

93
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

**CARACTERIZACION OPTICA DEL
DISPOSITIVO PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS
RADIATIVOS CONCENTRADOS.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

JOSE DE JESUS QUIÑONES AGUILAR

DIRECTOR DE TESIS: DR. CLAUDIO A. ESTRADA GASCA

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx.

1998

TESIS CON
ALLA DE ORIGEN

25/12/2



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA F.E.S.-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

ATN: Ing. Jaime de Anda Montañez
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S.-C

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Caracterización Optica del Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados".

que presenta el pasante: José de Jesús Quiñones Aguilar,
con número de cuenta: 8607040-7 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicho tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 4 de FEBRERO de 1998

PRESIDENTE	Ing. Filiberto Leyva Piña	
VOCAL	Ing. Daniel Hernández Pecina	
SECRETARIO	Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca	
RIMER SUPLENTE	Ing. Daniel Bonilla Sapién	
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Bernardo Muñoz Martínez	

DEDICATORIA.

A mis padres, Jesús y Victoria quienes con su esfuerzo conjugado me dieron la oportunidad de recibir el mejor de los regalos, una educación.

A mis hermanos Eva, Carlos, Marisol y Karina; que a pesar de las diferencias me muestran siempre que la unión existirá entre nosotros.

A Ana, que con su ejemplo de una mujer tenaz, me muestra el camino a seguir

Por último dedico este trabajo a la muerte, ya que el saber de su existencia me hace consciente de que a partir de este logro el camino por recorrer pueda ser mas largo que la vida. De ahí la importancia de vivir el hoy y no el mañana.

AGRADECIMIENTOS.

Al Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM y al entonces Coordinador de Formación de Recursos Humanos Dr. Enrique Gefroy Aguilar, por mi aceptación dentro del programa de becas IIM-UNAM que en buena medida y gracias a ello fue posible la realización de este trabajo de tesis.

Al Dr. Claudio A. Estrada Gasca por su apoyo, por sus observaciones y sobre todo por haber depositado en mi su confianza. Así también, al grupo de trabajo con quienes fue muy grato convivir, Mónica Grajeda Pérez, Felipe Cruz Sesma, Juan C. Domínguez, Guillermo Pérez Luna, Roberto Acosta y Alma D. Cota.

Un especial agradecimiento al profesor José A. Sánchez G., por su asesoramiento de suma importancia en el desarrollo de esta tesis y por su labor de sembrar el interés en el estudiante, no solo en el área de Energía Solar si no en la Ingeniería misma.

Agradezco a: Miguel A. Ríos, Jaime Villalobos, Javier Ayala, Guillermo Hernández, José Campos, Beatriz Ayala, Ing. Nava y en general al personal del CIE de quien en algún momento recibiera de su ayuda

Al grupo de trabajo de instrumentación del Instituto de Geofísica por el apoyo recibido en la calibración de instrumentos, conformado por Francisco Vidal Valderrama y acompañantes.

A Hector Hinojosa por sus valiosas aportaciones y sabios consejos

Y por último a todas aquellas situaciones desagradables que significaran siempre un reto a vencer.

CARACTERIZACION OPTICA DEL DISPOSITIVO PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS RADIATIVOS CONCENTRADOS.

INDICE

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Indice	iv
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	xi
Nomenclatura	xii
Resumen	xiv
1 Introducción.	
1.1 Antecedentes históricos.	1
1.2 Nuevas alternativas energéticas	4
1.3 Importancia de la energía solar.	6
1.4 Aprovechamiento de la energía solar	7
1.5 Objetivo de la tesis.	14
1.6 Estructura de la tesis.	14
2 Teoría de concentración solar y sistema DEFRAC.	
2.1 Fundamentos teóricos.	16
2.2 Sistemas de conversión fototérmica.	21
2.3 Teoría sobre colectores solares concentradores.	24
2.4 Descripción del sistema de concentración solar DEFRAC	30
2.5 Optica del sistema.	35
3 Teoría de trazado de rayos y código Circe2.	
3.1 Optica solar en superficies reflectoras perfectas.	43
3.2 Optica solar en superficies reflectoras imperfectas.	44
3.3 Aplicación para sistemas colectores concentradores	45
3.4 Distribución de la forma solar.	46
3.5 Distribución del cono error.	49
3.6 Distribución de la forma solar reflejada.	51
3.7 Modelado del concentrador	53
3.8 Modelado de la faceta	57
3.9 Modelado del receptor	61
3.10 Adecuacion del código Circe2 al DEFRAC.	63

4	Captura de imágenes del flujo radiativo concentrado.	
4.1	Instrumentación y montaje del experimento.	72
4.2	Sistema de video BEAMCODE.	73
4.3	Sistema de adquisitor de datos.	83
4.4	Procedimiento en la captura de imágenes.	84
5	Análisis y determinación teórico experimental de la distribución del flujo radiativo concentrado.	
5.1	Análisis y determinación de la distribución del flujo radiativo concentrado para el grupo A de espejos.	91
5.2	Análisis y determinación de la distribución del flujo radiativo concentrado para el grupo B, grupo C y grupo total.	109
5.3	Resultados.	116
6	Conclusiones y sugerencias.	118
	Referencias Bibliográficas.	122
	Apéndices.	
	A. Fundamentos y características de la radiación solar.	
	B. Listado de programas.	
	C Gráficos de imágenes solares concentradas, por espejo.	

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Sistema solar eléctrico de plato-Stirling de 7 kW_e bajo desarrollo (Cummins Engine Company).
- Figura 1.2 Sistemas de plato-Stirling de 25 kW_e (a) y 75 kW_e (b).
- Figura 1.3 Fotografía del sistema de concentración solar DEFRAC.
- Figura 2.1 Relación geométrica Tierra-Sol.
- Figura 2.2 Reacción termonuclear en el interior del sol.
- Figura 2.3 Curva de distribución espectral de radiación solar fuera de la atmósfera.
- Figura 2.4 Comparación entre la distribución de cuerpo negro, a 5782 °C, según la ecuación de Planck y la distribución del espectro solar fuera de la atmósfera.
- Figura 2.5 Principales Configuraciones de Concentradores: (a) Recibidor Plano con Reflectores Planos; (b) Concentrador Parabólico; (c) Reflector Fresnel; (d) Campo de Heliostatos [6]
- Figura 2.6 Sistemas termosolares de concentración.
- Figura 2.7 Relaciones geométricas de concentración .
- Figura 2.8 Balance térmico en el receptor del sistema solar de concentración.
- Figura 2.9 Geometría para un concentrador parabólico
- Figura 2.10 Tamaño de la imagen en un concentrador parabólico con geometría simétrica.
- Figura 2.11 Esquema general del DEFRAC.
- Figura 2.12 Marco hexagonal.
- Figura 2.13 Marco principal y bases piramidales
- Figura 2.14 Base móvil (a) vista superior. (b) vista lateral.
- Figura 2.15 Límites del movimiento para el marco principal.

-
- Figura 2.16 Límites de movimiento para el marco hexagonal.
- Figura 2.17 Montaje de los espejos.
- Figura 2.18 Posición de los espejos del tipo A, B, y C.
- Figura 2.19 Inclinación de espejos respecto a la vertical que pasa por el origen.
- Figura 2.20 Tamaño de imagen formada para el espejo tipo A, para un ángulo α entre el rayo incidente y la normal a la superficie del espejo.
- Figura 3.1 Disco solar y cono solar reflejado, en superficie perfecta.
- Figura 3.2 Imagen solar reflejada en superficies reflectoras reales.
- Figura 3.3 Sistema coordinado general para un concentrador parabólico.
- Figura 3.4 Conos de rayos incidente y reflejado para una superficie perfecta.
- Figura 3.5 Modelado de la distribución de la forma solar.
- Figura 3.6 Distribución de error gaussiana.
- Figura 3.7 Distribución de la reflejada forma solar
- Figura 3.8 Fotografía de un concentrador de receptor central de múltiples facetas localizado en Shenandoah, Georgia. Cortesía de General Electric Company.
- Figura 3.9 Fotografía de un concentrador generador de potencia CPG-460, Cortesía de Cummins Engine Company
- Figura 3.10 Faceta esférica de forma triangular proyectada.
- Figura 3.11 Faceta proyectada forma circular, dividida en subfacetas.
- Figura 3.12 (a) Orientación de un receptor rectangular (b) Malla del flujo para un receptor de sección circular.
- Figura 4.1 Sistema para la captura de la imagen.
- Figura 4.2 Diagrama a bloques de un diagnóstico de rayo utilizando el código BEAMCODE
- Figura 4.3 Diagrama de la conexión entre elementos del sistema BEAMCODE.

Figura 4.4 Respuesta espectral de la cámara CCD COHU - 4800.

Figura 4.5 Diagrama a bloques, conexión entre elementos del sistema adquirente de datos

Figura 4.6 Pirheliómetro marca EPPLEY.

Figura 4.7 (a) Fotografía de la imagen concentrada por el grupo A de espejos, sobre la placa receptora del calorímetro. (b) Regla fotografiada a la misma distancia que la imagen.

Figura 4.8 Gráficos del flujo radiativo concentrado para el grupo A de espejos, imagen digitalizada; a) Gráfico en 3D, b) Curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura 4.9 Gráficos del flujo radiativo concentrado para el grupo B de espejos, imagen digitalizada; a) Gráfico en 3D, b) Curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura 4.10 Gráficos del flujo radiativo concentrado para el grupo C de espejos, imagen digitalizada; a) Gráfico en 3D, b) Curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura 4.11 Gráficos del flujo radiativo concentrado para el grupo total de espejos, imagen digitalizada; a) Gráfico en 3D, b) Curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal

Figura 5.1 Diseño y fotografía del calorímetro [9]

Figura 5.2 Acercamiento del mancha solar concentrada en el receptor del DEFRAC.

Figura 5.3 Gráfico en 3D, del flujo radiativo concentrado grupo A de espejos, desplazamientos en x y y reales.

Figura 5.4 Distribución del flujo radiativo concentrado, imagen experimental reconstruida grupo A de espejos; a) Gráfico en 3D, b) Gráfico de curvas de nivel, y c) Perfil vertical y horizontal.

Figura 5.5 Comparación teórica - experimental del flujo radiativo concentrado para el grupo A de espejos. a) perfil vertical, b) perfil horizontal

-
- Figura 5.6 Distribución del flujo radiativo concentrado para el grupo A, doble normalización; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.
- Figura 5.7 Comparación teórica experimental para el grupo A de espejos, imagen doblemente normalizada; a) perfil horizontal y b) perfil vertical.
- Figura 5.8 Comparación teórica experimental para el grupo A de espejos, imagen de normalización simple; a) perfil horizontal y b) perfil vertical
- Figura 5.9 Gráfico en 3D, del flujo radiativo concentrado imagen con desplazamientos reales e intensidad normalizada.
- Figura 5.10 Comparación teórica experimental, grupo A de espejos; a) perfil vertical y b) perfil horizontal.
- Figura 5.11 Gráfico en 3D y curvas de nivel de la distribución del flujo radiativo concentrado, imagen experimental reconstruida grupo A.
- Figura 5.12 Comparación teórica experimental para el grupo B de espejos; a) perfil vertical y b) perfil horizontal
- Figura 5.13 Comparación teórica experimental para el grupo C de espejos, a) perfil vertical y b) perfil horizontal.
- Figura 5.14 Comparación teórica experimental para el grupo total de espejos; a) perfil vertical y b) perfil horizontal.
- Figura 5.15 Gráfico en 3D y curvas de nivel de la distribución del flujo radiativo concentrado, imagen experimental reconstruida, grupo B.
- Figura 5.16 Gráfico en 3D y curvas de nivel de la distribución del flujo radiativo concentrado, imagen experimental reconstruida, grupo C
- Figura 5.17 Gráfico en 3D y curvas de nivel de la distribución del flujo radiativo **concentrado**, imagen experimental reconstruída, total 18 espejos.
- Figura 5.18 Función de distribución asociada al error de desviación del sistema DEFRAC.
- Figura A1 Posición de la Tierra con respecto al Sol.

Figura A2 Rayos en el solticio de invierno y el solticio de verano.

Figura A3 Angulos solares básicos.

Figura A4 Posición de un punto sobre la Tierra.

Figura A5 Latitud, ángulo horario y declinación solar.

Figura E1 Imágenes digitalizadas espejos 13 y 14, columna izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura E2 Imágenes digitalizadas espejos 15 y 16, columna izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura E3 Imágenes digitalizadas espejos 17 y 18, columna izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura E4 Imágenes digitalizadas espejos 2 y 4, columna izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura E5 Imágenes digitalizadas espejos 6 y 8, columna izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura E6 Imágenes digitalizadas espejos 10 y 12, columna izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura E7 Imágenes digitalizadas espejos 1 y 3, columna izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura E8 Imágenes digitalizadas espejos 5 y 7, columna izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

Figura E9 Imágenes digitalizadas espejos 9 y 11, columna izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

LISTA DE TABLAS.

