible fuente de error.
- Se sugiere aplicar en la pared del receptor una pintura cuyas propiedades ópticas, de absorción y emisión se conozcan bien, así como su caracterización química.
- Se sugiere hacer un análisis de frecuencias de la temperatura de salida del fluido de enfriamiento, con ello se puede conocer información del tipo de flujo que circula dentro del calorímetro.
- Se sugiere desarrollar un modelo teórico de la transferencia de calor en la cavidad que permita determinar campos de velocidades y temperatura. Con éste se puede saber la distribución de temperaturas en función de la distribución de flujo y viceversa.

Referencias

- Acosta R., 2001. Estudio teórico experimental de la transferencia de calor en la placa absorbadora del calorímetro que actúa como receptor del DEFRAC. Tesis de Maestría, CIE-UNAM, Temixco, Mor.
- 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.
- Cabanillas R., 2001. Estudio de la Transferencia de Calor en una Cavidad Bidimensional Abierta. Tesis de Doctorado en Ingeniería, DEPEI-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.
- 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.
- Estrada C.A., Higuera S., Oskam A., 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. and Quiñonez 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 ASES, USA.
- 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.
- Hahm T., Schmidt-Traub H. and Lebmann B., 1999. A Cone Concentrator for High-Temperature Solar Cavity-Receivers. Journal Solar Energy. Vol 65, pp 33-41.

- 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., and 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*.
- 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*.
- 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.
- Kolb, G.J., Strachan J.W. y Estrada C.A., 2000. Proyecto de Torre Central para México. *Revista Solar*, No. 40, 16-23.
- 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.
- Siegel R., and J.R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer Third Edition*, Taylor & Francis Publishers, 1992.
- Sparrow, E. M., and V.K. Jonsson: Radiant Emission Characteristics of Diffuse Conical Cavities, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 53, no. 7, pp. 816-821, 1963.
- 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. and Diver, R.B., 1994. A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology, Reporte Sandia National Laboratories, SAND93-7026 UC-236, New Mexico, EUA. 1994.
- 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.
- =====
- Duffie J.A. and Beckman W. A., 1991. Solar engineering of thermal processes, 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- Cruz, F., 1997. Diseño, construcción y prueba de un calorímetro para el DEFRAC, Tesis de Maestría, CIE-UNAM, Temixco, Mor.
- Haji-Sheikh, 1988: Handbook of numerical heat transfer, Wiley Interscience, New York, pp. 673-722.
- Incropera P. Frank and DeWitt P. David, Introduction to Heat Transfer, 4a ed., 1999, Prentice Hall, N.Y. United States of America, pp. 912.
- Modest M. F., 1993, Radiative Heat Transfer, 2a ed., Mc Graw Hill, Inc., United States of America, pp. 799.
- Secretaría de Energía de México, Programa de Desarrollo y Reestructuración del Sector Energético 1995 – 2000 (1999).
- Zajac A, Hecht E., 1973, "Optics", Addison-Wesley Publishing Company United States of America, pp 124 – 127.

Apéndice A1

Transferencia radiativa

El término de transferencia de calor radiativa o radiación térmica es comúnmente utilizado para describir el flujo de calor por medio de las ondas electromagnéticas. Las ondas electromagnéticas se clasifican por su longitud de onda. La luz visible para el ojo humano tiene longitudes de onda que va desde 0.38 μm hasta 0.70 μm , éste es un rango muy pequeño del espectro electromagnético, pero dentro de este rango se encuentra gran parte de la energía del espectro [Duffie, 1991]. La radiación emitida por un cuerpo caliente en muchos dispositivos tecnológicos tienen longitudes de onda en el rango de 0.3 a 50 μm y más. La radiación de este rango es la que se conoce como radiación térmica y es la que interesa en la mayoría de las aplicaciones de energía solar.

El flujo radiativo de un cuerpo negro como función de la potencia emisividad monocromática se determina por:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(T, \lambda) d\lambda \quad (\text{A1.1})$$

Este cuerpo negro es una idealización teórica que se caracteriza por absorber la totalidad de energía radiante que incide en él ($\alpha = 1$) y como consecuencia también se puede suponer que este mismo cuerpo emite el máximo de la energía radiante a la temperatura de pared del cuerpo T_w . La solución de la integración completa da como resultado.

$$E_b(T) = n^2 \sigma T_w^4 \quad (\text{A1.2})$$

La potencia emitida de una superficie, es la cantidad de energía que ésta emite por unidad de tiempo y área. En particular la ley de Stefan – Boltzman establece que la potencia emitida por un cuerpo negro, es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura de pared T_w del cuerpo, esto es,

$$E_b = \frac{q}{A} = \sigma T_w^4 \quad (\text{A1.3})$$

donde σ es la constante de Stefan–Boltzmann y tiene el valor de $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ y A el área disponible para transferencia radiativa de calor.

La ley de Planck proporciona una expresión analítica para la potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro. Donde éste es un absorbedor perfecto y por tanto también es un emisor perfecto de radiación de acuerdo a la ley de Kirchoff. Esta expresión analítica determina la potencia emisiva en función de la longitud de onda y la temperatura T del cuerpo y de la longitud de onda λ , donde C_1 y C_2 son las primera y segunda constantes de Planck.

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (\text{A1.4})$$

Al hacer un balance del total de energía radiativa que incide sobre un sólido semitransparente, se encuentra que del total del flujo radiativo incidente I, una porción es reflejada hacia el exterior por la superficie (ρI), otra porción es absorbida (αI) y por último el resto se transmitida fuera cuerpo (τI). Así, $I = \alpha I + \rho I + \tau I$.

La figura A1.1 ilustra como un rayo incidente en una superficie, y dependiendo de las propiedades del material, una porción de la energía de este rayo será absorbida, reflejada o transmitida al medio exterior.

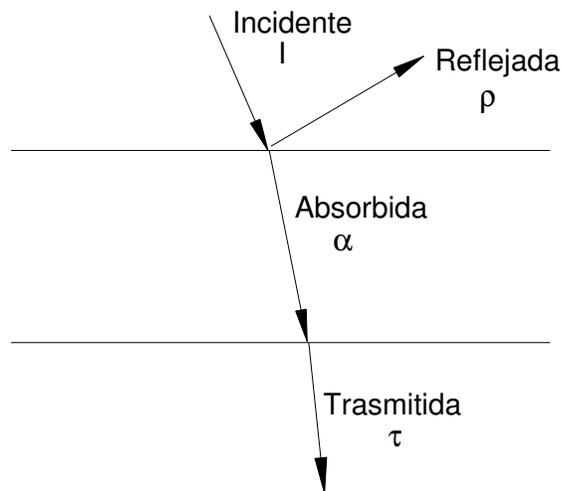


Figura A1.1 Esquema de la distribución de la radiación incidente.

Estas tres propiedades se definen como siguen:

Reflectancia

$$\rho = \frac{\text{Flujo Reflejado}}{\text{Flujo Incidente}} \quad (\text{A1.5})$$

Absortancia

$$\alpha = \frac{\text{Flujo Absorbido}}{\text{Flujo Incidente}} \quad (\text{A1.6})$$

Trasmitancia

$$\tau = \frac{\text{Flujo Trasmitido}}{\text{Flujo Incidente}} \quad (\text{A1.7})$$

Un cuerpo opaco es aquel que no trasmite ($\tau = 0$); únicamente absorbe y refleja $\alpha + \rho = 1$.

Todo cuerpo real, por tener una temperatura, emite radiación, que es una fracción de la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Así

$$E_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{A1.8})$$

donde ε es la emitancia de la superficie del cuerpo, y se define como

$$\varepsilon = \frac{\text{Flujo Emitido}}{\text{Flujo emitido Cuerpo Negro}} \quad (\text{A1.9})$$

Todas las propiedades radiativas son función de la temperatura absoluta, de la longitud de onda y de la dirección de emisión o recepción. En este caso se han definido valores de τ , ρ , α y ε

Para cuestiones de análisis de la emitancia de la cavidad, asumiremos que todas las superficies son grises, a una temperatura de superficie constante, por lo tanto, los términos de absortancia, emitancia y reflectancia de la cavidad se tomarán como superficies difusas [1]. Bajo esta condición, podemos afirmar:

$$\varepsilon = \varepsilon'_\lambda = \alpha'_\lambda = \alpha = 1 - \rho \quad (\text{A1.10})$$

El total del flujo radiativo para una configuración de áreas definidas, como es el caso de la cavidad y la apertura puede definirse como [Modest]:

$$\frac{q_i}{\varepsilon_i} - \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{\varepsilon_j} - 1 \right) F_{i-j} q_j + H_{oi} = \sum_{j=1}^N F_{i-j} (E_{bi} - E_{bj}) \quad (\text{A1.11})$$

Apéndice A2

Aspectos geométricos para una cavidad cónica

En el presente apéndice se describe el calculo para determinar el factor de forma de la cavidad cónica con bafle, en función de las variables de diseño del receptor.

Evaluación de las áreas

La cavidad cónica se puede dividir en tres áreas principales, las cuales son: el área del cono A_{wc} , el área de la tapa (bafle) A_{wb} y por ultimo el área de la apertura de la cavidad A_a . Para definir el área de la cavidad en función de las variables de diseño consideradas en el diseño se consideran las áreas de cada sección en función del ángulo de apertura de la conicidad ω , el radio de la base del cono R_o y el radio de la apertura de la cavidad R_a . Por otra parte la longitud de la cavidad L la cual esta en función de las a variables anteriores $L = R_o / \tan(\omega)$, ver la figura A2.1.

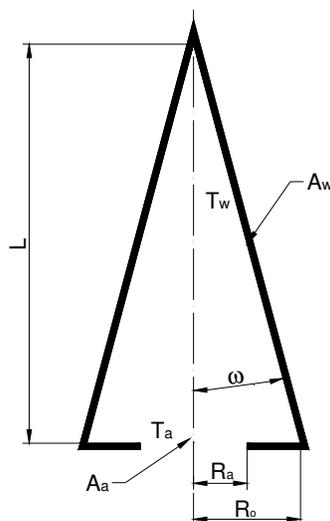


Figura A2.1. Esquema de la cavidad cónica.

El área total de la cavidad A_w se determina como la suma entre el área del cono A_{wc} y el área del bafle A_{wb} , de esta manera,

$$A_w = A_{wc} + A_{wb} \quad (A2.1)$$

El área del cono en términos de ω y R_o es

$$A_{wc} = \frac{\pi R_o^2}{\text{sen}(\omega)} \quad (A2.2)$$

mientras que área del bafle en función de R_a y R_o se obtiene como

$$A_{wb} = \pi(R_o^2 - R_a^2) \quad (A2.3)$$

por lo tanto área total de la cavidad es

$$A_w = \pi \left(\frac{R_o^2}{\text{sen} \omega} + (R_o^2 - R_a^2) \right) \quad (A2.4)$$

El área de la apertura A_a es

$$A_a = \pi R_a^2 \quad (A2.5)$$

Factor de Forma

Considerando a la cavidad como isotérmica (temperatura de pared uniforme), como un solo elemento de área A_w , con una emitancia de pared constante ε y a la apertura A_a que se encuentra a una temperatura de cielo con una emitancia igual a la de un cuerpo negro. El primer paso para determinar el flujo radiativo de la cavidad, consiste en suponer a este cuerpo gris isotérmico, el cual tiene una transferencia radiativa con la apertura de la cavidad, la cual para cuestiones de cálculos se puede suponer como un cuerpo negro a temperatura de cielo.