- Tabla 2.1 Tipo de energía emitida por el sol.
- Tabla 3.1 Contenido del archivo INPUT, simulación para los 18 espejos del sistema DEFRAC.
- Tabla 3.2 Contenido del archivo INPUT, simulación para el grupo A de espejos del sistema DEFRAC.
- Tabla 3.3 Contenido del archivo INPUT, simulación para el grupo B de espejos del sistema DEFRAC.
- Tabla 3.2 Contenido del archivo INPUT, simulación para el grupo C de espejos del sistema DEFRAC.
- Tabla 5.1 Resultados experimentales de Q_i y Q_o , bajo la técnica calorimétrica.
- Tabla 5.2 Resumen de resultados de Circe2, para la distribución del flujo radiativo concentrado en espejos del grupo A, para errores en $\sigma_x = \sigma_y = 0.45$ mrad.
- Tabla 5.3 Comparación de resultados para la aplicación de los dos métodos aplicados al grupo A de espejos
- Tabla 5.4 Resumen de resultados

NOMENCLATURA

a	Apertura o radio de espejo, m
\hat{A}	Rayo solar incidente
A_a	Area de la aceptación del concentrador, m^2
A_r	Area del receptor, m^2
\hat{B}	Rayo solar reflejado
C_f	Razón de concentración de flujo, adimensional
C_g	Razón de concentración geométrica, adimensional
C_o	Velocidad de la luz, 3.0×10^8 m/seg
C_p	Capacidad calorífica de agua, W-min/kg-K
$E_{b\lambda}$	Potencia emisiva monocromática de cuerpo negro, $W/m^2 \cdot \mu m$
E_{10}	Función de la distribución error.
f	Distancia focal, m
F_s	Factor de sombreamiento
G_b	Radiación solar directa.
G_{sc}	Constante de radiación solar en la Tierra, 1353 W/m^2
h	Constante de Plank, 6.6×10^{-34} joules-seg
h_c	Coefficiente de pérdidas convectivas, $W/m^2 \cdot K$
I_a	Intensidad de flujo que llega al colector, W/m^2
I_r	Intensidad de flujo que llega al receptor, W/m^2
k	Constante de Boltzmann. 1.38×10^{-20} joules/K
\dot{m}	Flujo másico del fluido térmico, kg/min
\hat{N}	Vector normal a la superficie reflectiva.
Q_c	Energía perdida por convección, W
Q_o	Energía que llega al receptor, W
Q_p	Energía perdida al medio ambiente, W
Q_r	Energía perdida por radiación, W
Q_u	Energía útil removida en el receptor, W
T	Temperatura de cuerpo negro, K
T_c	Temperatura de cielo, K
T_e	Temperatura a la entrada del receptor, K
T_p	Temperatura de placa, K
T_s	Temperatura a la salida del receptor, K

Caracteres griegos

α	Angulo de inclinación para espejos tipo A
α_r	Absortividad de la placa receptora. adimensional

β	Angulo de inclinación para espejos tipo B
ε	Emisividad de la placa, adimensional
γ	Angulo de inclinación para espejos tipo C
λ	Longitud de onda, μm
μ_i	Angulo de incidencia de los rayos solares
μ_r	Angulo de reflectancia de los rayos solares
θ	Angulo de rotación de la distribución error
θ_r	Angulo de orilla
θ_s	Angulo solido solar
ρ_e	Especularidad de espejo
ρ_{edge}	Abertura angular formada entre el rayo solar central y el límite de la región iluminada.
σ	Constante de Sttefan-Boltzman, $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^{-4}$
σ_r	Desviación en la dirección del semieje mayor, en la distribución del cono error.
σ_s	Desviación en la dirección del semieje menor, en la distribución del cono error.

RESUMEN

Dentro del aprovechamiento de la Energía Solar, la tecnología de concentración solar de foco puntual constituye una tecnología emergente con variadas aplicaciones, entre las cuales se encuentran la generación de potencia eléctrica usando motores Stirling acoplados a los receptores de los sistemas de concentración solar y la producción de combustibles solares como el hidrogeno.

En estos sistemas, el cálculo y análisis de la distribución del flujo radiativo concentrado resulta complejo.

En el CIE (Centro de Investigación en Energía) de la UNAM se ha construido un dispositivo concentrador denominado DEFRAC (Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados), con el objeto de estudiar estos flujos radiativos concentrados y contribuir al desarrollo de esta tecnología. El DEFRAC es un dispositivo de concentración solar de foco puntual con 18 facetas especulares con una reflexividad de 0.92, montadas sobre una estructura con dos grados de libertad que permite el seguimiento aparente del sol.

Este dispositivo cuenta además con un sistema de control diseñado para mantener el foco de concentración sin corrimiento empleando un sensor de posición capaz de resolver variaciones angulares de 0.1° . La respuesta del sistema de control es no lineal y se ha determinado experimentalmente la ecuación que gobierna el comportamiento dinámico del sistema.

En estudios recientes se logró evaluar térmicamente al DEFRAC mediante la técnica calorimétrica de agua fría. Se determinó la potencia solar que este dispositivo es capaz de concentrar, obteniendo una potencia de 316.1 ± 10 W para el grupo A de espejos, de 330.8 ± 12 W para el grupo B de espejos, de 309.8 ± 12 para el grupo C de espejos, y 956.7 ± 30 W para el grupo total de espejos, para radiación solar directa incidente del orden de los 800 W/m².

Además de las caracterizaciones dinámica y térmica del DEFRAC se requiere, como en todo sistema de concentración solar, de la caracterización óptica. Dicha caracterización óptica permite conocer la distribución de la potencia concentrada en el receptor del sistema y a su vez determinar los errores ópticos del mismo [1].

Este trabajo presenta, el desarrollo teórico y experimental que permitió determinar la distribución del flujo radiativo concentrado por el DEFRAC, así como el error óptico del mismo. Para ello, en la parte teórica se utilizó el código de trazado de rayos llamado Circe2 y en la parte experimental fue utilizado un sistema de videograbado manipulado mediante un software para PC llamado BEAMCODE.

Mediante la técnica de videograbado y conociendo el tamaño real de la imagen para el grupo A de espejos (esta medición se determinó al fotografiar la imagen junto con una escala de referencia), fue posible determinar la distribución de los flujos radiativos concentrados para este grupo, encontrándose una densidad de flujo de 155 W/cm^2 para el pico máximo, correspondiente a una insolación directa de 867 W/m^2 y una concentración de 1784 soles. Comparaciones con predicciones teóricas de trazado de rayos (código Circe2) indicaron que el error normal de superficie del grupo A de seis espejos es de 0.45 mrad. El tamaño de imagen fotografiada para el grupo A de espejos fue de 2.4 cm en un corte vertical y de 2.7 cm en el corte horizontal.

El modelo teórico aplicado a los 18 espejos determinó una concentración pico de 423 W/cm^2 correspondiente a una concentración de 4903 soles, para una insolación directa de 863 W/m^2 , indicando un error normal de superficie de 0.5 mrad. El tamaño de la imagen que es posible determinar a partir de este modelo fue de 4.6cm en un corte vertical y de 3.2cm para un corte horizontal. Se esperaría comprobar en próximos estudios estos resultados.

I. INTRODUCCION.

En el presente capítulo de carácter introductorio se habla sobre la problemática que representa hoy en día la utilización de las fuentes de energía convencionales, se abarca el tema de nuevas alternativas energéticas como posible solución a esta problemática haciendo énfasis en la importancia del aprovechamiento de la Energía Solar como fuente de energía limpia e inagotable. Además se presenta el planteamiento del objetivo de tesis y la forma en que fue estructurada la misma.

1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

A través de los años el hombre ha perfeccionado la capacidad para realizar trabajos que requieren grandes esfuerzos físicos, dejándole a las máquinas las tareas pesadas; sin embargo, como consecuencia ha aumentado el consumo de energía por habitante.

Este perfeccionamiento ha traído consigo la evolución en la utilización de energéticos a lo largo de la historia. Primero el hombre utilizó la energía mecánica de sus músculos para efectuar las labores pesadas. Posteriormente, los animales domesticados de carga facilitaron aun más esta tarea. Entonces, el alimento, constituyó la fuente energética fundamental para el desempeño de actividades.

Con el descubrimiento del fuego y más tarde la invención de la máquina térmica de vapor, la madera ocupó durante muchos siglos el primer lugar como fuente energética. Posteriormente, el empleo del carbón mineral en estas máquinas

ocasiono que se abandonara la leña como combustible fundamental. De esta manera la transformación del carbón en coque para ser utilizado en las maquinas de vapor marcaron un cambio tecnológico, económico y social trascendente en la historia del hombre.

Pocos años antes del inicio de la primera Guerra Mundial se empezó a emplear el petróleo y el gas. Antes que terminara la Segunda Guerra Mundial, Fermi realizó la primera reacción nuclear controlada, así en la década de los años cincuenta aparecieron los primeros reactores nucleares comerciales, que aprovechan la energía calorífica producida por la fisión o rompimiento de los núcleos atómicos.

En resumen, podemos listar las diferentes fuentes energéticas que el hombre a utilizado a través del tiempo como:

1. Utilización de la madera.

2. Fuentes fósiles: Carbón mineral.
 Gas natural
 Petróleo y sus derivados

3. Fuentes hidráulicas: Caídas naturales de agua (ríos)
 Caídas artificiales de agua (presas).

4. Fuentes constituidas por materiales radiativos.

De estas fuentes energéticas, los combustibles fósiles representan hoy día las principales fuentes utilizadas por el hombre, es por ello que, el gran consumo de estos ha traído consigo serias repercusiones ecológicas debido a que, los combustibles fósiles al ser quemados, liberan tres tipos de gases, también llamados productos de combustión:

1. Gases considerados no contaminantes:

CO_2	(Bióxido de carbono)
H_2O	(Agua)
N_2	(Nitrógeno)
O_2	(Oxígeno)

2 Gases considerados contaminantes primarios:

CO	(Monóxido de carbono)
$(\text{SO}_2 + \text{SO}_3)$	(S_x)
(N_xO_x)	(N_x)
C_xH_y	(Hidrocarburos no quemados)

3 Gases considerados contaminantes secundarios. Denominados así, debido a que solo bajo condiciones dadas del medio ambiente, pueden o no llegar a representar un contaminante. Entre los cuales se encuentra el el nitrato de peróxido comúnmente conocido como el smog y el O_3 , conocido como el ozono

La presencia de altas concentraciones de gases contaminantes en la atmósfera, ha dado ya indicios del daño que se está ocasionando al planeta. El cual presenta hoy en día los siguientes fenómenos:

1. Cambios climáticos.
2. Perforación de la capa de ozono.
3. La presencia de lluvias ácidas.

Ante la presencia de tan serios problemas en la que se está viendo envuelto el hombre, por la utilización de estas fuentes de energía, se hace necesario que nos detengamos a pensar y dar solución cuanto antes a tales problemas. De lo contrario nuestra existencia en la tierra se verá cada día más seriamente amenazada. Quedando tal vez como última inscripción: *Un animal más extinto de la faz de la tierra y del universo.*

I 2 NUEVAS ALTERNATIVAS ENERGETICAS.

Afortunadamente, el hombre en el mundo comenzó ya a dirigir sus expectativas hacia nuevas fuentes energéticas consideradas como no contaminantes, limpias o bien, que no alteran de manera significativa o nociva su entorno. Como son:

Energía Geotérmica

Es la energía calorífica del interior de la Tierra, la cual mediante un sistema térmico se transforma en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica a través de un turbogenerador.

Energía Hidráulica.

La potencia generada en la caída a grandes desniveles del agua (en cascadas o bien presas construidas para este objetivo) es aprovechado para mover los alabes de una turbina, donde su eje se acopla a un generador eléctrico. Convirtiendo así la potencia de caída del flujo en potencia eléctrica.

Energía Eólica o energía del viento.

La velocidad del viento es aprovechada como fluido de trabajo, para mover los alabes de una turbomaquina (molino de viento) que genera un par motriz en el eje, y mediante un dispositivo acoplado al mismo genera electricidad.

Energía mareomotriz

La caída originada en una diferencia de nivel entre dos mareas, la alta y la baja, ocasiona el desplazamiento de grandes volúmenes, volumen útil de trabajo, aprovechado para impulsar los alabes de grupos de turbinas de bulbo que generan un par motriz en la flecha de la turbomaquina acoplada a un generador eléctrico.

Energía de las olas.

Los grandes volúmenes de agua que son desplazados durante el oleaje, dan origen a una carga útil entre la diferencia de altura existente en la elevación y la caída de la ola; carga que es utilizada para comprimir bollas flotantes. el gas comprimido es recibido por una maquina de desplazamiento positivo. la cual a su vez entregara la potencia mecánica obtenida en su eje a un dispositivo generador de electricidad

Energía solar.

La intensidad de luz solar que llega a la tierra, es aprovechada mediante un dispositivo colector que la intercepta y la hace incidir en un sistema receptor, de manera tal que las propiedades ópticas de los materiales con que se elaboran dichos dispositivos colectores y receptores optimizan el aprovechamiento de la radiación solar colectada.

Como se puede apreciar ninguno de los casos anteriores, involucra la emisión ala atmósfera de ningún tipo de gas contaminante durante el proceso de conversión de la energía que ofrece la fuente, a la energía útil para el hombre. Sin embargo, el que cualquiera de esta formas de energías sea rentable depende de las investigaciones que se realicen, de los recursos económicos destinados a su estudio y del interés que se preste a su desarrollo.

1.3 IMPORTANCIA DE LA ENERGIA SOLAR.

Como fuente energética la importancia del sol radica en el hecho de constituirse como una fuente universal, abundante, y que no requiere de transporte para su utilización. Además para fortuna, los países con mayores carencias cuentan con buenos promedios anuales de insolación, es el caso de países en el continente africano, donde la sequía a hostigado a sus pobladores, siendo víctimas de desnutrición y otras enfermedades relacionadas con la falta de medios que suministren atenciones necesarias de higiene y salud.

México, es considerado por su localización geográfica como sitio con altos promedios anuales de insolación dato mas que significativo para aprovechar la energía solar.[2]

1.4 APROVECHAMIENTO DE LA RADIACION SOLAR.

Para el uso de la energía solar en la Tierra se han creado en general dos tipos de tecnologías: las tecnologías de conversión fotovoltaica y las de conversión fototérmica. Los colectores solares fototérmicos son una clase de intercambiadores de calor que transforman la energía solar en energía térmica. En ellos la transferencia de energía es desde una fuente distante de energía radiante (el sol) a un fluido. Sin concentración óptica, el flujo de radiación solar incidente es, en el mejor de los casos, aproximadamente de 1100 W/m^2 . Con estos flujos radiativos, se pueden diseñar colectores solares planos para aplicaciones que utilizan temperaturas del fluido hasta de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ arriba de la temperatura ambiente. Sin embargo existen muchas otras aplicaciones donde se requieren temperaturas mayores a las normalmente alcanzadas por los colectores planos. Estas temperaturas mayores se pueden conseguir interponiendo un dispositivo óptico entre el sol y la superficie receptora de energía con el objeto de aumentar la densidad de flujo radiativo incidente en el receptor. Estos dispositivos (sistema óptico-receptor) se denominan concentradores solares

La tecnología de concentración solar de foco puntual es una tecnología emergente que esta siendo desarrollada en varios países industrializados. esta tecnología tiene varias aplicaciones entre ellas se encuentra la generación de potencia eléctrica usando motores Stirling acoplados a los receptores del sistema. Los sistemas de

concentración solar de foco puntual pueden estar constituidos por una o varias facetas concentradoras del flujo radiativo incidente, a su vez montadas sobre un dispositivo mecánico con seguimiento aparente del sol, de manera tal que el flujo radiativo solar sea concentrado durante las horas de insolación del día.

Desarrollos tecnológicos recientes.

El mejor desempeño de los sistemas de concentración de Plato/Stirling se tuvo en el año de 1984 con el sistema Vanguard-I, utilizando una máquina Stirling de 25 kW_e y con una eficiencia neta de conversión de energía luminosa a energía eléctrica de 30 %, lo cual representó un récord para todos los tipos de sistemas solares eléctricos.

Una reciente innovación en diseños de concentración solar es el uso de membranas estiradas, por medio de un vacío se produce una deformación en la membrana, dando como resultado una superficie semiparabólica

En 1984 Mc Doneell Douglas Corp. en California, desarrolló un sistema de plato Stirling de 25 kW_e utilizando una unidad Stirling 4-95 Mark II, fueron producidas 6 unidades consistentes en 82 facetas de cristal con curvatura.

De 1984 a 1988 se desarrolló en Stuttgart, Alemania el primer sistema de concentración de gran escala con un sistema de 50 kW_e que tenía una unidad Stirling 4-275. En 1991 también en Stuttgart, se desarrolló un sistema de plato/Stirling con membrana estirada muy delgada (0.23 mm) de una sola faceta de 7.5 metros de diámetro y con una potencia de 9 kW_e. El sistema completo tiene

una eficiencia de 20.3%. Se construyeron 6 unidades, de las cuales 3 funcionan actualmente en Almería, España y las otras en Stuttgart.

En 1992, Cummins Power Generation, Inc. de Columbus Indiana, desarrolló un sistema con salida de potencia eléctrica de 75 kW_e y una eficiencia total de 19%. El sistema consta de 24 facetas de membranas estiradas (polímeros aluminizados) montadas en la estructura.[3] En las figuras 1.1 y 1.2 se observan algunos de los desarrollos recientes de los sistemas de plato/Stirling.

En México, en el Centro de Investigación en Energía de la UNAM, localizado en Temixco Morelos, se esta llevando acabo, por el grupo a cargo del investigador Claudio A. Estrada Gasca, un proyecto de investigación de largo alcance orientado al estudio de esta tecnología; con dos fines primordiales; por un lado caracterizar y evaluar superficies reflexivas de diversos tipos y por otro lado caracterizar y evaluar sistemas receptores, de manera tal, que ambos estudios demuestren la viabilidad de sistemas de concentración solar de foco puntual para diversas aplicaciones como la generación de potencia eléctrica y la producción de combustibles solares como el hidrógeno Así de esta manera, se contribuiría al desarrollo de esta tecnología.

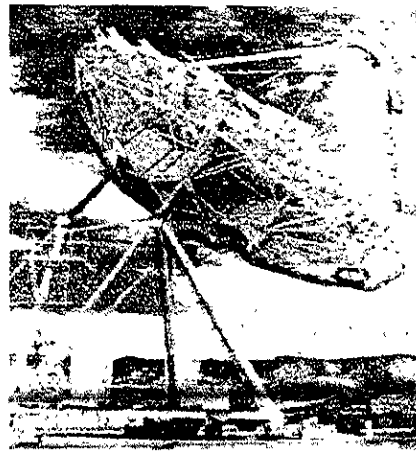
Para ello se diseñó y construyó el **Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados DEFRAC**. Siendo este un sistema de concentración solar de foco puntual con 18 facetas especulares, agrupadas en tres grupos, con reflexividad de 0.92 montadas sobre una estructura con dos grados de libertad que



Figura 1.1 Sistema solar eléctrico de plato/Stirling de 7 kW_e bajo desarrollo (Cummins Engine Company).



(a)



(b)

Figura 1.2 Sistemas de plato/Stirling de 25 kW_e (a) y 75 kW_e (b).

permiten el seguimiento aparente del sol. Los espejos son de vidrio aluminizado de primer superficie de 30cm de diámetro, el sistema óptico en conjunto tiene una distancia focal equivalente a los 200 cm. La figura 1.3 muestra la fotografía del sistema de concentración solar DEFRAC.



Figura 1.3 Fotografía del sistema de concentración solar DEFRAC.

En la primer prueba experimental realizada con el DEFRAC se alcanzó una temperatura máxima de $970\text{ }^{\circ}\text{C}$ sobre la placa de acero que actuó como receptor, durante 5 minutos de exposición al flujo solar radiativo concentrado, bajo una insolación global de 650 W/m^2 . [4,5]

Este dispositivo cuenta además con un sistema de control diseñado para mantener el foco de concentración sin corrimiento empleando un sensor de posición capaz de resolver variaciones angulares de 0.1° . La respuesta del sistema de control es no lineal y se ha determinado experimentalmente la ecuación que gobierna el comportamiento dinámico del sistema. [5,6]

En estudios recientes se logró evaluar térmicamente al DEFRAC, mediante la técnica calorimétrica de agua fría. Determinando así la potencia solar que este dispositivo es capaz de concentrar, obteniendo una potencia normalizada de 364.7 ± 18 W para el grupo A de espejos, de 381.6 ± 18 W para el grupo B de espejos, de 360.4 ± 18 para el grupo C de espejos, y $1\ 106.9 \pm 18$ W para el grupo total de espejos. [8,9]

Además de las caracterizaciones dinámica y térmica del DEFRAC se requiere, como en todo sistema de concentración solar, de la caracterización óptica. Caracterización que permite conocer la distribución de la potencia concentrada en el receptor del sistema y a su vez determinar los errores ópticos del mismo.

En el trabajo de tesis presentado por Riveros, *Curvas de Distribución de Energía de un Concentrador de 19 espejos parabólicos* [10], se determina la distribución del flujo radiativo concentrado por el DEFRAC. Esto se hace mediante trazado de rayos considerando por un lado espejos ideales en los cuales se puede modelar imperfecciones originando con ello errores de desviación angular del rayo solar reflejado, por otro lado se considera al sol como un disco de emisividad uniforme y diámetro de medio grado. La técnica de trazado de rayos utilizada consiste básicamente en la fragmentación del disco solar y de cada uno de los 18 espejos

parabólicos, en segmentos con áreas equivalentes, en el receptor se efectúa un enmallado de tal manera que a cada nodo le corresponde una posición en coordenadas (x,y) . La idea es que, un rayo de luz puntual, no en forma de cono como lo considera Circe2, proveniente de una sección del sol fragmentado incida en cada sección en que fue fragmentado uno de los espejos, para de esta manera predecir las posiciones (x,y) que el rayo reflejado golpeará al receptor y así formar la imagen solar reflejada por este espejo.

Ahora bien, este trabajo presenta el desarrollo teórico experimental que permitió determinar la distribución del flujo radiativo concentrado por el DEFRAC, así como el error óptico del mismo[11], mediante la utilización del código de trazado de rayos Circe2, que a diferencia del programa de trazado de rayos hecho por Riveros, este código ha sido validado experimentalmente al ser aplicado en la determinación de la distribución de flujos concentrados para sistemas de concentración solar diseñados por Cummins Engine Company. Además fue utilizado un sistema de video-grabado código BEAMCODE, para la digitalización de las imágenes solares concentradas.

En resumen la caracterización de un sistema de concentración solar de foco puntual contempla los siguientes aspectos: determinar el comportamiento dinámico del sistema, determinar la potencia solar que es capaz el sistema de concentrar y el de determinar la distribución en el receptor para esta potencia solar concentrada consiguiendo con ello el error del sistema óptico y el tamaño de la imagen.

1.5 OBJETIVO DE LA TESIS.

El objetivo de esta tesis va enfocado al tercer aspecto mencionado anteriormente, y se propone como:

El estudio teórico y experimental de la distribución del flujo radiativo concentrado por el DEFRAC .

Objetivos específicos.

Modelar el sistema de concentración solar DEFRAC mediante el código CIRCE2, el cual utiliza el método de trazado de rayos.

Capturar imágenes de la radiación solar concentrada por espejo , por grupo de espejos y por el total de los 18 espejos del sistema, mediante la utilización de un sistema de videgrabado.

Determinar el tamaño real de la imagen solar concentrada por el DEFRAC.

Comparar los resultados experimentales con los resultados teóricos obtenidos a fin de determinar los errores ópticos del sistema y con ello graficar la función error.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS.

En el capítulo 1, se ha presentado a modo de introducción el problema que enfrentamos en la actualidad debido a la utilización de las fuentes convencionales de energía, se ha mencionado a las nuevas fuentes de energía como solución al problema, haciendo énfasis en la importancia del aprovechamiento de la energía solar. Se ha descrito de manera general al DEFRAC, y se ha planteado el objetivo y la estructura de la tesis.

En el capítulo 2, se definen los fundamentos teóricos asociados a sistemas de concentración solar presentando una clasificación de estos sistemas, con el objetivo de ubicar al sistema DEFRAC; finalmente se da una descripción de las características del mismo DEFRAC.

En el capítulo 3, se habla del código Circe2, presentando por un lado la teoría de trazado de rayos en que esta basado el código y por otro lado, los parámetros a utilizar para modelar el sistema de concentración solar DEFRAC.

En el capítulo 4, se presenta lo concerniente al desarrollo experimental, montaje, instrumentación y captura de imágenes solares concentradas en el plano focal del sistema.

En el capítulo 5, se presenta el análisis de la distribución del flujo radiativo concentrado para la contribución por grupo de espejos y por el total de los 18 espejos; haciéndose necesario para ello la aplicación de dos métodos, descritos como el método de la normalización simple y el método de doble normalización. Además este capítulo presenta a manera de resultado un resumen en forma tabular y la determinación de la función de error del sistema DEFRAC.