Para el calculo de los factores de forma entre la cavidad y la apertura, se puede recurrir a factores de forma de geometrías tipo (el cuerpo del cono, la tapadera, la apertura, la parte superior, etc.).

Utilizando la relación de reciprocidad entre factores de forma tenemos

$$F_{a-w} = \frac{A_a}{A_w} F_{w-a} \quad (A2.6)$$

Debido a que consideramos la apertura de la cavidad como un pequeño cuerpo negro plano, el cual no puede incidir radiación de este a si mismo, se puede decir que el factor de forma que guarda este consigo mismo no existe.

$$F_{a-a} = 0 \quad (A2.7)$$

La sumatoria de todos los factores con relación a la misma área se considera que es igual a la unidad.

$$\sum_{j=1}^n F_{1-j} = 1 \quad (\text{A2.8})$$

Por lo tanto

$$\sum_{j=1}^n F_{a-j} = F_{a-a} + F_{a-w} = 1 \quad (\text{A2.9})$$

$$F_{a-w} = 1 \quad (\text{A2.10})$$

Por ultimo para definir el factor de forma de la cavidad consigo misma F_{w-w} , encontramos que la sumatoria de los factores de forma de un elemento con todos los de mas elementos es igual a la unidad.

$$\sum_{j=1}^n F_{w-j} = F_{w-w} + F_{w-a} = 1 \quad (\text{A2.11})$$

Usando las ecuaciones (A2.10) y (A2.6) junto con esta se obtiene finalmente

$$F_{w-w} = 1 - \frac{A_a}{A_w} \quad (\text{A2.12})$$

Apéndice A3

Sistema de seguimiento del DEFRAC

Descripción del Sistema de Control

Los sistemas de concentración solar tienen como finalidad incrementar el flujo de radiación solar sobre un receptor. Una de las condiciones más importantes para que se realice esta concentración energética, en un sistema como el DEFRAC como se observa en figura A3.1, es que la radiación que incide en los espejos tiene que ser radiación directa, por ello se hace un seguimiento del movimiento aparente del sol durante la experimentación.

El DEFRAC está montado sobre una estructura con dos grados de libertad, la cual se denomina montura ecuatorial [Duffie, 1991], donde un grado de libertad es para orientar el concentrador con la declinación δ del día, mientras que el segundo grado de libertad es para el seguimiento del sol con una velocidad angular ω constante, velocidad en sentido opuesto a la rotación terrestre. Esto garantiza que el seguimiento del sol será continuo durante todo el día.

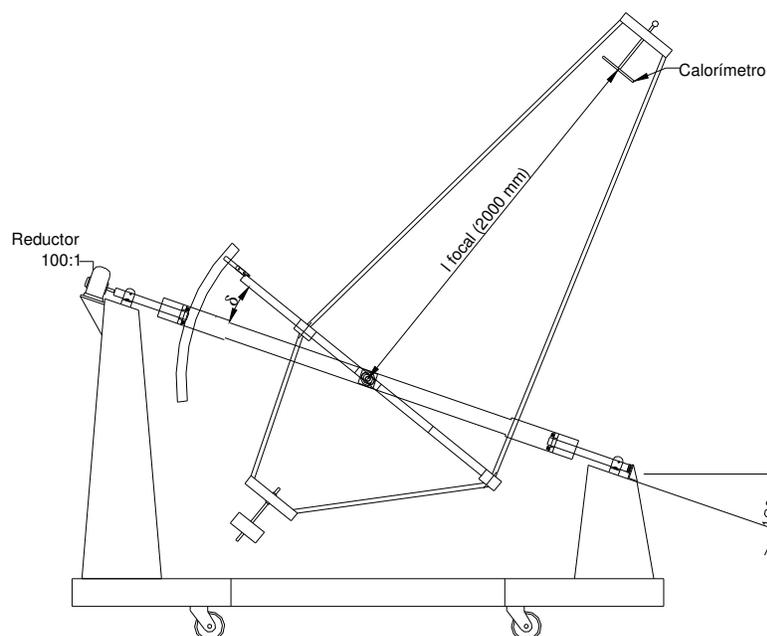


Figura A3.1. Diagrama del DEFRAC.

El seguimiento a velocidad constante se realiza con un servomotor VEXTA FBL550AA-24A, [Vexta, 1995], las características principales del servomotor se presentan en la tabla A3.1. Este servomotor se encuentra acoplado a un reductor de velocidad “corona tornillo-sinfín”, del cual las características se muestran en la tabla A3.2. Con este arreglo se consigue un movimiento de la estructura del marco principal, con una velocidad angular relativamente lenta, la cual por medio de una secuencia de arranques y paros del servomotor se aproxima a un seguimiento continuo del sol.

Tabla A3.1 Características de motor del DEFRAC

Marca	VEXTA
Modelo	FBL550AA-24 A
Tipo	Servomotor
Potencia	50 W
Torque máximo	23.6 oz-in (1.7 kg-cm)
Velocidad máxima	3000 RPM
Reductor	200:1
Control	Sistema de control de ocho canales: 1. stop/start 2. cw/ccw 3. brake/run, 4. ground 5 6 7 speed control 8. ext/int.

Tabla A3.2 Características del reductor de velocidades

Tipo	Corona – tornillo sinfín
Razón de reducción	100:1
Angulo entre ejes	90 °
Diámetro de entrada	1/2"
Diámetro de salida	1/2"

La velocidad del servomotor es controlada con un potenciómetro que suministra un voltaje de control entre 0.0 y 5.0 volts. El comportamiento de la velocidad angular del servomotor tiene una respuesta lineal a este voltaje de control.

Las principales variables de control para el motor son: 1 encendido del equipo y apagado, stop (H)/ start (L), respectivamente, 2 sentido de giro del motor en contra de las manecillas del reloj o en sentido de ellas, ccw (H) / cw (L), respectivamente, 3 paro del motor o arranque, brake (H) / run (L), respectivamente. En la figura A3.2 se muestra todas las combinaciones de operación del servomotor con estos parámetros de control, donde se define como estado alto (H) de 4 a 5 voltios, y el estado bajo (L) que representan un voltaje de 0.8 a 0.0 voltios.

El sistema de control consiste en un circuito óptico aislado (autoacopladores) que protegen eléctricamente al puerto LTP1, de una descarga proveniente del circuito de control del servomotor, ver figura A3.3, con ello se manipula con software las variables de control sin tener problemas de incompatibilidad de potencias entre la fuente de la computadora y el control del servomotor.

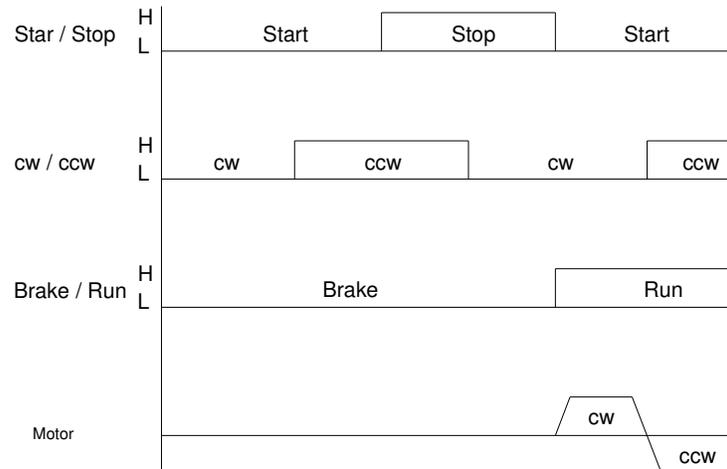


Figura A3.2. Esquema de control del motor

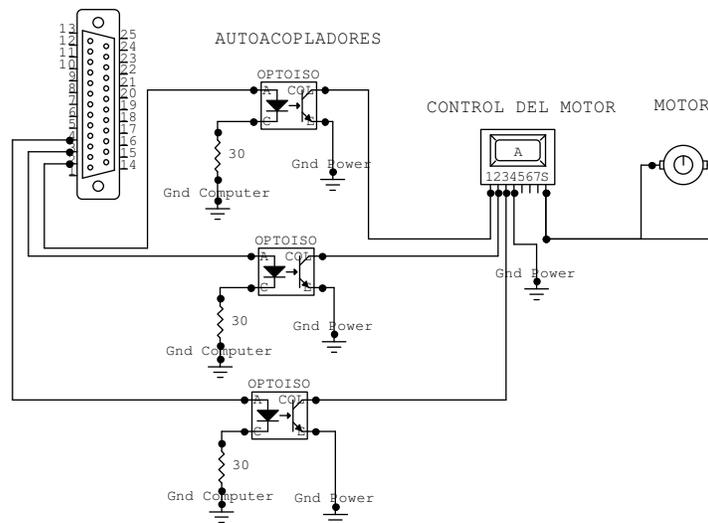


Figura A3.3. Diagrama de la interfase de control entre la computadora y el control del motor

Para controlar las variables del servomotor con el puerto paralelo de la computadora, se le asignan las siguientes salidas de puerto (pines 2, 3 y 4), donde se asigna una función de control a cada salida del puerto LTP1: la salida 2 se emplean para start/run, la salida 3 se emplea para cw/ccw y por ultimo la salida 4 controla

brake/run. Y con ello se puede definir la tabla de verdad para este control del servomotor, como se muestra en la tabla A3.3.