El capítulo 6, presenta las conclusiones a las que se llegó en el desarrollo de la tesis y se hacen sugerencias para posteriores trabajos relacionados con el tema

2. TEORIA DE CONCENTRACION SOLAR Y SISTEMA DEFRAC.

En este capítulo se presenta los fundamentos teóricos asociados a sistemas de concentración solar se hace además un clasificación de estos sistemas, con la intención de ubicar al sistema de concentración solar DEFRAC; se menciona el objetivo para el cual fue construido este sistema y finalmente se da una descripción de las características del mismo.

2.1 FUNDAMENTOS TEORICOS.

El sol.

Para los fines del aprovechamiento de su energía, el sol es una inmensa esfera de gases, principalmente hidrógeno y helio, a alta temperatura. Con un diámetro de $1\,3904 \times 10^9$ m, situado a la distancia media de 1.49×10^{11} m respecto de la Tierra Distancia conocida como *unidad astronómica*. En la figura 2.1 se muestra a manera de esquema estas relaciones.

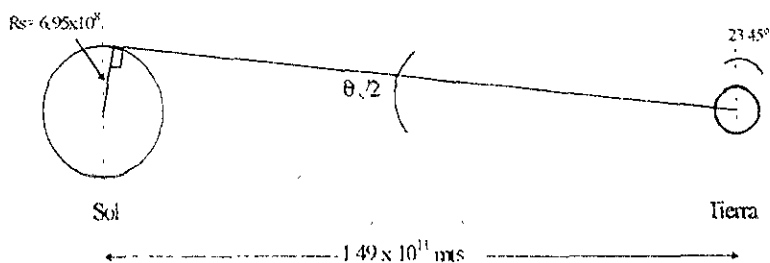


Figura 2.1 Relación geométrica Tierra - Sol.

A la distancia relativa a que se encuentra la Tierra del Sol, éste tiene el aspecto de un disco brillante observado a un diámetro angular sólido θ_s , que según la geometría de la figura anterior está dado por:

$$\theta_s = \tan^{-1} \left[\frac{2(6.95 \times 10^8)}{1.49 \times 10^{11}} \right] = 0.534^\circ \quad 2.1$$

De esta manera el Sol es de entre todas las estrellas, la más cercana a la Tierra razón por la cuál se ha podido estudiar. En la parte central de este se encuentran unas condiciones tales que provocan fenómenos en los cuales núcleos de átomos de hidrógeno se funden dando origen a átomos de helio. Por cada núcleo de helio hay una *sobra* de masa que aparece como energía liberada al espacio. La figura 2.2 muestra de manera esquemática este fenómeno.

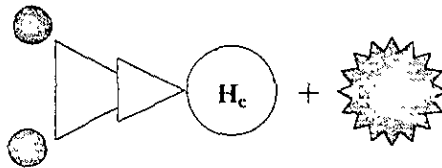


Figura 2.2 Reacción termonuclear en el interior del Sol

Esta energía que es liberada al espacio es emitida en un variante de frecuencias, la tabla 2.1 muestra el tipo de energía emitida por el Sol de acuerdo a su longitud de onda dando además un tanto por ciento de la contribución en el espectro electromagnético.

Tabla 2.1 Tipo de energía emitida por el sol.

Longitud de onda λ (μm)	Tipo de radiación	Contribución en el espectro electromagnético.
0.200 - 0.315	Ultravioleta medio	2.00%
0.315 - 0.380	Ultravioleta cercano	5.30%
0.380 - 0.780	Visible	43.50%
0.720 - 2.500	Infrarojo cercano	36.80%

Este continuo de frecuencias, cargado de fotones a diferentes niveles de energía da como resultado lo que se le ha denominado como espectro solar, constituido por los rayos ultravioleta, la luz visible, y el infrarrojo descritos en la tabla 2.1. En el libro de Duffie y Beckman se hace referencia a la curva característica del espectro solar fuera de la atmósfera de esta manera: *una curva estándar espectral de irradiancia puede ser compilada basándose en medidas de elevación, altitud y espacio*[12]. La figura 2.3 exhibe la curva de distribución espectral de radiación solar fuera de la atmósfera, a que se hace referencia.

Las combinaciones de tres factores distancia Tierra-Sol, diámetro solar y temperatura del Sol determinan un flujo luminoso, es decir un flujo de energía que incide sobre la superficie de la Tierra. Este flujo sobre la atmósfera terrestre se puede considerar como una cantidad de radiación solar casi constante. De esta manera, definimos a la constante solar G_{sc} como el flujo proveniente del Sol, que incide sobre una superficie de área unitaria perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media Tierra-Sol, fuera de toda atmósfera. El valor comúnmente aceptado para G_{sc} ha variado en los últimos años, según las técnicas que se han usado lo cual no indica que haya variado en sí esta magnitud. El valor usado en este trabajo será de 1353 W/m^2 .

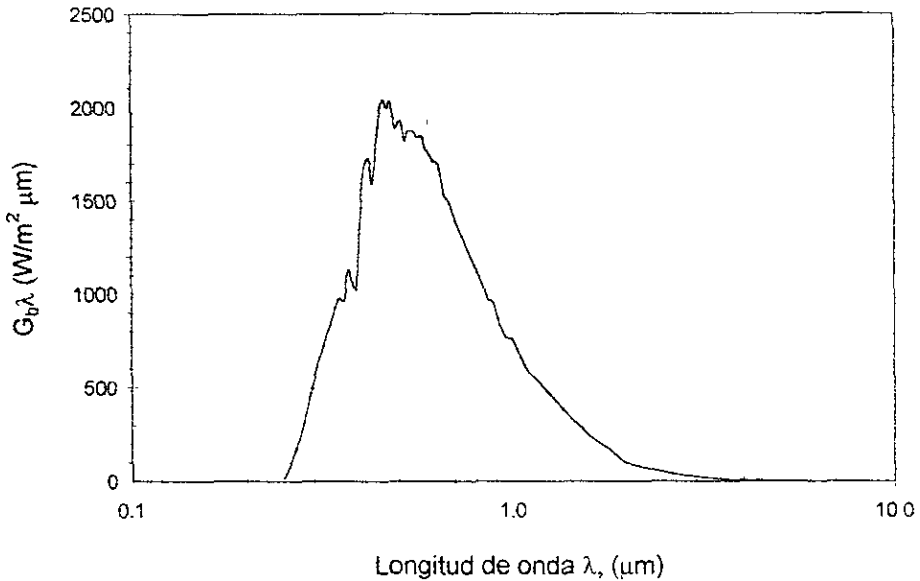


Figura 2.3 Curva de distribución espectral de radiación solar fuera de la atmósfera.

Modelado de la radiación solar.

Cabe mencionar, que los cuerpos que no se encuentran a la temperatura del cero absoluto emiten calor en forma de radiación. La intensidad, composición espectral y distribución angular de esta emisión depende de la naturaleza y la temperatura del cuerpo en cuestión.

El Sol a casi 6 000 °C en su superficie, es un cuerpo que emite radiación en un intervalo de 0.2 a 10 μm de longitud de onda, del espectro electromagnético; en este intervalo la radiación es llamada radiación térmica.

La ecuación de Planck que gobierna el fenómeno de radiación, para un cuerpo negro en estado de equilibrio termodinámico, es decir el cuerpo se encuentra a temperatura uniforme con el medio que le rodea, establece que:

$$E_{b,\lambda} = \left[\frac{(C_1)(\lambda^{-5})}{\exp^{(C_2/\lambda T)} - 1} \right] \quad 2.2$$

donde:

$E_{b,\lambda}$ Potencia emisiva monocromática de cuerpo negro, en (W/m²-μm)

λ Longitud de onda en (μm)

T Temperatura de cuerpo negro °K

C_1 Es igual a $2(\pi)(hc_0^2) = 3.74 \times 10^{-16} \text{ W-m}^2$

C_2 Es igual a $(hc_0/k) = 1.44 \times 10^{-2} \text{ m-K}$

además:

$c_0 = 3.00 \times 10^8 \text{ m/seg}$ velocidad de la luz

$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ joule-seg}$ constante de Planck

$k = 1.38 \times 10^{-20} \text{ joule/K}$ constante de Boltzmann

La figura 2.4 muestra la comparación entre la distribución de cuerpo negro, a 5782 °K, obtenida a partir de la ecuación 2.2 y la distribución del espectro solar fuera de la atmósfera. Las diferencias de aproximación entre estas curvas se debe principalmente a que en las diferentes regiones espectrales del Sol existen distintas temperaturas de cuerpo negro.

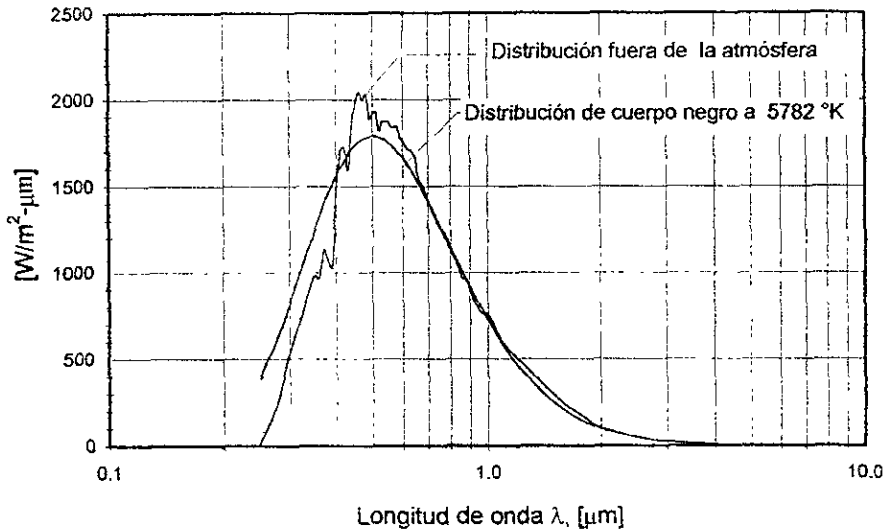


Figura 2.4 Comparación entre la distribución de cuerpo negro, a 5782 °K, según la ecuación de Planck y la distribución del espectro solar fuera de la atmósfera.

2.2 SISTEMAS DE CONVERSION FOTOTERMICA.

Un colector solar es un dispositivo intercambiador de energía, que transforma la energía solar concentrada en calor, calor que es transferido a un fluido de trabajo mediante los mecanismos de transferencia de calor. Debido a sus características principales se puede dividir a los colectores solares de conversión fototérmica en dos grandes grupos a saber como:

Colectores solares planos.

Son dispositivos que interceptan y absorben la energía del flujo del rayo solar, utilizando para este propósito un sistema denominado trampa térmica que consiste básicamente en una superficie plana con cubierta exterior de vidrio y con revestimiento interior de una película ennegrecida u otra altamente absorbente (superficie selectiva) que mediante tubos generalmente de cobre de diámetros de hasta $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro hacen pasar el fluido absorbedor del calor. En el mejor de los casos para flujos de 1100 W/m^2 (cercano al valor de la constante solar 1353 W/m^2) de radiación solar incidente, estos dispositivos llegan a alcanzar temperaturas hasta de $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Colectores solares concentradores.

También llamados sistemas termosolares de concentración, son dispositivos que incrementan el flujo radiativo solar mediante superficies colectoras reflejantes o refractantes; el flujo incrementado lo hacen incidir en el receptor del sistema. El incremento de la radiación solar que se recibe del colector, llega a ser hasta del orden de varios miles de veces la proveniente del Sol; con esos flujos radiativos concentrados se pueden alcanzar temperaturas para hornos fundidores de acero del orden de los mil grados centígrados.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre es atenuada durante el paso a través de la atmósfera por varios factores. De la cantidad total que logra llegar una parte lo es en forma directa y la otra en indirecta, a estas se les ha denominado como radiación directa y difusa respectivamente. Los colectores solares concentradores aprovechan solo la radiación directa. La importancia de estos radica por lo tanto en incrementar este tipo de radiación interponiendo entre la

trayectoria del rayo y el absorbedor un sistema óptico. Las configuraciones del sistema óptico para dispositivos colectores concentradores son variadas, la figura 2.5 muestra las comúnmente utilizadas

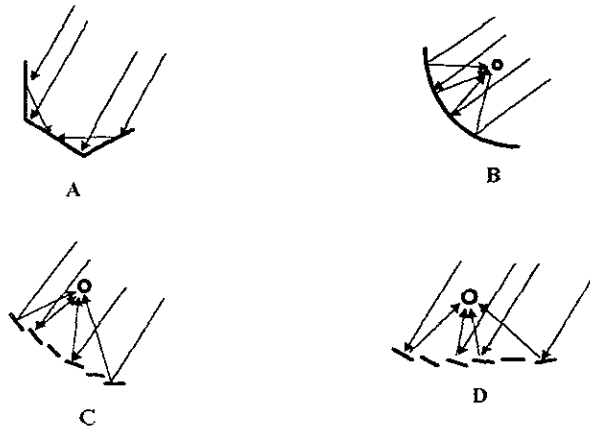


Figura 2.5 Principales Configuraciones de Concentradores: (a) Recibidor Plano con Reflectores Planos ; (b) Concentrador Parabólico ; (c) Reflector Fresnel ; (d) Campo de Helióstatos.