Tabla A3.3. Tabla de verdad para el programa de control del motor

Variable de salida	stop/ start	cw/ ccw	brake/ run	Estado
	pin 2 2^0	pin 3 2^1	pin 4 2^2	
0	0	0	0	alto
1	1	0	0	alto
2	0	1	0	alto
3	1	1	0	alto
4	0	0	1	alto
5	1	0	1	giro ccw
6	0	1	1	alto
7	1	1	1	giro cw

El programa que opera el puerto LTP1 esta realizado en PASCAL y se muestra a continuación con una pequeña explicación de las funciones principales.

```
uses crt,dos;
var d,k:byte;
tstop,c:integer;
trun:byte;
```

```
begin
  c:=0;
```

Tiempo en el que el control pone en operación el motor (en milisegundos).

```
  trun:=700;
```

Tiempo en el que el control apaga el motor (en milisegundos).

```
  tstop:=1060;
  giro:=1;
  case of
0:
  begin
    repeat
      c:=c+1;
```

Mandar la señal al puerto el valor de cero, es decir todas las señales del LTP1 se van a cero.

```
  port[956]:=0;
  delay(tstop);
```

```
writeln(c:2);
```

La siguiente instrucción manda una señal de 5 al LTP1, debido a la configuración del control, este valor pone al servomotor en los siguientes estados: encendido, giro en sentido de las manecillas del reloj y arranque.

```
    port[956]:=5;
    delay(trun);
    until keypressed;
    port[956]:=0;
end;
1:
begin
    repeat
        c:=c+1;
        port[956]:=0;
        delay(tstop);
        writeln(c:2);
```

La siguiente instrucción manda una señal de 7 al LTP1, con este valor el servomotor opera en los siguientes estados: encendido, giro en sentido de las manecillas del reloj y arranque.

```
    port[956]:=7;
    delay(trun);
    until keypressed;
    port[956]:=0;
end;
end.
```

Metodología para la caracterización del sistema de control

- Crear el circuito de interfase entre el control del servomotor y la computadora,
- Realizar el programa en PASCAL que controle tanto la secuencia de arranque-paro como el sentido de giro del motor para garantizar un seguimiento del sol.
- Caracterizar los parámetros nominales de operación del motor en condiciones de carga (con el marco del sistema acoplado) para encontrar sus curvas de velocidad de salida contra voltaje de control.
- Seleccionar una velocidad adecuada de seguimiento, esto consiste en seleccionar una velocidad angular mínima, con la cual se pueda arrancar y parar el motor a una frecuencia definida que se aproxime al seguimiento del sol, esta velocidad no puede ser tan pequeña que el sistema no pueda romper el momento de inercia de la estructura.
- Hacer pruebas de seguimiento variando el tiempo de paro y arranque del servomotor, para tener a la salida del marco principal una velocidad angular de 15 ° por hora.

Apéndice A4

Óptica de los espejos del DEFRAC

El proceso de manufactura de las superficies de un espejo paraboloidal es mucho más complicada que el fabricar un espejo con superficie esférica, por ello el costo de fabricar un espejo paraboloidal es mucho mas costoso que un casquete esférico que se aproxime a este. Por esto es importante analizar matemáticamente cuales son las diferencias entre una superficie y otra, [Zajac, 1973].

Para hacer el comparativo entre ambas superficies, partimos de la ecuación que define a la circunferencia con centro en $(0,R)$, la cual es la base para generar una esfera como sólido de revolución de esta ecuación.

$$x^2 + (y - R)^2 = R^2 \quad (\text{A4.1})$$

Desarrollando el binomio al cuadrado y reduciendo términos se obtiene

$$x^2 - 2Ry + y^2 = 0 \quad (\text{A4.2})$$

La solución a esta ecuación es

$$y = R \pm (R^2 - x^2)^{1/2} \quad (\text{A4.3})$$

Desarrollando esta solución en serie binomial resulta

$$y = \frac{x^2}{2R} + \frac{1x^4}{2^2 2! R^3} + \frac{1 \cdot 3x^6}{2^3 3! R^5} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5x^8}{2^4 4! R^7} + \dots \quad (\text{A4.4})$$

Si partimos del supuesto que estamos hablando de una circunferencia donde su radio en comparación con el segmento de la circunferencia es muy grande ($x \ll R$), podemos aproximar la solución a una serie con el primer termino.

$$y = \frac{x^2}{2R} \quad \text{con una desviación de} \quad \Delta y = \frac{x^4}{8R^3} + \frac{x^6}{16R^5} + \dots \quad (\text{A4.5})$$

Por otra parte tenemos que la ecuación de la parábola se define como

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad (\text{A4.6})$$

Como se puede ver al comparar las ecuaciones A4.5 y A4.6, un trozo pequeño ($x \ll R$) de la esfera se aproxima mucho a una parábola, donde la distancia focal efectiva es la mitad del radio de curvatura. La desviación en los extremos del espejo de casquete esférico contra un espejo paraboloidal de las mismas características de distancia focal, no excede de 0.035% (para un radio de 4 metros una distancia focal de 200 cm y un diámetro del espejo de 30 cm). Sabiendo esto se puede afirmar que la distancia focal es la mitad del radio del segmento esférico.

$$f \approx R/2 \quad (\text{A4.7})$$

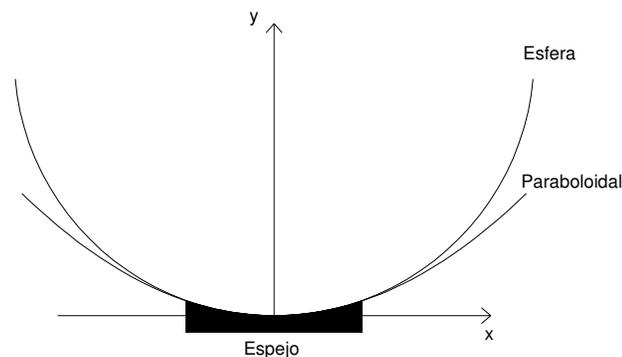


Figura A4.1. Comparación entre un espejo paraboloidal y un esférico.

Características generales de la óptica de los espejos del DEFRAC

Los espejos del concentrador solar DEFRAC son de vidrio común de un espesor de 1.90 cm con un diámetro de 30.0 cm. Estos espejos fueron manufacturados en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), y tiene un pulido esférico sin la corrección paraboloidal, que solo se hace para instrumentos que requiera una muy buena óptica, que es el caso de los telescopios. En este caso, dado que no se requiere resolución en la imagen, sino concentración de radiación, una superficie esférica es más que suficiente, [Cruz ,1997].

El radio de los espejos esféricos es de 400 cm, por lo tanto la distancia focal de estos espejos es de 200 cm.

Los espejos son de primera superficie, la cual consiste en una película delgada de aluminio de alta pureza (99.99 %), aplicada en una campana al alto vacío por evaporación y ayudando a su adherencia a la superficie por medio de un bombardeo de átomos de nitrógeno. Debido a que estamos hablando de una película delgada, la cual es muy delicada, se requiere de aplicar sobre esta primera película una protección que le dé una mayor durabilidad, que en este caso es una película delgada de cuarzo depositado de la misma manera que el aluminio.

En el CIO se ha caracterizado que la película delgada de aluminio tiene una reflectancia ρ de 0.90 a incidencia perpendicular, Con la película protectora de

cuarzo, la reflectancia ρ se incrementa a 0.95. En el capítulo 3 se presentó la medición de estos espejos realizada en el CIE donde se obtiene el mismo valor, ver la sección 3.1.

Distancia focal del sistema

Es importante mencionar que la curvatura de los espejos fue fabrica considerando la distancia focal en función de la ubicación en el plano del receptor, , como se puede ver en la figura A4.2, esta distancia no es la misma. Con esto se estimar que la distancia focal así como el ángulo normal de los espejos con el concentrador, si partimos de que la distancia perpendicular del concentrador con el marco hexagonal donde se encuentran montados los espejos “R” es de 200 cm, y las distancias de los espejos al centro del marco hexagonal es como se muestra en la figura A4.2, podemos estimar el ángulo normal ϕ para cada grupo de espejos por medio de $\tan(2\phi_i) = r_i/R$, donde r_i es el radio entre el eje del espejo o el eje del sistema y R es la distancia focal por grupo, [Quiñones ,1997].

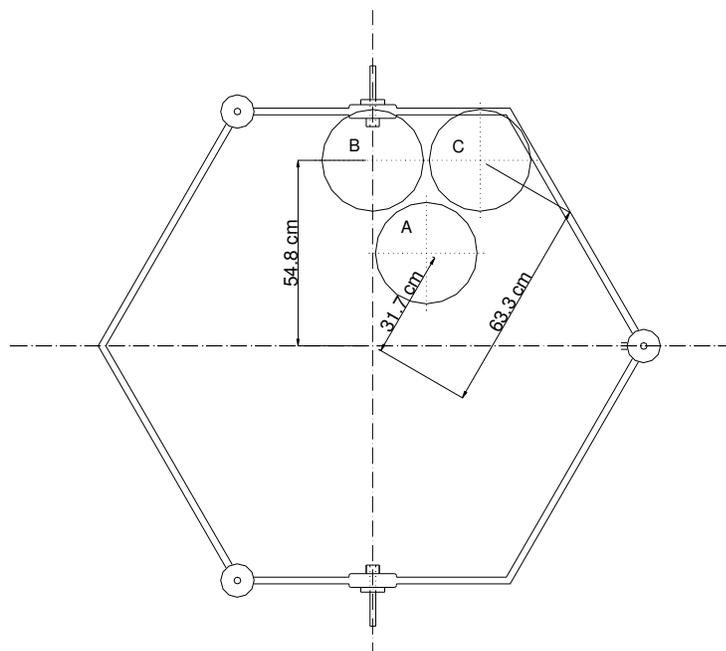


Figura A4.2. Diagrama de los espejos en el marco hexagonal

Las distancias focales y los ángulos de la normal para cada espejo es como se muestra en la tabla A4.1.

Tabla A4.1. Distancia focal y ángulo normal de los espejos

Espejos	distancia focal	ángulo normal
A	202.5 cm	4.50°
B	207.4 cm	7.66°
C	209.8 cm	8.78°

Con esto podemos determinar que la distancia focal de nuestro sistema es de 206.14 ± 3.64 cm.

Para determinar las dimensiones de la imagen solar proyectada por los espejos en el receptor del DEFRAC, primero se supone la incidencia de la radiación es perpendicular al plano de la montura donde se encuentran los espejos. Por otra parte se sabe que la radiación que incide en la tierra llega en forma de un ángulo sólido v de aproximadamente $32''$, ver figura A4.3. En el ángulo sólido proyectado por los espejos, además del cono solar, se considera un incremento en ángulo proyectado v_p , producto de dos factores: el primero la aberración óptica de los espejos y segundo el ángulo producido por el tiempo de retardo entre el seguimiento y el movimiento del sol. Para cuestiones de análisis supondremos que estos dos incrementos son despreciables.

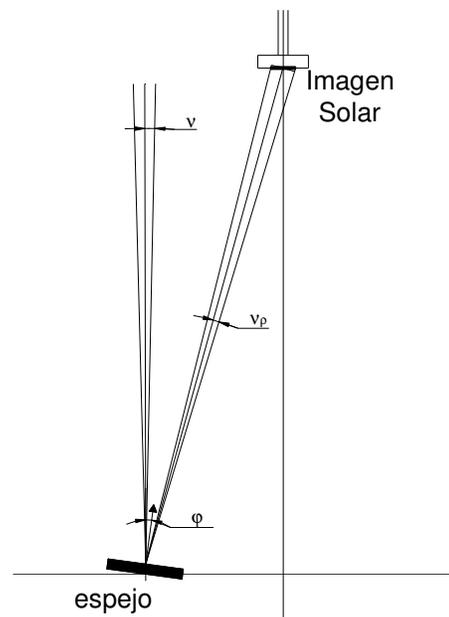


Figura A4.3. Diagrama de la proyección de la imagen solar

Realizando la proyección trigonométrica para un ángulo de apertura del cono v de $16''$, y la distancia focal por grupo de espejos, la que se muestra en la tabla A4.1, el diámetro de la imagen solar por grupo de espejos se muestra en la tabla A4.2, [Quiñones, 1997].

Tabla A4.2. Diámetro del spot

espejos	diámetro del spot teórico
A	1.89 cm
B	1.93 cm
C	1.95 cm

Procedimiento de limpieza de los espejos del DEFRAC.

Para evitar que los espejos se rallen o maltraten por polvo, arena, grasa o cualquier material abrasivo que maltrate la película delgada, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Eliminar cualquier partícula visible en la superficie del espejo (arena, tierra, motas de polvo, etc.) con un flujo de agua corriente o bien con aire a presión.
- Limpiar el espejo con un papel higiénico húmedo toda la superficie de forma circular hasta cubrir toda el área del espejo.
- Secar el espejo con un papel, hasta remover la totalidad del agua en el espejo.
- En caso de que en el espejo existan residuos de aceite o bien marcas de dedos se hará pasar un pequeño algodón humedecido con alcohol en esta área y posteriormente se repetirá la operación anterior.
- Proteger la superficie de película delgada de los espejos con un vidrio plano del mismo diámetro de estos para evitar su deterioro, aunque esto reduzca aproximadamente en un 10% la reflectancia de los espejos, pero se garantiza una larga vida de la superficie.

Por otra parte se hacen las siguientes contraindicaciones, para tener un mejor trato de los espejos:

- Disminuir al mínimo el número de operaciones de montaje y desmontaje de los espejos.
- No limpiar los espejos en presencia de partículas grandes de polvo.

Apéndice A5

Cálculo de incertidumbres

Con el objeto de poder evaluar las fuentes de incertidumbre (errores) experimentales, relacionadas en el cálculo de la potencia concentrada Q_{in} , se realiza un análisis de incertidumbre para cada una de las mediciones realizadas a esta experimentación.

Los errores en las mediciones, fueron determinados según el método descrito por Kline y McClintock [Holman, 1996]. Éste método se basa en estimar la incertidumbre en un resultado calculado, con base a las incertidumbres de las mediciones primarias. El resultado R es una función dada de las variables independientes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$;

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (A5.1)$$

Por lo tanto, la incertidumbre en el resultado R , es:

$$\delta_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \delta_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \delta_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A5.2)$$

donde $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ son las incertidumbres de las variables independientes.

La ecuación para determinar la potencia concentra, a través de la técnica de calorimetría de agua fría, como ya se menciona en la sección 1.5 es

$$[Q_{in}]_{\text{calorimetría}} = \frac{m C_p (T_s - T_e)}{\alpha_a} \quad (A5.3)$$

La ecuación que determina los errores en el cálculo de la potencia concentrada Q_{in} es:

$$\delta_{Q_{in}} = \left[\left(\frac{\partial Q_{in}}{\partial m} \delta_m \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{in}}{\partial \Delta T} \delta_{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A5.4)$$

derivando parcialmente la ecuación anterior resulta

$$\delta_{Q_m} = \left[\left(\frac{C_p \Delta T}{\alpha_a} \delta_o \right)^2 + \left(\frac{m C_p}{\alpha_a} \delta_{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A5.5})$$

el flujo másico en términos del volumen de control se define como

$$\overset{o}{m} = \frac{\rho V}{t} \quad (\text{A5.6})$$

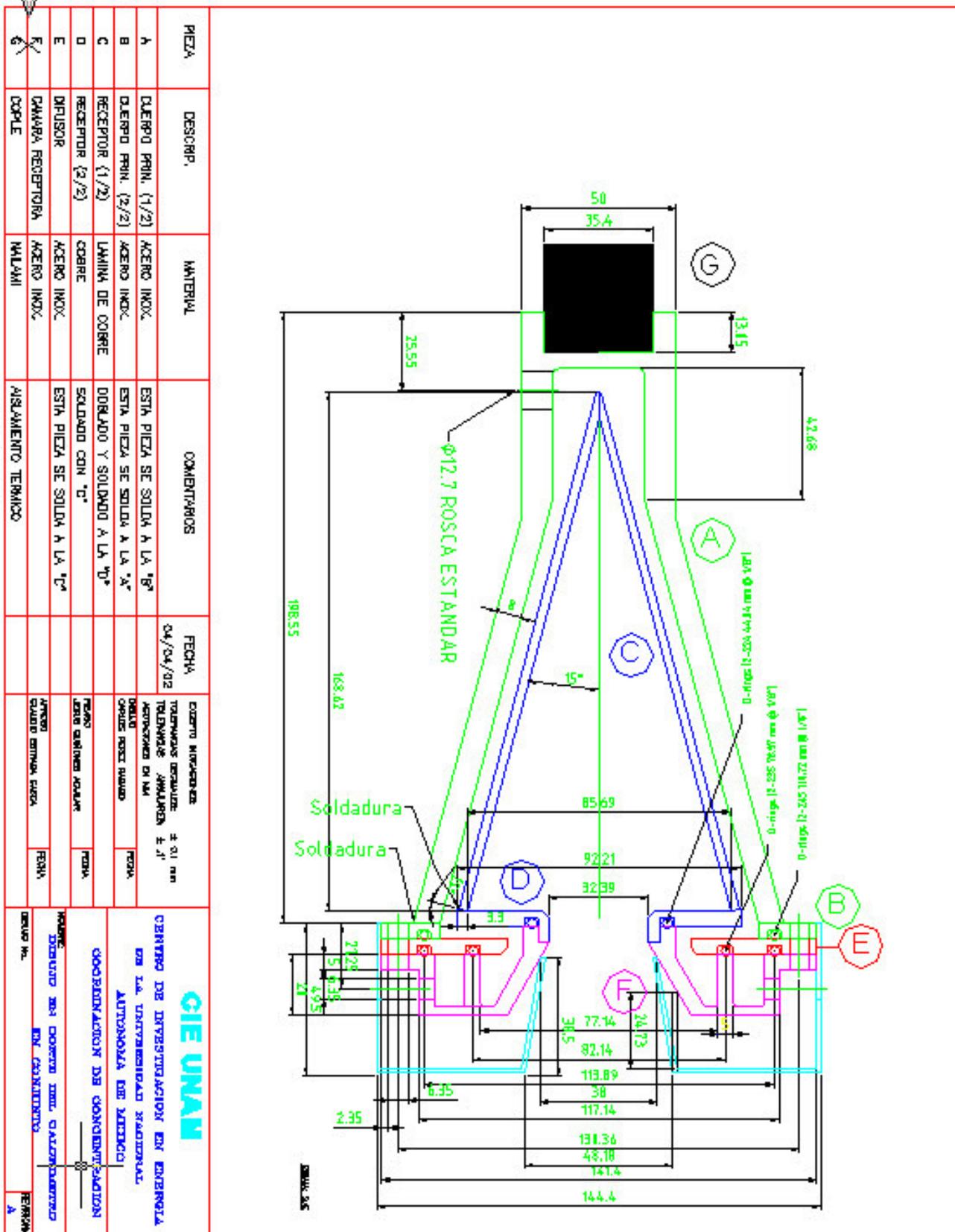
por lo tanto la incertidumbre de esta medición se determina como

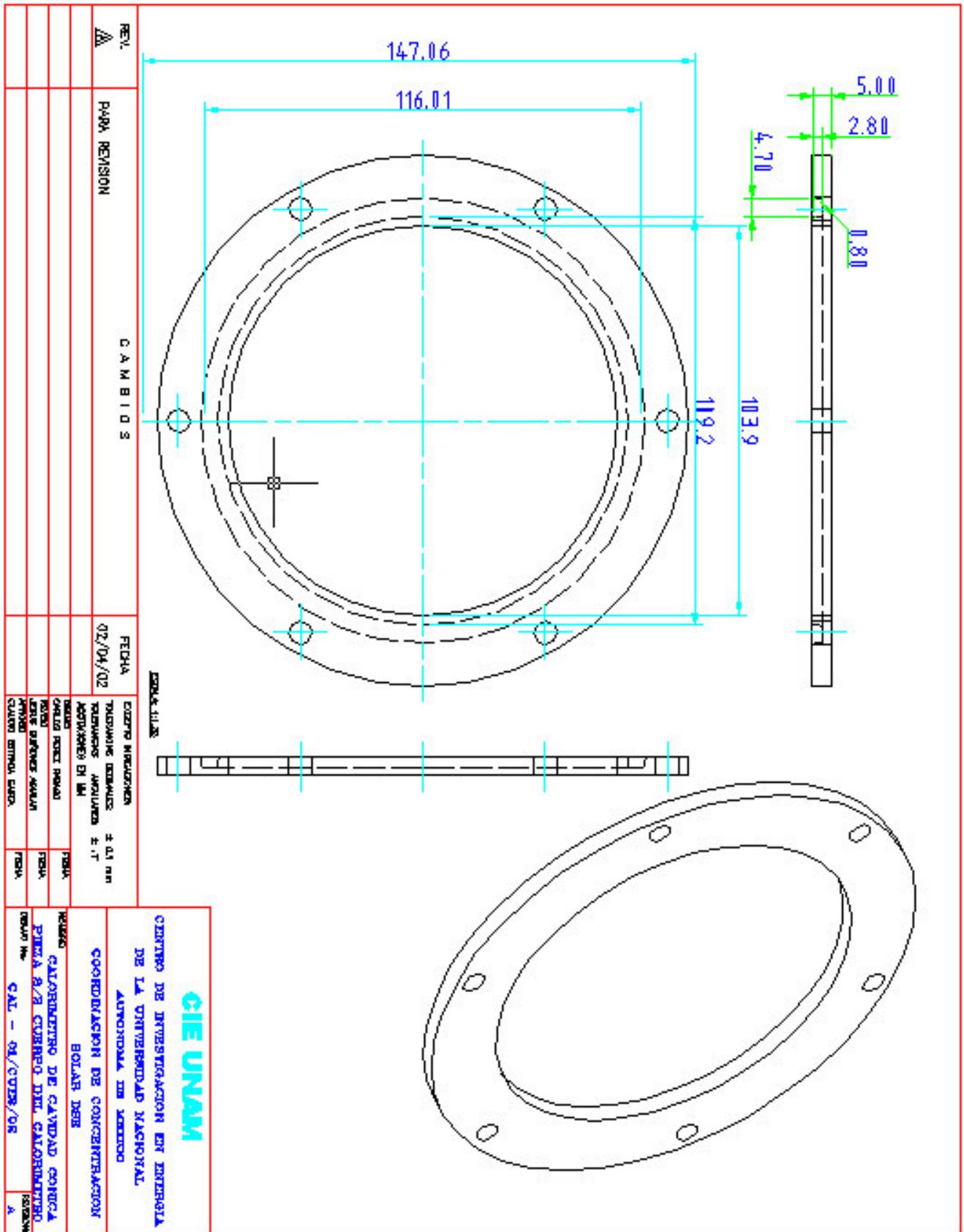
$$\delta_{\overset{o}{m}} = \left[\left(\frac{\rho}{t} \delta_v \right)^2 + \left(-\frac{\rho V}{t^2} \delta_t \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A5.7})$$