Dentro de los sistemas termosolares de concentración, atendiendo aquellos sistemas que convierten la energía solar en eléctrica se han propuesto tres tipos de sistemas térmicos:

1. **Sistemas de foco lineal.** Sistemas que reciben este nombre debido a que concentran la energía en un receptor tubular, ubicado en la línea de los colectores de canal parabólico

2. Sistemas de foco puntual con receptor central. Reciben este nombre los sistemas que emplean grandes campos de reflectores (heliostatos) que siguen al Sol para concentrar el rayo solar en un receptor situado en la parte superior de una torre.
3. Sistemas de foco puntual plato-receptor. Son sistemas que usan un plato parabólico para reflejar el rayo solar y hacerlo incidir en un receptor colocado en el punto focal del sistema óptico.

2.3 TEORIA SOBRE COLECTORES SOLARES CONCENTRADORES.

Razón de concentración.

Un concepto fundamental en concentración solar es, la razón de concentración de un colector, las dos definiciones naturales que se pueden dar de concentración son: La razón de área o geometría y la razón debida al flujo. La figura 2.6 muestra un esquema simplificado de un concentrador solar, donde se puede apreciar los elementos que intervienen en estos conceptos.

La concentración de área se define como la razón entre el área de apertura y el área del receptor; esto es:

$$C_g = A_a / A_r \quad 2.3$$

donde:

- C_g Razón de concentración geométrica. (adimensional)
- A_a Area de la aceptación del concentrador en m^2 .
- A_r Area del receptor en m^2 .

La concentración de flujo está definida como la razón de flujo de energía promedio sobre el receptor y sobre el área de apertura.

$$C_f = I_r / I_a \quad 2.4$$

donde: C_f Razón de concentración de flujo. (adimensional)

I_r Intensidad de flujo que llega al receptor

I_a Intensidad de flujo que llega al colector.

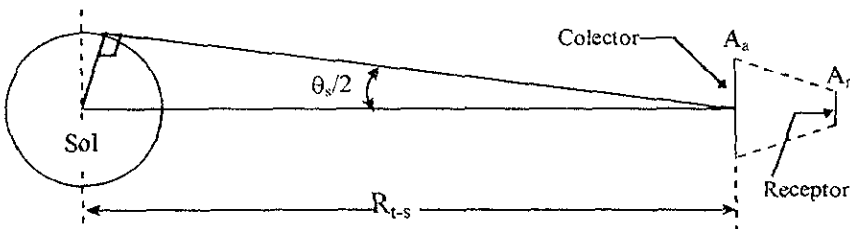


Figura 2.6 Relaciones geométricas de concentración.

Balance de energía en el receptor del sistema.

En el receptor de un sistema de concentración solar se puede efectuar un balance de energía, en base a la primer ley termodinámica la cual menciona que la energía no se crea ni se destruye simplemente se transforma. La figura 2.7 ilustra un diagrama de las energías que intervienen en sistema de concentración solar.

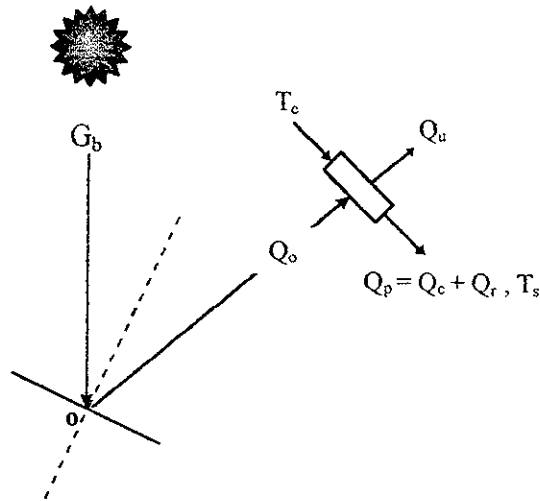


Figura 2.7 Balance térmico en el receptor del sistema solar de concentración.

Mediante un balance de energía en el receptor tenemos que la energía que llega al receptor esta dada por:

$$\alpha Q_o = Q_u + Q_p = Q_u + Q_c + Q_r \quad 2.5$$

donde:

1. La energía que absorbe el sistema es:

$$\alpha Q_o = \alpha G_b \rho_o F_s A_a \quad 2.6$$

donde: α absortividad del material
 Q_o energía que llega al receptor
 G_b radiación solar directa

ρ_c	especificidad de espejo
F_s	factor de sombreamiento
A_a	área de aceptación del concentrador

2. La energía útil que se remueve del receptor es:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad 2.7$$

donde:	\dot{m}	flujo másico del fluido térmico
	C_p	capacidad calorífica del agua
	T_e	temperatura a la entrada del receptor
	T_s	temperatura a la salida del receptor

3 La energía perdida al medio ambiente por convección y radiación, esta dada por:

$$Q_p = Q_c + Q_r = h_c A_r (T_p - T_a) + \epsilon \sigma F_{r-c} A_r (T_p^4 - T_c^4) \quad 2.8$$

donde:	A_r	área de apertura del receptor
	T_p	temperatura de placa
	T_c	temperatura de cielo
	h_c	coeficiente de pérdidas convectivas
	ϵ	emisividad
	σ	constante de Stefan-Boltzman
	F_{r-c}	factor de forma receptor-concentrador

Sustituyen las expresiones anteriores en 2.5, tenemos:

$$G_b \rho_e \alpha_r F_s A_a = m C_p (T_s - T_e) + h_c A_r (T_p - T_a) + \varepsilon \sigma F_{r-c} A_r (T_p^4 - T_c^4) \quad 2.9$$

La eficiencia térmica del sistema de concentración solar, estará dada por:

$$\eta_c = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_a)}{G_b A_a} \quad 2.10$$

Óptica de espejos parabólicos.

Para comprender como opera un sistema de concentración solar es necesario como principio fundamental describir las propiedades ópticas del concentrador, para con ello dar una aproximación teórica del ancho de la imagen que se produce. Teóricamente las imágenes producidas por sistemas de concentración solar debidamente alineados y considerando una reflectancia especular igual a la unidad, dependen solo de las relaciones geométricas del concentrador. La figura 2.8 muestra el cruce de las secciones de un concentrador solar parabólico.

La ecuación de la parábola en términos del sistema coordenado x - y mostrado esta dada por:

$$y = x^2 / 4f \quad 2.11$$

donde f es la distancia focal del sistema y la apertura o radio del espejo esta dada por a . De esta manera, sea un rayo solar I incidiendo en la orilla en el punto B de la

parábola y θ_r el ángulo formado en la abertura AB llamado ángulo de orilla. Dado por:

$$\theta_r = \tan^{-1} \left[\frac{8(f/a)}{16(f/a)^2 - 1} \right] \quad 2.12$$

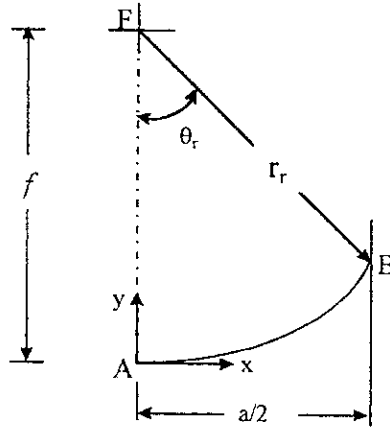


Figura 2.8 Geometría para un concentrador parabólico[12].

Por otro lado, un rayo solar incidente en realidad no es una línea recta, si no un cono solar con un ancho angular de 0.53° equivalentes a $32'$ de arco, siendo este el ángulo θ_s en que es visto el Sol por un observador en la Tierra. Para propósitos de presentación asuma que, el concentrador representado en la figura 2.9 es simétrico y que la radiación solar es normal a la apertura. Así la radiación reflejada desde una orilla en el punto B de la parábola, determina en el plano focal punto F, el ancho de la imagen solar W , calculado a partir de:

$$W = \left[\begin{array}{c} a \text{ sen } 0.267 \\ \text{sen } \theta, \text{ cos}(\theta, + 0.267) \end{array} \right] \quad 2.13$$

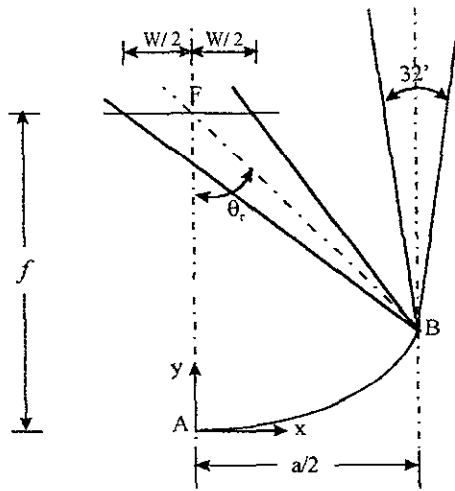


Figura 2.9 Tamaño de la imagen en un concentrador parabólico con geometría simétrica.

2.4 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE CONCENTRACION SOLAR DEFRAC.

Descripción general.

El DEFRAC (Dispositivo para el Estudio de los Flujos Radiativos Concentrados), es un dispositivo de concentración solar de foco puntual con 18 facetas especulares con una reflectividad de 0.92, montadas sobre una estructura con dos grados de libertad que permite el seguimiento aparente del sol. Los espejos son de primer superficie de vidrio aluminizado de 30 cm de diámetro, el sistema óptico en su conjunto tiene una distancia focal equivalente de 200 cm. [13]. La figura 2.10 muestra un esquema general del DEFRAC, en el cual se observan los principales elementos que lo componen.

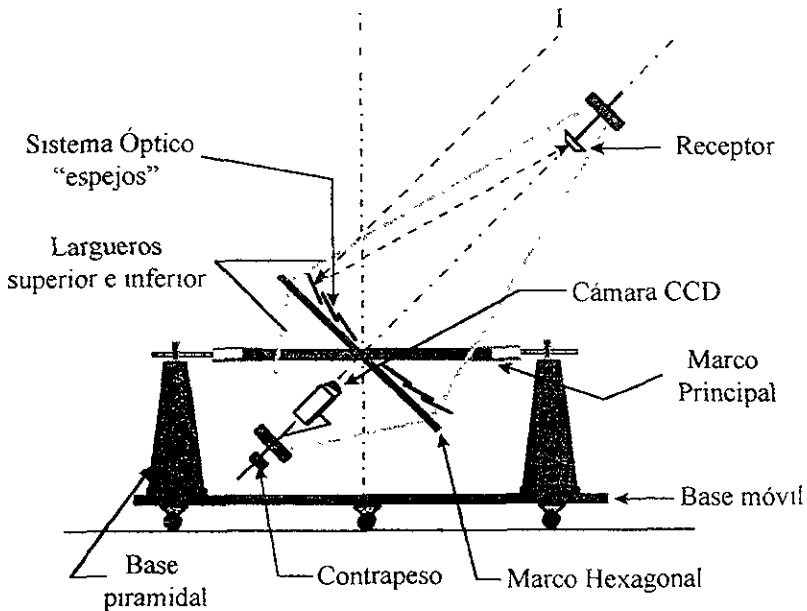


Figura 2.10 Esquema general del DEFRAC.

Componentes principales.

El dispositivo consiste básicamente de dos marcos; uno principal y otro hexagonal. El marco hexagonal es un elemento estructural de acero al carbón sobre el cual se montan 18 espejos parabólicos que sirven como superficies reflexivas concentradoras. Hay tres grupos de espejos que varían dependiendo de sus distancias focales, a saber como: el grupo A con 201, el grupo B con 202 y el grupo C con 202.5 centímetros. El marco hexagonal tiene dos flechas laterales que le proporcionan un eje de giro. Estas flechas se colocan en chumaceras que a su vez, están montadas sobre el marco principal. Las características estructurales de ambos marcos son especiales dado que se requieren estructuras rígidas, ligeras y fácil de manejar.

En tres de las aristas del marco hexagonal se localizan los cilindros soportes para los tres largueros superiores y los tres inferiores que a su vez sujetan en la parte superior al sistema receptor de la radiación concentrada y en la parte inferior a los elementos de ajuste de contrapeso para equilibrar al sistema así como a la cámara de video (CCD-COHU4800) que capturará la imagen solar concentrada. La figura 2.11 muestra una vista superior del marco hexagonal en la cual se identifican cada uno de los espejos, mediante una letra para el tipo y mediante un subíndice para el número.