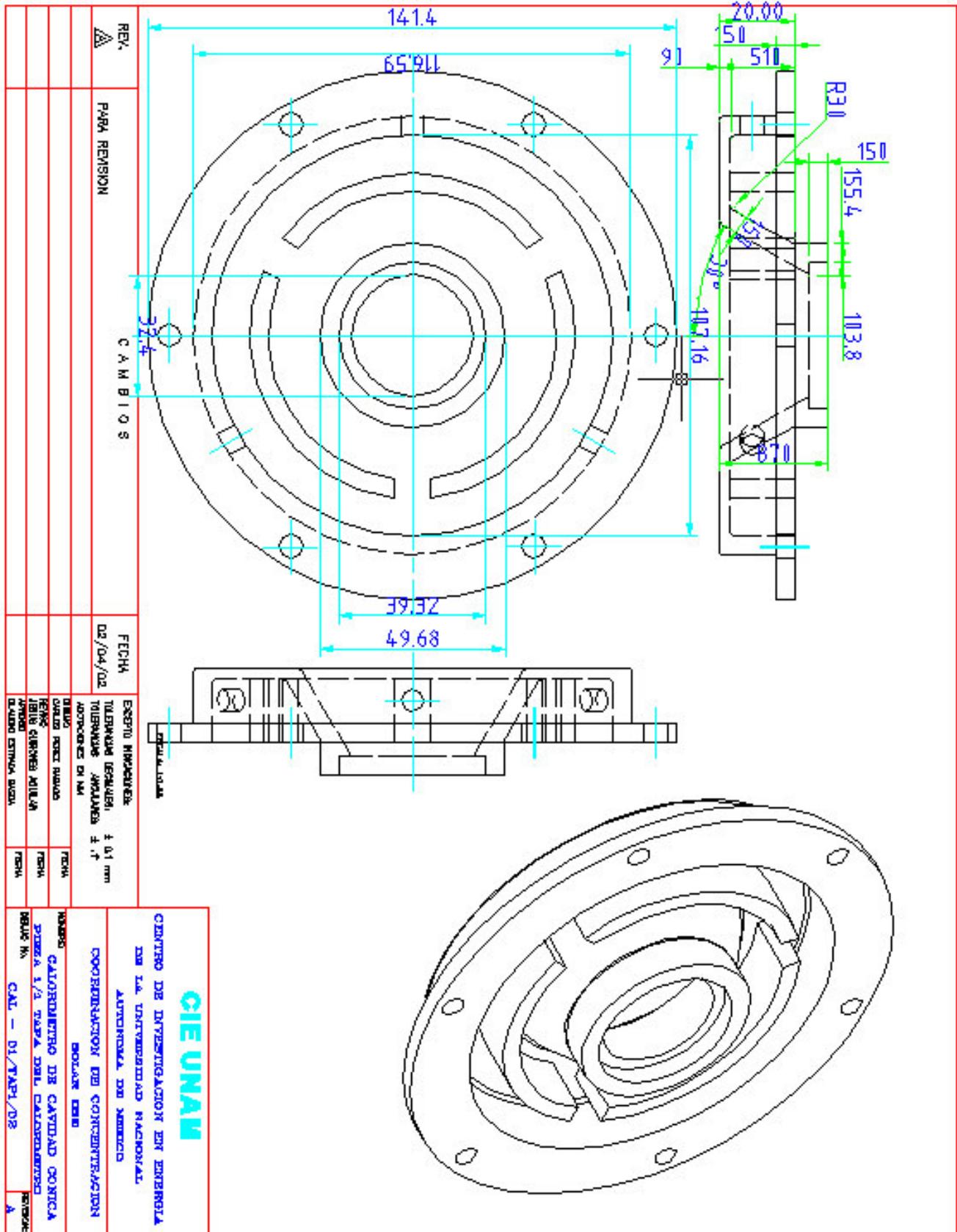
Apéndice A6

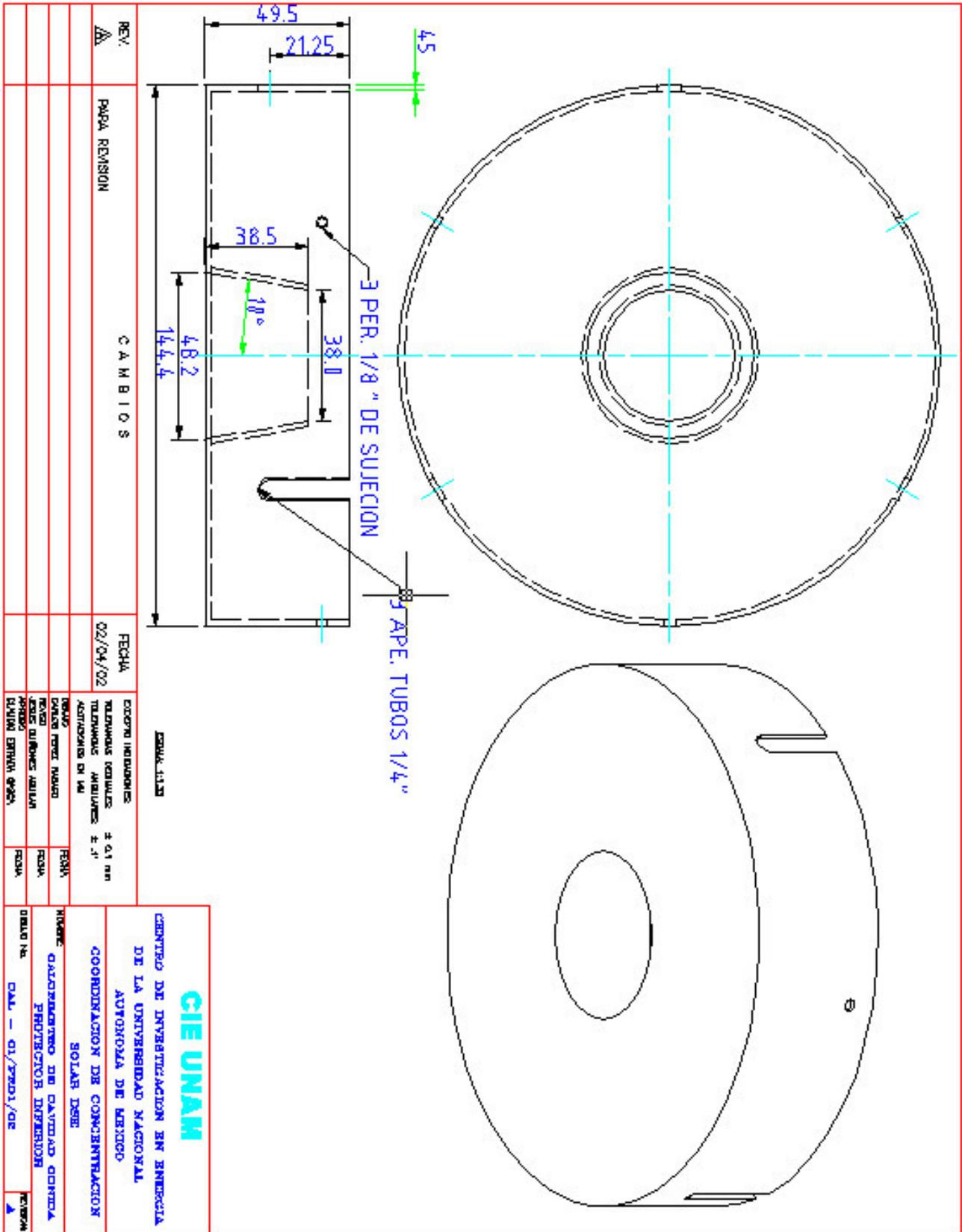
Planos

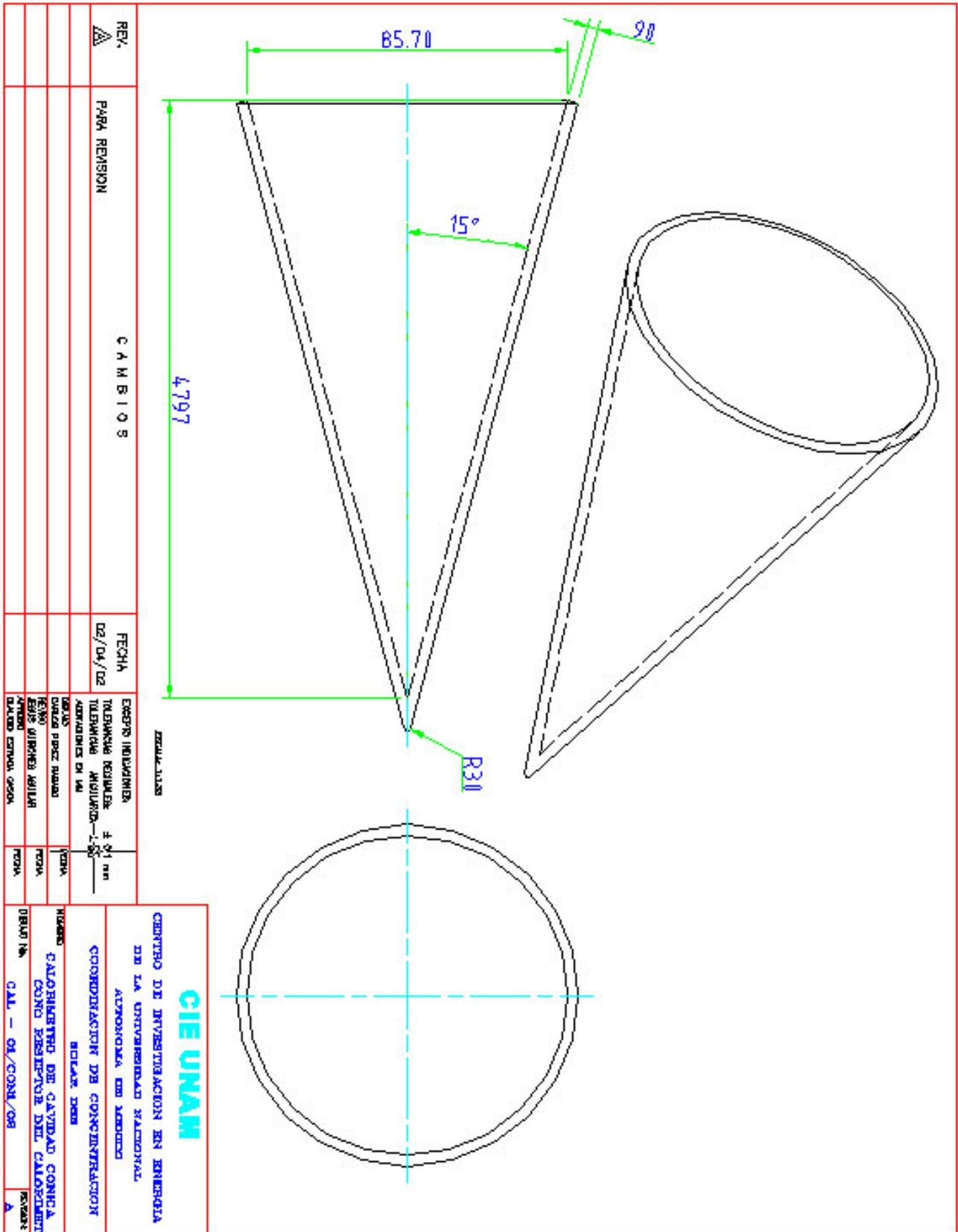
- 118. Plano general en corte del calorímetro
- 119. Cuerpo del calorímetro pieza 1-2
- 120. Cuerpo del calorímetro pieza 2-2
- 121. Difusor
- 122. Cámara receptora del flujo interno
- 123. Protector
- 124. Cavidad cónica pieza 1-2
- 125. Cavidad cónica pieza 2-2











Apéndice A7

Programas

Programa para el cálculo de la emitancia aparente ϵ_a

```
/* cav_3d_Ea_vs_w.c */
/* 11-12-02 */
/* este programa corre para condiciones en función de la relación de baffle */
/* directamente en el código se designan las variables de entrada del sistema, */

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>

/* Funciones de entrada */

double posicion_z(double,double,double,double);
double Awc(double,double);
double Awb(double,double);
double z_nuevo(double,double,double,double);
double r_nuevo(double,double,double,double,double);
double theta_nuevo(double);
double psi_nuevo(double);
double alfa_1(double,double,double,double,double,double,double);
double alfa_2(double,double,double,double,double,double,double);
double beta(double,double,double);
double ka_x(double,double,double,double,double);
double ka_y(double,double,double,double,double);
double ka_z(double,double,double);

FILE *f_out;

main()
{
    char txt[80];

    int i;
    int k;
    int c;
    int N;
    /* contador de superficie 1 si el fotón sale del cono y 0 si sale de la tapa */

    int cont_sup;
    double Ro,Ra,L,w;
    double delta_w;
    double m;
    double w_min;
    double w_max;
```

```

double R_p,R_theta,R_psi,R_alfa;
double Area_min;
double alfa; /* absortividad del material de la cavidad */
double Razon_Radio;

double Z_prueba;
double Pin[4];
double Po[4]; /* vector de posición */
double Ko[3]; /* vector de orientación */
double Pinter[3]; /* punto de intersección con el cono */
double Ptapa[3]; /* punto de intersección con la tapa */
double ALFA[2]; /* valor de la intersección con el cono */
double BETA[2]; /* valor de la magnitud con la tapa */
double R;
double sale;
double abs;
double numero_salen;
double numero_abs;

/***** Valores de entrada de características de la cavidad *****/
w=M_PI*50.0/180; /* ángulo inicial */
w_max=M_PI*51.0/180.0;
delta_w=M_PI*1.0/180.0;
Ra = 0.0162; /* Radio de la apertura (1.62 cm) metros */
alfa = 0.2;
Razon_Radio = 0.0; /* numero de cálculos */
N=100000;
sprintf(txt,"salida.txt");
/*****
Ro=Ra/(1-Razon_Radio);
f_out = fopen(txt,"w");
fprintf(f_out,"\n");
fprintf(f_out,"alfa =, %f\n",alfa);
fprintf(f_out,"(Ro-Ra)/Ro =, %f\n",Razon_Radio);
fprintf(f_out,"Ra =, %f\n",Ra);
fprintf(f_out,"Ro =, %f\n",Ro);
fprintf(f_out,"N =, %d\n",N);
fprintf(f_out,"\n");
while(w <= w_max)
{
m=tan(w);
L=Ro/tan(w);
w_min=atan(Ra/L);
Area_min=Awc(Ro,w)/(Awc(Ro,w)+Awb(Ro,Ra));
numero_salen=0;
numero_abs=0; /* se ponen en ceros los contadores de fotones */
i=1;
k=0;
while(i<=N)
{
R_p=(double)random()/RAND_MAX; /* numeros aleatorio */
R_theta=(double)random()/RAND_MAX;
R_psi=(double)random()/RAND_MAX;
R_alfa=(double)random()/RAND_MAX;
c=1;

if(R_alfa > alfa)
{
if(R_p<=Area_min) /* se determina el punto de emision en el baffle */
{
Pin[0]=z_nuevo(R_p,Awc(Ro,w),Awb(Ro,Ra),w);
Pin[1]=0.0;
Pin[2]=theta_nuevo(R_theta);
Pin[3]=psi_nuevo(R_psi);
Po[0]=Pin[0]*tan(w);
Po[1]=0;
Po[2]=-Pin[0];
Ko[0]=ka_x(Po[0],Po[1],w,Pin[2],Pin[3]);
Ko[1]=ka_y(Po[0],Po[1],w,Pin[2],Pin[3]);
Ko[2]=ka_z(w,Pin[2],Pin[3]);
}
}
}
}

```

```

}
else /* se determina el punto de emisión en el baffle */
{
  Pin[0]=L;
  Pin[1]=r_nuevo(R_p, Awc(Ro,w), Awb(Ro,Ra),w,Ro);
  Pin[2]=theta_nuevo(R_theta);
  Pin[3]=psi_nuevo(R_psi);
  Po[0]=Pin[1];
  Po[1]=0;
  Po[2]=-Pin[0];
  Ko[0]=cos(Pin[3])*sin(Pin[2]);
  Ko[1]=sin(Pin[3])*sin(Pin[2]);
  Ko[2]=cos(Pin[2]);
}
ALFA[0]=alfa_1(Ko[0],Ko[1],Ko[2],m,Po[0],Po[1],Po[2]);
BETA[0]=beta(L,Po[2],Ko[2]);

/* en caso de que la magnitud de la trayectoria del fotón sea negativa se recalculará
los valores aleatorios de la orientación de salida del fotón */

if(ALFA[0] < 0)
{
  while(ALFA[0] > 0)
  {
    R_theta=(double)random()/RAND_MAX;
    R_psi=(double)random()/RAND_MAX;
    Pin[2]=theta_nuevo(R_theta);
    Pin[3]=psi_nuevo(R_psi);
    if(R_p <= Area_min)
    {
      Ko[0]=ka_x(Po[0],Po[1],w,Pin[2],Pin[3]);
      Ko[1]=ka_y(Po[0],Po[1],w,Pin[2],Pin[3]);
      Ko[2]=ka_z(w,Pin[2],Pin[3]);
    }
    else
    {
      Ko[0]=cos(Pin[3])*sin(Pin[2]);
      Ko[1]=sin(Pin[3])*sin(Pin[2]);
      Ko[2]=cos(Pin[2]);
    }
    ALFA[0]=alfa_1(Ko[0],Ko[1],Ko[2],m,Po[0],Po[1],Po[2]);
    BETA[0]=beta(L,Po[2],Ko[2]);
  }
}
Z_prueba=Po[2]+Ko[2]*ALFA[0];
if(Z_prueba <= -L)
{
  Pinter[0]=Po[0]+Ko[0]*BETA[0];
  Pinter[1]=Po[1]+Ko[1]*BETA[0];
  Pinter[2]=-L;
  R=pow(pow(Pinter[0],2)+pow(Pinter[1],2),0.5);
  if(R <= Ra)
  {
    sale=1;
    abs=0;
    R_alfa=alfa;
  }
}
else
{
  sale=0;
  abs=0;
}
else
{
  Pinter[0]=Po[0]+Ko[0]*ALFA[0];
  Pinter[1]=Po[1]+Ko[1]*ALFA[0];
  Pinter[2]=Po[2]+Ko[2]*ALFA[0];
  sale=0;
}
}
do

```

```

{
  R_theta=(double)random()/RAND_MAX;
  R_psi=(double)random()/RAND_MAX;
  R_alfa=(double)random()/RAND_MAX;
  Po[0]=Pinter[0];
  Po[1]=Pinter[1];
  Po[2]=Pinter[2];
  Pin[2]=theta_nuevo(R_theta);
  Pin[3]=psi_nuevo(R_psi);
  Z_prueba=Po[2];
  if(Z_prueba <= -L)
  {
    Ko[0]=cos(Pin[3])*sin(Pin[2]);
    Ko[1]=sin(Pin[3])*cos(Pin[2]);
    Ko[2]=cos(Pin[2]);
    cont_sup=1;
  }
  else
  {
    Ko[0]=ka_x(Po[0],Po[1],w,Pin[2],Pin[3]);
    Ko[1]=ka_y(Po[0],Po[1],w,Pin[2],Pin[3]);
    Ko[2]=ka_z(w,Pin[2],Pin[3]);
    cont_sup=0;
  }
  ALFA[0]=alfa_1(Ko[0],Ko[1],Ko[2],m,Po[0],Po[1],Po[2]);
  BETA[0]=beta(L,Po[2],Ko[2]);

  if(ALFA[0] < 0)
  {
    while(ALFA[0] > 0)
    {
      R_theta=(double)random()/RAND_MAX;
      R_psi=(double)random()/RAND_MAX;
      Pin[2]=theta_nuevo(R_theta);
      Pin[3]=psi_nuevo(R_psi);

      if(R_p<=Area_min)
      {
        Ko[0]=ka_x(Po[0],Po[1],w,Pin[2],Pin[3]);
        Ko[1]=ka_y(Po[0],Po[1],w,Pin[2],Pin[3]);
        Ko[2]=ka_z(w,Pin[2],Pin[3]);
      }
      else
      {
        Ko[0]=cos(Pin[3])*sin(Pin[2]);
        Ko[1]=sin(Pin[3])*sin(Pin[2]);
        Ko[2]=cos(Pin[2]);
      }
      ALFA[0]=alfa_1(Ko[0],Ko[1],Ko[2],m,Po[0],Po[1],Po[2]);
      BETA[0]=beta(L,Po[2],Ko[2]);
    }
  }
  Z_prueba=Po[2]+Ko[2]*ALFA[0];

  if(Z_prueba <= -L)
  {
    Pinter[0]=Po[0]+Ko[0]*BETA[0];
    Pinter[1]=Po[1]+Ko[1]*BETA[0];
    Pinter[2]=-L;
    R=pow(pow(Pinter[0],2)+pow(Pinter[1],2),0.5);

    if(R <= Ra)
    {
      sale=1;
      R_alfa=alfa;
    }
    else
    {
      sale=0;
    }
  }
}