El marco principal tiene forma irregular con extremos que simulan las alas de un avión, sobre cuyos centros se localizan unas flechas que le dan un segundo eje de giro, el plano formado por este marco se orienta de forma tal que se consiga mantener normales los rayos solares a este plano de acuerdo a la hora del día (ángulo de incidencia = 0°). Las alas se unen por medio de dos largueros huecos de perfil tubular hueco de sección "I". Las dos flechas de esta sección van a su vez montadas sobre otra sección que son dos pedestales de forma piramidal que van fijos a la base móvil. En la figura 2.12 se muestra al marco principal y los pedestales.

El marco principal se ha diseñado de manera funcional tomando en cuenta que las alas no vayan a obstruir los rayos solares en verano e invierno que es cuando llegamos a una declinación máxima.

El soporte móvil es un marco rectangular construido con largueros de canal "C" de acero y cuyo ancho coincide con el de las bases piramidales. Esta base además

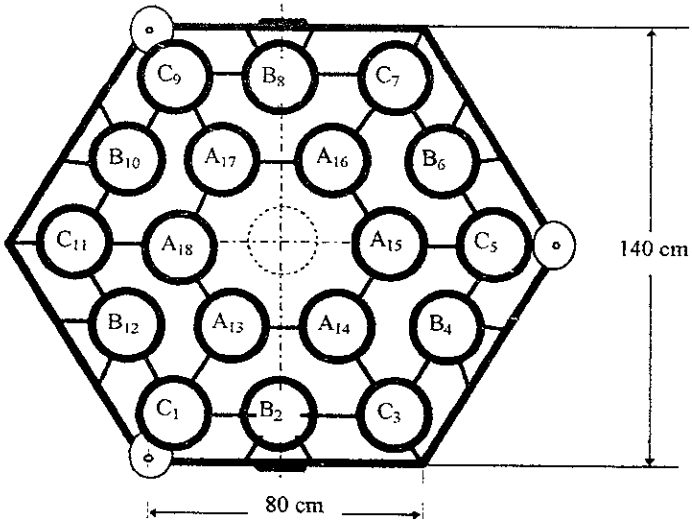


Figura 2.11 Marco hexagonal.

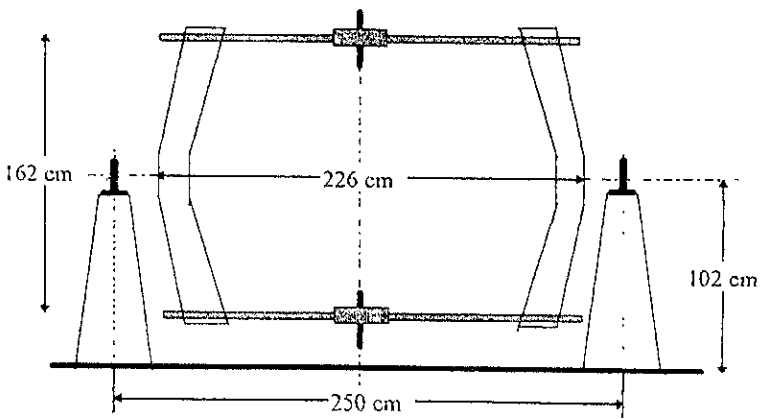


Figura 2.12 Marco principal y bases piramidales

tiene extensiones laterales de forma triangular con dos ruedas laterales en los extremos, esto es con el propósito de darle a la base y al conjunto, una vez armado mayor versatilidad en su desplazamiento y a su vez estabilidad, ya que la base se diseñó tomando en cuenta cualquier empuje lateral sin provocar que el sistema se voltee al desplazarlo, ver figura 2.13.

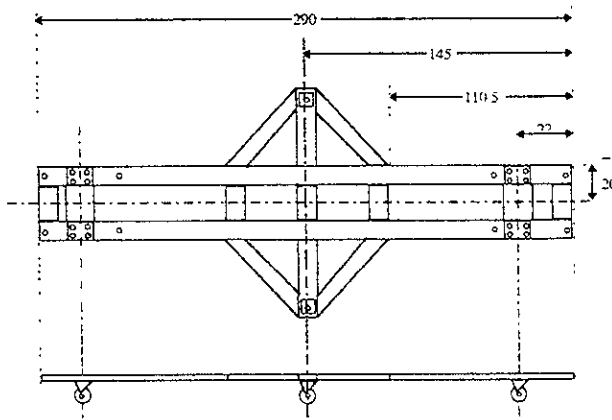


Figura 2.13 Base móvil (Dimensiones generales en cm).

Límites en el movimiento de operación.

El seguimiento de la trayectoria solar en el DEFRAC requiere de dos ejes de movimiento y una corrección del ángulo del zeni, cada 4 minutos aproximadamente. El movimiento que sigue la posición del sol de acuerdo a la hora solar del día, corresponde al marco movimiento del marco principal, dado su apoyo en las bases su eje queda en posición horizontal y su movimiento está limitado a un ángulo de rotación de $\pm 90^\circ$ como máximo, ver figura 2.14.

El segundo movimiento, en el cual se hace la corrección, corresponde al marco hexagonal, el movimiento alrededor de este eje asegura la perpendicularidad de los rayos solares sobre el plano hexagonal que contiene los paraboloides. Dicho movimiento está limitado a la altitud del sol de acuerdo a la estación del año, se mide como el ángulo del zenit que es el complemento de la altitud solar y que se observa en el esquema de la figura 2.15.

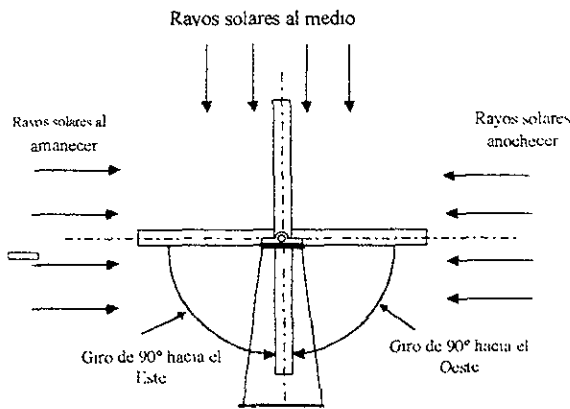


Figura 2.14 Límites del movimiento para el marco principal.

2.5 ÓPTICA DEL SISTEMA

La óptica del sistema consiste principalmente de 18 espejos parabólicos de primera superficie colocados sobre bases que los sujetan (unidas a las bases redondas del marco hexagonal) estas bases son ajustadas por medio de tornillos y resortes en tres posiciones con lo cual se logra dirigir la superficie del espejo según se requiera, la figura 2.16 muestra la fotografía de uno de los soportes de espejos en la cual se puede apreciar la manera en que son montados estos y apreciar el mecanismo de ajuste de espejo. Este conjunto de espejos está dispuesto de tal

forma que se logre un concentrador único. El objetivo es lograr de la forma más sencilla que la radiación solar incidente en los 18 espejos se concentre sobre un mismo plano y región focales.

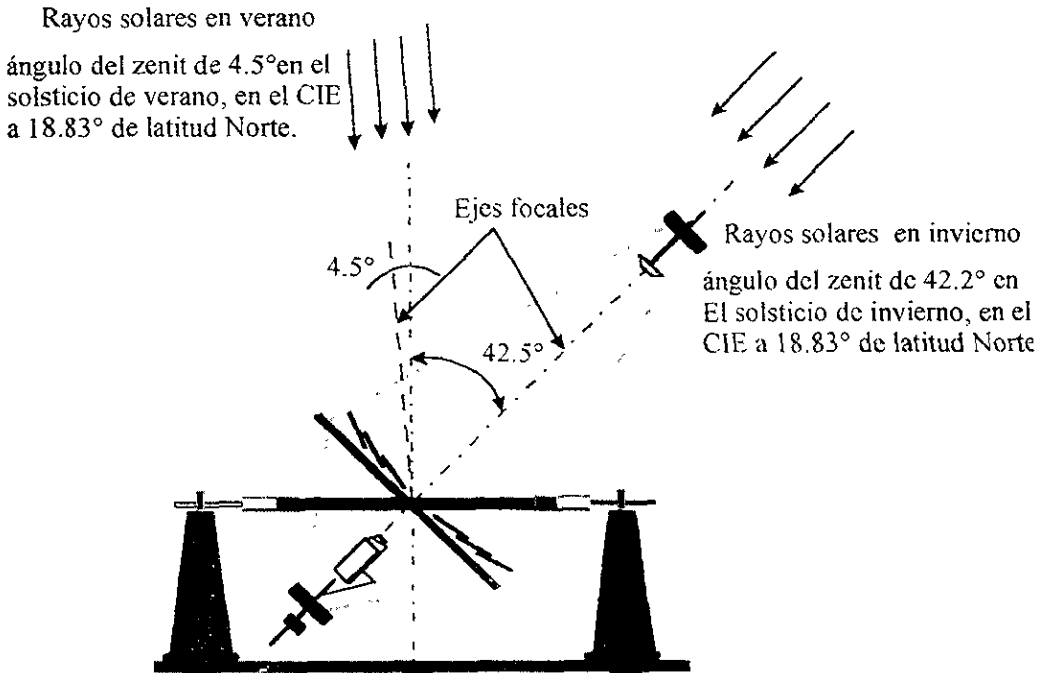


Figura 2.15 Límites de movimiento para el marco hexagonal.

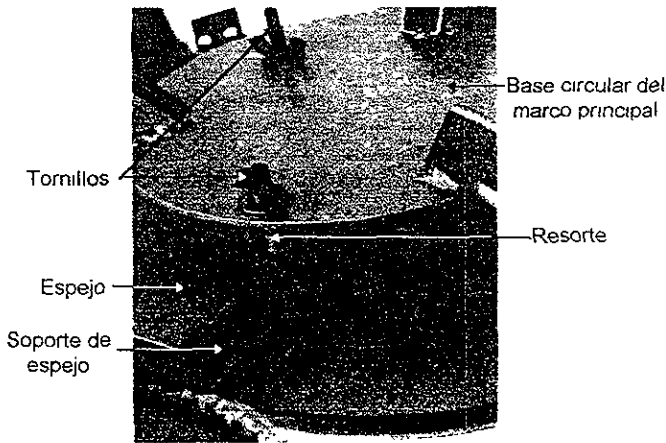


Figura 2.16 Montaje de los espejos.

Características ópticas de los espejos.

Los espejos son paraboloides de vidrio común de ventana con un diámetro de 300 mm y de 19 mm de espesor, con una distancia focal de 2 metros \pm 1%. La superficie parabólica está recubierta con aluminio (primera superficie), cuya elaboración consiste en la evaporación al alto vacío de aluminio, con protección de monóxido de silicio, la cara posterior está esmerilada y biselada en ambas caras. El aluminio tiene una alta reflectancia de 0.90 a 0.92, se adhiere bien a la superficie de vidrio y no se sulfata en atmósferas naturales. Los óxidos de silicio tienen una absorción fuerte en la atmósfera en la región de 9-10 μm , sin embargo en la región del espectro terrestre (0.3 a 2.5 μm) la absorción mencionada no afecta. La película de SiO_2 tiene una buena afinidad con el aluminio, por lo tanto es una excelente película protectora para el mismo[14].

Tamaño teórico de imágenes formadas por los espejos tipo A,B, y C.

El tamaño de imagen se puede determinar mediante geometría simple, para ello se hace necesario determinar la posición para cada tipo de espejo (ver figura 2.10) mediante la distancia del centro del hexágono al centro del espejo y mediante el ángulo de inclinación, que variara para cada tipo de espejo. La figura 2.17 muestra al marco hexagonal y la posición de tres espejos un espejo A, uno B y uno C, la figura indica además las distancias de O a Q de 80 cm y la distancia calculada de O a R de 69.28 cm. En base a esta información se determinan las distancias del centro del hexágono al centro de cada uno de los espejos, de la manera siguiente:

Sobre la línea que va de O a Q determinamos el espaciamiento entre espejo S a partir de:

$$\overline{OQ} = 2(30) + 15 + 3s \quad 2.14$$

entonces:

$$S = \left[\frac{\overline{OQ} - 75}{3} \right] = 1.666 \text{ cm} \quad 2.15$$

conociendo el espaciamiento entre espejo sabremos que:

La distancia $\overline{OA} = 15 + 15 + 1.666 = 31.666 \text{ cm}$

La distancia $\overline{OB} = 69.28 - 15 - 17 = 37.28 \text{ cm}$

La distancia $\overline{OC} = 30 + 15 + 15 + 2(1.666) = 63.332 \text{ cm}$

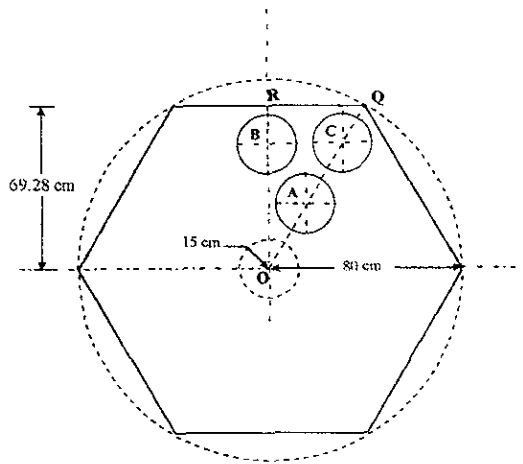


Figura 2.17 Posición de los espejos del tipo A, B, y C.