```

```

    }

    else
    {
        Pinter[0]=Po[0]+Ko[0]*ALFA[0];
        Pinter[1]=Po[1]+Ko[1]*ALFA[0];
        Pinter[2]=Po[2]+Ko[2]*ALFA[0];
        sale=0;
    }
    c++;
    numero_salen=numero_salen+sale;
    if(R_alfa < alfa)  abs=1;
    else              abs=0;
    } while(R_alfa > alfa);
}

else
{
    abs=1;
    sale=0;
    fprintf(f_out,"n");
}
numero_salen=numero_salen+sale;
numero_abs=numero_abs+abs;
i++;
}
fprintf(f_out,"%f,%f,%f\n",180*w/M_PI,numero_salen,numero_abs);
printf("w,%f\n",180.0*w/M_PI);
w=w+delta_w;
}
fclose(f_out);
}                                     /*      fin del main principal      */

double Awc(double RO,double W)
{
    double Awc_1;
    Awc_1=(M_PI*pow(RO,2))/(sin(W));
    return(Awc_1);
}
double Awb(double RO,double RA)
{
    double Awb_1;
    Awb_1=M_PI*(pow(RO,2)-pow(RA,2));
    return(Awb_1);
}
double z_nuevo(double Rp,double Awc,double Awb, double w)
{
    double z;
    z=pow((Rp*(Awc+Awb)/(M_PI*(sin(w)/pow(cos(w),2))))),0.5);
    return(z);
}
double theta_nuevo(double Rt)
{
    double t;
    t=asin(pow(Rt,0.5));
    return(t);
}
double psi_nuevo(double Rf)
{
    double f;
    f=2*M_PI*Rf;
    return(f);
}
double r_nuevo(double Rp,double Awc,double Awb, double w,double Ro)
{
    double r;
    r=pow(pow(Ro,2)-(1/M_PI)*(Rp*(Awc+Awb)-Awc),0.5);
    return(r);
}
double alfa_1(double kx,double ky,double kz,double m,double px,double py,double pz)

```

```

{
  double out;
  double A,B,C;
  A=(pow(kx,2)+pow(ky,2)-(pow(kz,2)*pow(m,2)));
  B=2*(px*kx+py*ky-pow(m,2)*pz*kz);
  C=(pow(px,2)+pow(py,2)-pow(pz,2)*pow(m,2));
  out=(-B+pow((pow(B,2)-4*A*C),0.5))/(2*A);
  return(out);
}
double alfa_2(double kx,double ky,double kz,double m,double px,double py,double pz)
{
  double out;
  double A,B,C;
  A=(pow(kx,2)+pow(ky,2)-(pow(kz,2)*pow(m,2)));
  B=2*(px*kx+py*ky-pow(m,2)*pz*kz);
  C=(pow(px,2)+pow(py,2)-pow(pz,2)*pow(m,2));
  out=(-B-pow((pow(B,2)-4*A*C),0.5))/(2*A);
  return(out);
}
double ka_x(double x,double y,double w,double theta,double psi)
{
  double out;
  double R;
  R=pow(pow(x,2)+pow(y,2),0.5);
  out=-(x/R)*cos(w)*cos(theta)-(x/R)*sin(w)*cos(psi)*sin(theta)-(y/R)*sin(psi)*sin(theta);
  return(out);
}
double ka_y(double x,double y,double w,double theta,double psi)
{
  double out;
  double R;
  R=pow(pow(x,2)+pow(y,2),0.5);
  out=(y/R)*cos(w)*cos(theta)-(y/R)*sin(w)*cos(psi)*sin(theta)+(x/R)*sin(psi)*sin(theta);
  return(out);
}
double ka_z(double w,double theta,double psi)
{
  double out;
  out=-sin(w)*cos(theta)+cos(w)*cos(psi)*sin(theta);
  return(out);
}
double beta(double L,double zo,double kz)
{
  double out;
  out=(-L-zo)/kz;
  return(out);
}

```

Programa para el cálculo de la distribución de flujo en la cavidad

```

/* mist_flu-Jo.c */
/* 01-05-02 */
/* Este programa calcula la distribución de flujo en la cavidad cónica */

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>

/* Funciones de entrada */

double posicion_z(double,double,double,double);
double Awc(double,double);
double Awb(double,double);
double z_nuevo(double,double,double,double);
double r_nuevo(double,double,double,double,double);

```

```

double theta_nuevo(double);
double psi_nuevo(double);
double r_spot(double);
double fi_spot(double);
double theta_spot(double,double,double);
double fi_spot(double);

double alfa_1(double,double,double,double,double,double,double);
double alfa_2(double,double,double,double,double,double,double);
double beta(double,double,double);
double ka_x(double,double,double,double,double);
double ka_y(double,double,double,double,double);
double ka_z(double,double,double);

FILE *f_out;
FILE *f_in;

main()
{
  char txt[80];
  char Buscar[20];
  int i;
  int p;
  int q;
  int cont_r;
  int k;
  int c;
  int N;
  int h;
  int cont_sup;
  int N_div; /* numero de divisiones para la distribución solar */
  double Ro,Ra,L,w;
  double m;
  double w_min;
  double w_max;
  double Ro_min;
  double Ro_max;
  double delta_Ro;
  double Razon_aper;
  double Numero_div;
  double angulo_apertura_minimo;
  double angulo_apertura_maximo;
  double R_p,R_fi,R_theta,R_psi,R_alfa;
  double Area_min;
  double alfa; /* absortancia del material de la cavidad */
  double Z_prueba;
  int contador_z[100]; /* contador de z */
  int contador_t[100]; /* contador de theta */
  int contador_r[100]; /* contador de r */
  double delta_z;
  double delta_t;
  double delta_r;
  double Numero_div_z; /* Numero de divisiones en z */
  double Numero_div_t; /* Numero de divisiones en theta */
  double Numero_div_r; /* Numero de divisiones de r */
  double z;
  double theta;
  double r;
  double theta_po;
  double theta_suma;
  double Pin[5]; /* valores iniciales z r psi theta fi */
  double Po[4]; /* vector de posición */
  double Ko[3]; /* vector de orientación */
  double Pinter[3]; /* punto de intersección con el cono */
  double Ptpa[3]; /* punto de intersección con la tapa */
  double ALFA[2]; /* valor de la intersección con el cono */
  double BETA[2]; /* valor de la magnitud con la tapa */
  double R;
  double angulo_w;
  double Radio_spot[100]; /* radio del spot (m) */

```

```

double Flujo_spot[100];          /*          flujo radiativo en el spot de entrada W/cm2          */
float Rx[100],Ry[100];
double dif_area[100];          /*          diferencial de area cm2          */
double Flujo_total;           /*          flujo total en el spot W/cm2          */
double Flujo_dist_spot[100];   /*          dist de flujo energetico spot          */
double Flujo_norm_spot[100];   /*          dist de flujo energetico spot norm          */
double Flujo_acumulado[100];   /*          dist de flujo acumulado          */
double sale;
double abs;
double numero_salen;
double numero_abs;

/***** Valores de entrada de características de la cavidad *****/
Ra=0.015;                       /*          Radio de la apertura (1.62 cm) metros          */
alfa=0.89;                      /*          Abosrtancia del material          */
angulo_w=15;                     /*          Angulo del cono 15 grados          */
angulo_apertura_minimo=6.74;    /*          Angulo de apertura min.          */
angulo_apertura_maximo=10.82;   /*          Angulo de apertura max.          */
L=0.1599;                       /*          Longitud del cono 159.9 mm          */
N=5000000;                      /*          numero de iteraciones          */
Razon_aper=0.0;                 /*          Razón de apertura, este valor no puede ser mayor de 1          */
Numero_div=50.0;                /*          numero de divisiones en el mayado          */
Numero_div_z=45;               /*          numero de divisiones en z          */
Numero_div_t=45;               /*          numero de divisiones en theta          */
Numero_div_r=45;               /*          numero de divisiones de r          */
/***** Valores de entrada de la distribución de flujo *****/
printf("Dame el nombre del archivo que voy a leer: ");
scanf("%s",&Buscar);
puts(Buscar);
sprintf(txt,"grupo_c.txt");

/***** archivo de entrada y salida del programa *****/
f_in=fopen(Buscar,"rt");
f_out = fopen(txt,"wt");
/*****

i=1;
do
{
fscanf(f_in,"%f %f",&Rx[i],&Ry[i]);
i++;
} while(!feof(f_in));
N_div=i-2;
for(i=0;i<=N_div-1;i++)
{
Radio_spot[i]=Rx[i];
Flujo_spot[i]=Ry[i];
}
/*****
/***** Calculo de la normalizacion del flujo de entrada del spot *****/
Flujo_total=0;
for(i=1;i<=N_div;i++)
{
Flujo_total=Flujo_total+Flujo_spot[i];
dif_area[i]=2*M_PI*Radio_spot[i]*(Radio_spot[2]-Radio_spot[1])*10000;
Flujo_dist_spot[i]=dif_area[i]*Flujo_spot[i];
}
Flujo_acumulado[1]=Flujo_spot[1];
for(i=2;i<=N_div;i++)
{
Flujo_acumulado[i]=Flujo_acumulado[i-1]+Flujo_spot[i];
}
for(i=1;i<=N_div;i++)
{
Flujo_norm_spot[i]=Flujo_acumulado[i]/Flujo_total;
}
/*****
/***** calculo de valores iniciales *****/
w=M_PI*angulo_w/180.0;