Una vez determinadas las distancias del centro del hexágono al centro de cada tipo de espejo, por relaciones geométricas determinamos la inclinación necesaria para el alineamiento, asociada a cada espejo. Sea la figura 2.18 en donde se muestra la relación geométrica que guarda cada tipo de espejo, a partir de ella se determina los ángulos de inclinación de la manera siguiente.

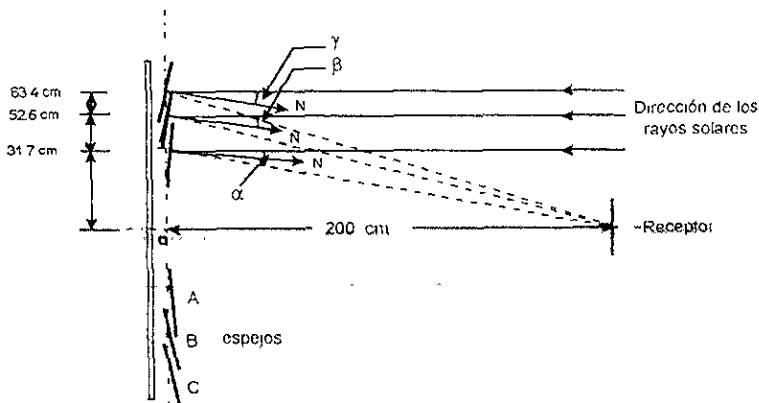


Figura 2.18 Inclinación de espejos respecto a la vertical que pasa por el origen

A partir de la relación geométrica gobernante para cada caso, se deduce que:

$$\tan 2\alpha = 31.66 / 200 \quad \alpha = 4.52^\circ$$

$$\tan 2\beta = 52.61 / 200 \quad \beta = 7.40^\circ$$

$$\tan 2\gamma = 63.33 / 200 \quad \gamma = 8.82^\circ$$

El tamaño de imagen para cada tipo de espejo estará en función de este ángulo de inclinación y por consiguiente de la distancia del centro del sistema al centro del espejo según sea el tipo. La figura 2.19 muestra la geometría en la que se determinará el tamaño de imagen para un espejo tipo A mostrando el procedimiento, y de manera análoga deberá hacerse para los espejos del tipo B y C de los cuales solo se mostrarán los resultados.

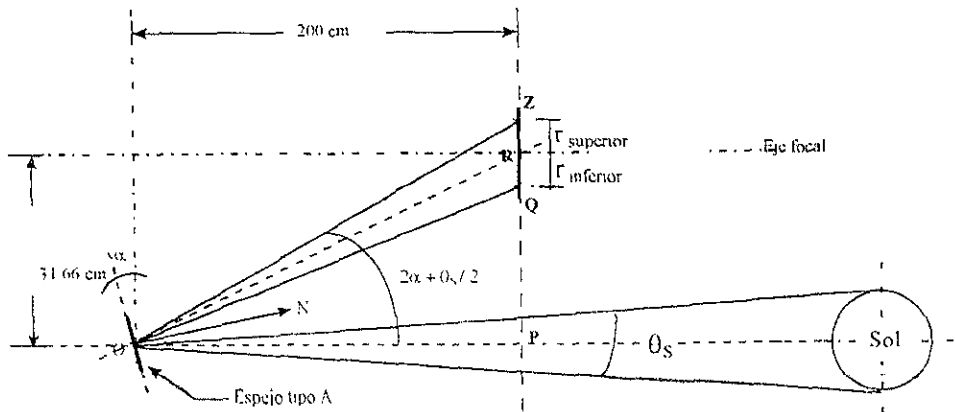


Figura 2.19 Tamaño de imagen formada para el espejo tipo A, para un ángulo α entre el rayo incidente y la normal a la superficie del espejo.

De la figura 2.19 deducimos dos valores r_{superior} y r_{inferior} , donde $r_{\text{inferior}} < r_{\text{superior}}$, debido a que el cono de luz reflejado es cortado por la línea vertical QZ. Los dos valores de r están dados por:

$$r_{\text{inferior}} = 3166 - \overline{QP} \quad 2.16$$

$$r_{\text{superior}} = \overline{PZ} - 3166 \quad 2.17$$

Es conveniente determinar el valor mayor r_{superior} ya que será el tamaño al que corresponda la imagen en teoría. Debido a que el espejo colocado en el extremo opuesto del concentrador corregirá el error. Entonces mediante el triángulo OPZ tenemos que:

$$\tan\left(2\alpha + \frac{\theta_s}{2}\right) = \frac{\overline{PZ}}{\overline{OP}} \quad 2.18$$

entonces

$$\overline{PZ} = (200)(\tan(2(4.5) + 0.265)) = 3263 \text{ cm}$$

por lo tanto, sustituyendo en 2.17 tenemos:

$$r_{\text{superior}} = (3281 - 3166) = 115 \text{ cm} \Rightarrow D_p = 2(115) = 2.3 \text{ cm}$$

Repitiendo el procedimiento, de manera análogo para espejos tipo B y C, tenemos:

$$r_{\text{superior}} = 53.83 - 52.61 = 1.22 \text{ cm} \Rightarrow D_p = 2(1.22) = 2.44 \text{ cm}$$

$$r_{\text{superior}} = 64.61 - 63.33 = 1.28 \text{ cm} \Rightarrow D_p = 2(1.28) = 2.56 \text{ cm}$$

3. TEORÍA DE TRAZADO DE RAYOS Y CÓDIGO CIRCE2.

Circe2 y Dekgen2 son herramientas de análisis y diseño para el estudio y la optimización de sistemas de concentración solar del tipo plato-receptor de foco puntual, de una o varias facetas. Circe2 es un programa de computo basado en la teoría de trazado de rayos que, simula la incidencia de los rayos solares en superficies reflectoras prediciendo mediante el uso de las leyes de la óptica geométrica, la distribución del flujo radiativo concentrado y determinando mediante integración numérica, la potencia total incidente en el receptor. Dekgen2 se utiliza para generar el archivo de entrada (INPUT) el cual contiene la información necesaria del modelado del concentrador. que posteriormente será procesada por Circe2 [15]. Ambos programas fueron desarrollados en Sandia National Laboratories, en Albuquerque New Mexico, y han sido validados mediante corridas del programa en aplicación a sistemas de concentración solar tales como el concentrador con un plato parabólico de 7 m de radio localizado en Shenandoah, Georgia.

En el trabajo de tesis presentado por Riveros, *Curvas de Distribución de Energía de un Concentrador de 19 espejos parabólicos*, se desarrolla un programa de trazado de rayos considerando por un lado, de entrada espejos ideales en los cuales se puede modelar imperfecciones originando con ello errores de desviación angular del rayo solar reflejado y por otro lado considera al sol como un disco de emisividad uniforme y diámetro de medio grado. Esta técnica de trazado de rayos utilizada consiste básicamente en la fragmentación del disco solar y de cada uno de los 18 espejos parabólicos, en segmentos con áreas equivalentes, en el receptor se

efectúa un emallado de tal manera que a cada nodo le corresponde una posición en coordenadas (x,y) . La idea es que, un rayo de luz puntual, no en forma de cono como lo considera Circe2, proveniente de una sección del sol fragmentado incida en cada sección en que fue fragmentado uno de los espejos, para de esta manera predecir las posiciones (x,y) que el rayo reflejado golpeará al receptor, y así formar la imagen solar reflejada por este espejo.

Ahora bien, en las primeras tres secciones de este capítulo, se explica la teoría de trazado de rayos en la que Circe2 se basa para predecir el comportamiento de la distribución del flujo radiativo concentrado en el plano focal de los sistemas termosolares de concentración de foco puntual.

3.1 OPTICA SOLAR EN SUPERFICIES REFLECTORAS PERFECTAS.

Si consideramos al sol como una fuente de energía en forma circular y no puntual, entonces la irradiación en un punto sobre la superficie reflectora será vista como un cono de rayos y no como un solo rayo, como lo ilustra la figura 3.1. Así los rayos originados del diámetro a través del disco solar tendrán una variación vectorial en magnitud con respecto al rayo solar central, originando con ello una variación de la energía incidente en cada punto del disco solar. Por lo tanto, la distribución angular de energía con respecto al rayo solar central es llamada **imagen solar**. Para superficies reflectoras perfectas es decir donde el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, las absorptividades se consideran nulas y la especularidad del espejo es igual a uno, el cono solar incidente tendrá las mismas proporciones que el cono solar reflejado y por tanto, toda la energía dentro de una longitud de onda dada incidente sobre la superficie será especialmente

reflejada. La distribución de energía reflejada será llamada la imagen solar reflejada o bien como solar reflejado.

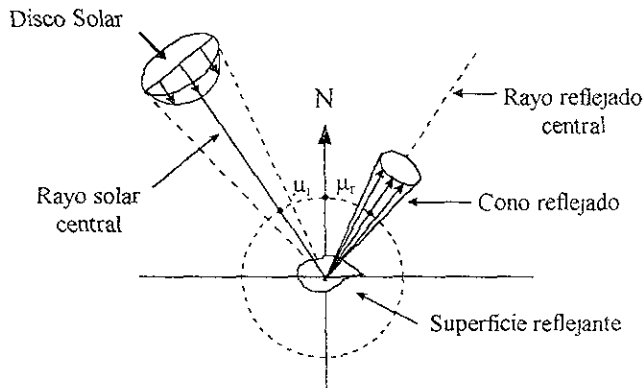


Figura 3.1 Disco solar y cono solar reflejado, en superficie perfecta.

3.2 OPTICA SOLAR EN SUPERFICIES REFLECTORAS IMPERFECTAS.

Para una superficie imperfecta, también llamada superficie reflectora real, se tiene una superficie áspera que origina una desviación del rayo central reflejado de su normal ideal, generando una distribución solar reflejada difusa. En sistemas de concentración solar existen además, otras causas que originan errores en la desviación del rayo solar reflejado, atribuidas a la mal orientación del plano del espejo respecto al punto focal del sistema y a las desviaciones a causa del sistema de seguimiento de la trayectoria solar. Una función de distribución puede ser asociada a tales errores de desviación, llamada como distribución del cono error, que será discutida a detalle posteriormente. La figura 3.2 muestra como la distribución de energía reflejada depende de la distribución angular incidente y de la distribución asociada a los posibles errores de desviación. Dicho de otra manera,

la convolución integral de las dos últimas distribuciones mencionadas generaran la distribución angular reflejada que será en su momento la interceptada.

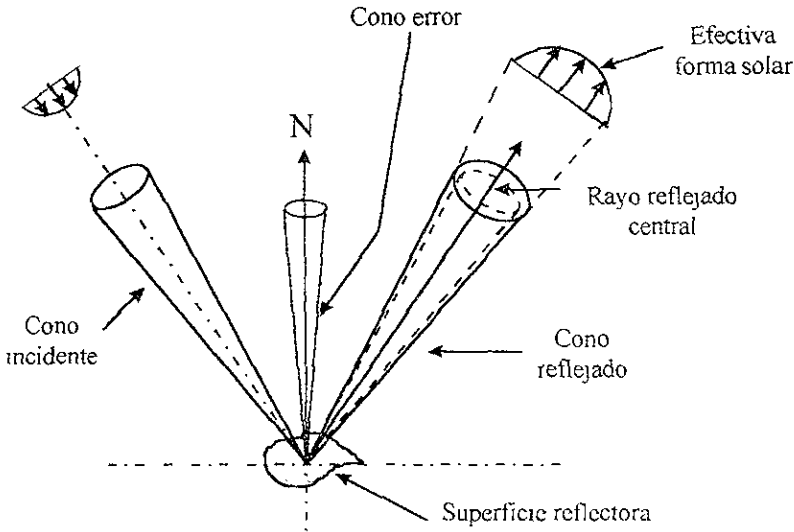


Figura 3.2 Imagen solar reflejada en superficies reflectoras reales.