```

```

Ro=tan(w)*L;
Ro_max=Ra/(1-Razon_aper);
w_min=atan(Ra/L);
delta_Ro=(Ro_max-Ra)/Numero_div;
delta_z=L/(Numero_div_z-1);
delta_r=(Ro-Ra)/(Numero_div_r-1);
delta_t=2*M_PI/(Numero_div_t);
for(p=0;p<=Numero_div_z;p++)
{
    contador_z[p]=0;
}
for(p=0;p<=Numero_div_t;p++)
{
    contador_t[p]=0;
}
for(p=0;p<=Numero_div_r;p++)
{
    contador_r[p]=0;
}
/*****
m=tan(w);
Area_min=Awc(Ro,w)/(Awc(Ro,w)+Awb(Ro,Ra));
numero_salen=0;
numero_abs=0;
i=1;
k=0;
while(i<=N)
{
    R_p=(double)random()/RAND_MAX;
    R_theta=(double)random()/RAND_MAX;
    R_psi=(double)random()/RAND_MAX;
    R_fi=(double)random()/RAND_MAX;
    R_alfa=(double)random()/RAND_MAX;
    c=1;
    Pin[0]=L;
    h=0;
/*****          Calculo de la salida de los fotones del spot          *****/
do
{
    Pin[1]=Radio_spot[h];
    h++;
} while(R_p > Flujo_norm_spot[h]);

Pin[2]=fi_spot(R_fi);
Pin[3]=theta_spot(M_PI*angulo_apertura_minimo/180.0,M_PI*angulo_apertura_maximo/180,R_theta);
Pin[4]=psi_nuevo(R_psi);
Po[0]=Pin[1]*cos(Pin[2]);
Po[1]=Pin[1]*sin(Pin[2]);
Po[2]=-Pin[0];
Ko[0]=cos(Pin[4])*sin(Pin[3]);
Ko[1]=sin(Pin[4])*sin(Pin[3]);
Ko[2]=cos(Pin[3]);
ALFA[0]=alfa_1(Ko[0],Ko[1],Ko[2],m,Po[0],Po[1],Po[2]);
BETA[0]=beta(L,Po[2],Ko[2]);
if(ALFA[0] < 0)
{
    while(ALFA[0] > 0)
    {
        R_theta=(double)random()/RAND_MAX;
        R_psi=(double)random()/RAND_MAX;
        Pin[3]=theta_spot(M_PI*angulo_apertura_minimo/180.0,M_PI*angulo_apertura_maximo/180,R_theta);
        Pin[4]=psi_nuevo(R_psi);
        Ko[0]=cos(Pin[4])*sin(Pin[3]);
        Ko[1]=sin(Pin[4])*sin(Pin[3]);
        Ko[2]=cos(Pin[3]);
        ALFA[0]=alfa_1(Ko[0],Ko[1],Ko[2],m,Po[0],Po[1],Po[2]);
        BETA[0]=beta(L,Po[2],Ko[2]);
    }
}
Pinter[0]=Po[0]+Ko[0]*ALFA[0];

```

```

Pinter[1]=Po[1]+Ko[1]*ALFA[0];
Pinter[2]=Po[2]+Ko[2]*ALFA[0];
sale=0;

if(R_alfa < alfa)
{
do
{
R_theta=(double)random()/RAND_MAX;
R_psi=(double)random()/RAND_MAX;
R_alfa=(double)random()/RAND_MAX;
Po[0]=Pinter[0];
Po[1]=Pinter[1];
Po[2]=Pinter[2];
Pin[3]=theta_nuevo(R_theta);
Pin[4]=psi_nuevo(R_psi);
Z_prueba=Po[2];
if(Z_prueba <= -L)
{
Ko[0]=cos(Pin[4])*sin(Pin[3]);
Ko[1]=sin(Pin[4])*cos(Pin[3]);
Ko[2]=cos(Pin[3]);
cont_sup=1;
}
else
{
Ko[0]=ka_x(Po[0],Po[1],w,Pin[3],Pin[4]);
Ko[1]=ka_y(Po[0],Po[1],w,Pin[3],Pin[4]);
Ko[2]=ka_z(w,Pin[3],Pin[4]);
cont_sup=0;
}

ALFA[0]=alfa_1(Ko[0],Ko[1],Ko[2],m,Po[0],Po[1],Po[2]);
BETA[0]=beta(L,Po[2],Ko[2]);
if(ALFA[0] < 0)
{
while(ALFA[0] < 0)
{
R_theta=(double)random()/RAND_MAX;
R_psi=(double)random()/RAND_MAX;
Pin[3]=theta_nuevo(R_theta);
Pin[4]=psi_nuevo(R_psi);
if(R_p<=Area_min)
{
Ko[0]=ka_x(Po[0],Po[1],w,Pin[3],Pin[4]);
Ko[1]=ka_y(Po[0],Po[1],w,Pin[3],Pin[4]);
Ko[2]=ka_z(w,Pin[3],Pin[4]);
}
else
{
Ko[0]=cos(Pin[4])*sin(Pin[3]);
Ko[1]=sin(Pin[4])*sin(Pin[3]);
Ko[2]=cos(Pin[3]);
}
ALFA[0]=alfa_1(Ko[0],Ko[1],Ko[2],m,Po[0],Po[1],Po[2]);
BETA[0]=beta(L,Po[2],Ko[2]);
}
}
Z_prueba=Po[2]+Ko[2]*ALFA[0];
if(Z_prueba <= -L)
{
Pinter[0]=Po[0]+Ko[0]*BETA[0];
Pinter[1]=Po[1]+Ko[1]*BETA[0];
Pinter[2]=-L;
R=pow(pow(Pinter[0],2)+pow(Pinter[1],2),0.5);
if(R <= Ra)
{
sale=1;
}
}
else

```

```

        sale=0;
    }
    else
    {
        Pinter[0]=Po[0]+Ko[0]*ALFA[0];
        Pinter[1]=Po[1]+Ko[1]*ALFA[0];
        Pinter[2]=Po[2]+Ko[2]*ALFA[0];
        sale=0;
    }
    c++;
    if(R_alfa < alfa)    abs=1;
    else                abs=0;
} while((sale == 1));
}

else abs=1;
p=0;
q=0;
cont_r=0;
z=0;
theta=0;
r=Ra;
while(Pinter[2]<=z)
{
    z=z-delta_z;
    p++;
}
if(R_alfa < alfa)
{
    contador_z[p]++;
}
if(Pinter[2]<=-L && R > Ra && R_alfa < alfa )
{
    while(r<=R)
    {
        r=r+delta_r;
        cont_r++;
    }
}
if(R_alfa < alfa && Pinter[2]<=-L )
{
    contador_r[cont_r]++;
}
theta_po=fabs(atan(Pinter[1]/Pinter[0]));
if(Pinter[0]>=0 && Pinter[1]>=0)
{
    theta_po=theta_po;
}
if(Pinter[0]<0 && Pinter[1]>=0)
{
    theta_po=theta_po+(M_PI/2);
}
if(Pinter[0]<0 && Pinter[1]<0)
{
    theta_po=theta_po+M_PI;
}
if(Pinter[0]>=0 && Pinter[1]<0)
{
    theta_po=theta_po+(3*M_PI/2);
}
while(theta_po>=theta)
{
    theta=theta+delta_t;
    q++;
}
if(R_alfa < alfa)
{
    contador_t[q]++;
}
numero_salen=numero_salen+sale;

```

```

    numero_abs=numero_abs+abs;
    i++;
}
for(p=0;p<=Numero_div_z;p++)
{
    fprintf(f_out,"total z,%d,%d,%f,%d\n",i-1,p,-(double)p*delta_z,contador_z[p]);
}
for(p=0;p<=Numero_div_t;p++)
{
    fprintf(f_out,"total theta,%d,%d,%f,%d\n",i-1,p,180.0*(double)p*delta_t/M_PI,contador_t[p]);
}
for(p=0;p<=Numero_div_r;p++)
{
    fprintf(f_out,"total r,%d,%d,%f,%d\n",i-1,p,(double)Ra+p*delta_r,contador_r[p]);
}
fprintf(f_out,"total salen,%f\n",numero_salen);
fprintf(f_out,"total abs,%f\n",numero_abs);
fprintf(f_out,"\n");
fprintf(f_out,"Ro,%f\n",Ro);
fprintf(f_out,"(Ro-Ra)/Ro,%f\n",(Ro-Ra)/Ro);
fprintf(f_out,"L,%f\n",L);
fprintf(f_out,"salen,%f\n",numero_salen);
fprintf(f_out,"abs,%f\n",numero_abs);
fprintf(f_out,"Ea,%f\n",numero_salen/N);
fprintf(f_out,"Aa,%f\n",numero_abs/N);
fclose(f_out);

}                                     /*          fin del main principal          */

double fi_spot(double Rfi)
{
    double f;
    f=2*M_PI*Rfi;
    return(f);
}
double theta_spot(double theta_min,double theta_max,double R_th)
{
    double f;
    f=R_th*(theta_max-theta_min)+theta_min;
    return(f);
}
double Awc(double RO,double W)
{
    double Awc_1;
    Awc_1=(M_PI*pow(RO,2))/(sin(W));
    return(Awc_1);
}
double Awb(double RO,double RA)
{
    double Awb_1;
    Awb_1=M_PI*(pow(RO,2)-pow(RA,2));
    return(Awb_1);
}
double z_nuevo(double Rp,double Awc,double Awb, double w)
{
    double z;
    z=pow((Rp*(Awc+Awb)/(M_PI*(sin(w)/pow(cos(w),2))))),0.5);
    return(z);
}
double theta_nuevo(double Rt)
{
    double t;
    t=asin(pow(Rt,0.5));
    return(t);
}
double psi_nuevo(double Rf)
{
    double f;
    f=2*M_PI*Rf;
    return(f);
}

```

```

}
double r_nuevo(double Rp,double Awc,double Awb, double w,double Ro)
{
    double r;
    r=pow(pow(Ro,2)-(1/M_PI)*(Rp*(Awc+Awb)-Awc),0.5);
    return(r);
}
double alfa_1(double kx,double ky,double kz,double m,double px,double py,double pz)
{
    double out;
    double A,B,C;
    A=(pow(kx,2)+pow(ky,2)-(pow(kz,2)*pow(m,2)));
    B=2*(px*kx+py*ky-pow(m,2)*pz*kz);
    C=(pow(px,2)+pow(py,2)-pow(pz,2)*pow(m,2));
    out=(-B+pow((pow(B,2)-4*A*C),0.5))/(2*A);
    return(out);
}
double alfa_2(double kx,double ky,double kz,double m,double px,double py,double pz)
{
    double out;
    double A,B,C;
    A=(pow(kx,2)+pow(ky,2)-(pow(kz,2)*pow(m,2)));
    B=2*(px*kx+py*ky-pow(m,2)*pz*kz);
    C=(pow(px,2)+pow(py,2)-pow(pz,2)*pow(m,2));
    out=(-B-pow((pow(B,2)-4*A*C),0.5))/(2*A);
    return(out);
}
double ka_x(double x,double y,double w,double theta,double psi)
{
    double out;
    double R;
    R=pow(pow(x,2)+pow(y,2),0.5);
    out=-(x/R)*cos(theta)-(x/R)*sin(w)*cos(psi)*sin(theta)-(y/R)*sin(psi)*sin(theta);
    return(out);
}
double ka_y(double x,double y,double w,double theta,double psi)
{
    double out;
    double R;
    R=pow(pow(x,2)+pow(y,2),0.5);
    out=-(y/R)*cos(w)*cos(theta)-(y/R)*sin(w)*cos(psi)*sin(theta)+(x/R)*sin(psi)*sin(theta);
    return(out);
}
double ka_z(double w,double theta,double psi)
{
    double out;
    out=-sin(w)*cos(theta)+cos(w)*cos(psi)*sin(theta);
    return(out);
}
double beta(double L,double zo,double kz)
{
    double out;
    out=(-L-zo)/kz;
    return(out);
}

```