3.3 APLICACION PARA SISTEMAS COLECTORES CONCENTRADORES.

Cirece2, para modelar sistemas colectores concentradores considera aspectos referentes a la posición del sol, la posición del receptor y la distancia focal del sistema. Tales localizaciones se hacen dentro de un marco referencial absoluto (X,Y,Z) , como se ilustra en la figura 3.3, en la cual la posición del sol esta definida por el vector $(V_{s,i} + V_{s,j} + V_{s,k})$, para el receptor la localización estará dada por un segundo sistema (1-2-3) donde su origen P es un punto sobre el plano de referencia, dado por las coordenadas (X_0, Y_0, Z_0) , así teóricamente la distancia OP corresponde a la distancia focal del sistema.

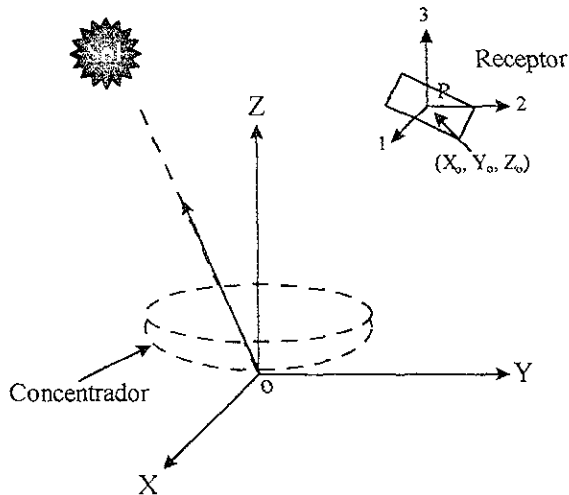


Figura 3.3 Sistema coordenado general para un concentrador parabólico.

Otro aspecto de importancia al modelar un concentrador solar, es la cuantificación de la energía solar reflejada o bien la energía solar interceptada por el receptor del sistema. Para propósitos de computación numérica, Circe2 divide a una faceta en pequeñas superficies reflejantes llamadas *subfacetas*. Entonces, Circe2 determina el flujo total interceptado por el receptor mediante la suma de las contribuciones de cada una de las subfacetas en que se ha dividido al concentrador.

3.4 DISTRIBUCION DE LA FORMA SOLAR.

En Circe2 se define la forma solar como la distribución angular de los rayos solares incidentes, alrededor del rayo solar central entrante. Considerando una superficie reflectora perfecta entonces, la forma solar reflejada será la misma que

la forma solar incidente para dicha superficie. De esta conveniente manera Circe2 determina la distribución de la forma solar reflejada para obtener la forma solar incidente. En la figura 3.5 el cono reflejado ilumina un área circular sobre el plano de referencia del rayo reflejado, plano normal al rayo central reflejado y de distancia OP unitaria

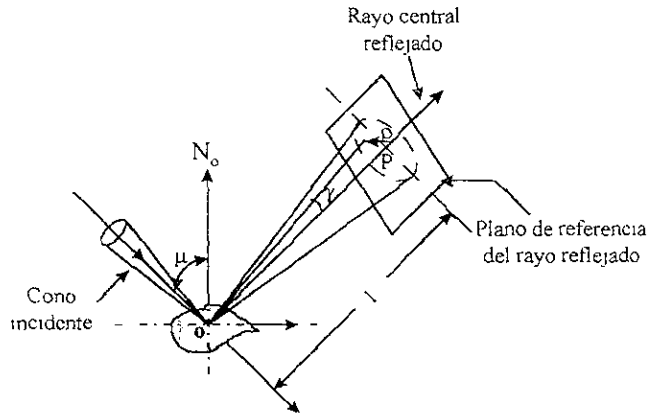


Figura 3.4 Conos de rayos incidente y reflejado para una superficie perfecta.

Así ρ de la figura 3.4 esta dada por $(1)(\tan \gamma)$. al integrar el valor de ρ sobre el área iluminada Circe2 determina la forma solar dada por la siguiente ecuación

$$\tilde{S}(\rho) = I\tilde{S}(\rho) \quad 3.1$$

donde ρ es el ángulo formado del rayo solar central al límite de la iluminada región, donde ésta propiamente tenga una intensidad igual a cero

Para efectos del programa numérico, Circe2 maneja tres opciones para el modelado de la distribución de la forma solar dadas por el parámetro JSUN

- Para: JSUN=1 Una distribución de la forma solar es dada de manera tabular.
 JSUN=2 Tendremos una distribución de la forma solar dada en forma gaussiana.
 JSUN=3 Se tendrá una distribución de la forma solar uniforme.

Las distribuciones de la forma solar en la figura 3.5 son ejemplos representativos de estas opciones.

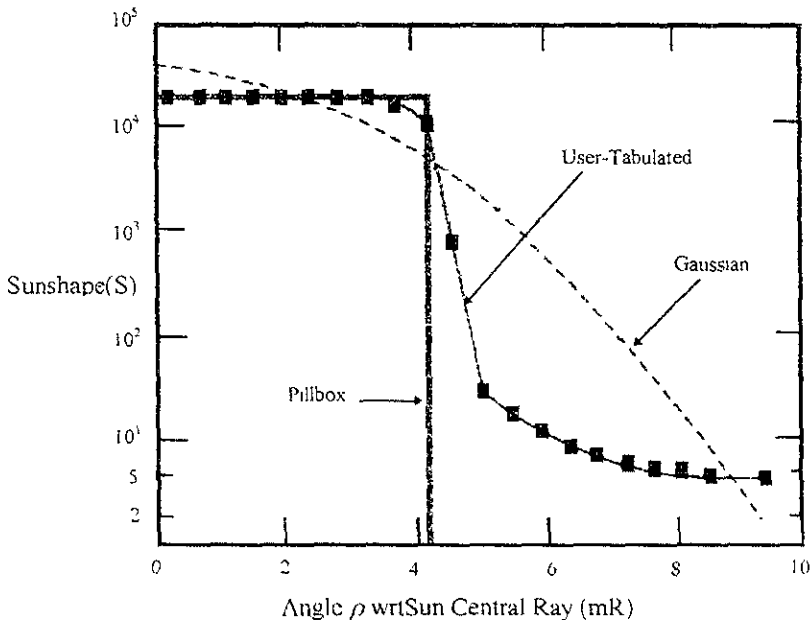


Figura 3.5 Modelado de la distribución de la forma solar.

La opción JSUN=1, asigna un valor de $S(\rho)$ en función del valor de ρ , de esta manera se construye una tabla de valores SVAL y RHO parámetros que corresponden al valor de $S(\rho)$ y de ρ respectivamente. Para un valor de $\rho=0$ se tendrá el centro del disco solar y por tanto la máxima intensidad, y para un valor

de $r \geq 4.9$ mrad la intensidad de la distribución solar se podrá considerar próxima a cero. El número del total de puntos tabulados es controlado por el parámetro NTABL y será mayor o igual a 50.

La opción JSUN=2 genera la distribución de la forma solar a partir de la función gaussiana de dispersión en una dimensión, donde \bar{S} es llamada la dispersión de la función de distribución, dada por la ecuación siguiente:

$$\hat{S} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] \quad 3.2$$

La opción JSUN=3 permite la especificación de una distribución de la forma solar uniforme o pillbox, definiendo el radio ρ que será controlado mediante el parámetro RHOEDGE; esta opción genera una distribución de forma solar normalizada a partir de la ecuación siguiente:

$$S = \frac{1}{\pi(\rho_{\text{odgo}})^2} \quad 3.3$$

3.5 DISTRIBUCION DEL CONO ERROR.

Las imperfecciones del sistema óptico, debidas a la especularidad del espejo, a los errores por dezañeamiento en la orientación del espejo y a los errores debidos al dezañeamiento por seguimiento solar, dan origen a una desviación del rayo central reflejado de la normal ideal, generando con ello una desviación de cada uno de los rayos que conforman al cono solar reflejado, formando así una imagen solar reflejada deformada. La probabilidad de la desviación de la normal ideal para cada

uno de los rayos reflejados, es modelada por Circe2 mediante una función error bidimensional, dada por la ecuación siguiente:

$$E_{2D}(\sigma, s) = \frac{1}{2\pi\sigma_r\sigma_s} \exp\left[-0.5\left(\frac{r^2}{\sigma_r^2} + \frac{s^2}{\sigma_s^2}\right)\right] \quad 3.4$$

para σ_r y σ_s definidas como las desviaciones correspondientes al semi-eje mayor y semi-eje menor, de la distribución del contorno trazado. La figura 3.6 muestra una sección de superficie reflectora asociada a un sistema coordenado ξ - η - ζ con origen en el centro de la superficie reflectora.

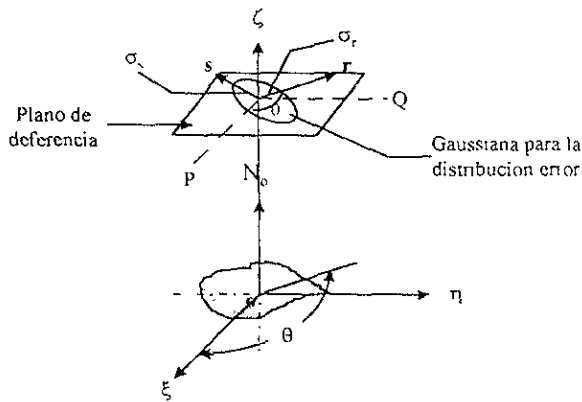


Figura 3.6 Distribución de error gaussiana.

Así, la elipse en el plano P-Q perpendicular al rayo solar central reflejado, representa la distribución error del sistema. Para este caso mostrado en la figura 3.6 el parámetro σ_r , definido por Dekgen2 como SIGR, describe la desviación standard en la dirección r y es más pequeño que σ_s , definido como SIGS, que

describe la desviación estándar en la dirección s . Para una simetría de la elipse en la figura 3.6, se tiene que σ_r será igual a σ_s por tanto la ecuación 3.10 se reduce a:

$$E_{10}(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-0.5 \frac{\vec{r}^2}{\sigma^2}\right] \quad 3.5$$

donde $\vec{r}^2 = (r^2 + s^2)^{1/2}$, y $\sigma_r = \sigma_s = \sigma$. En este caso, la rotación del ángulo θ será poco importante, este ángulo es definido por el parámetro THETA y representa el ángulo de rotación de la distribución error en la dirección y sentido mostrados en la figura 3.6.

3.6 DISTRIBUCIÓN DE LA FORMA SOLAR REFLEJADA

Para determinar la efectiva distribución de la forma solar reflejada o interceptada por el receptor. Circe2 convolucionará la distribución de la forma solar y la distribución del cono debido a todos los posibles errores de desviación del sistema de concentración solar. La figura 3.7 muestra para un rayo solar incidente \hat{A} un rayo solar reflejado \hat{B} desviado un ángulo μ_0 de la normal ideal \hat{N} representando en el plano P-Q la distribución del cono error y en el plano U-V la distribución de la reflejada efectiva forma solar.

Parámetros controladores de la convolución.

Dentro de Circe2 la instrucción IDIM es un parámetro que controla dimensionalmente al cono error, mediante dos posibles opciones:

- IDIM=1 Aproxima de una a dos dimensiones al cono error mapeado
- IDIM=2 Define al cono error en una función de dos dimensiones

INCPICK=1 es especificado un ángulo promedio de incidencia
INCANGL.

INCPICK=2 el vértice de la primer faceta listada en la fila de datos,
es tomada como el centro del sistema.

2. se considera el vértice de cada faceta como centros de una nueva convolución

3 realiza la convolución considerando el centro de cada subfaceta.

Circe2 recomienda para un concentrador con menos de 15-20 facetas, la aplicación combinada de los parámetros anteriores de la siguiente manera: IDIM=2, IANLYT=0, NEWCONV=2. O bien una combinación de mayor precisión dada por IDIM=2/IANLYT=0/NEWCONV=3, que en un momento dado resultaría una ejecución de mayor duración.

3.7 MODELADO DEL CONCENTRADOR.

Tipos de concentradores modelados por Circe2.

En la actualidad la tecnología termosolar de potencia, independientemente de su aplicación, se puede clasificar en sistemas de receptor central, sistemas de plato-parabólico, y en sistemas de canal parabólico. Circe2 tiene la capacidad de modelar los sistemas de concentración solar del tipo plato parabólico, de una o de múltiples facetas como las mostradas en las figuras 3.8 y 3.9 respectivamente

Dentro de Circe2 el parámetro NFACET determina el número de facetas que conforman al sistema óptico, por ejemplo para el caso del concentrador de la

Figura 3.10 NFACET será igual a uno. Para el caso de $NFACET \geq 2$, Circe2 asumirá una geometría similar para cada una de las facetas y considerará la misma reflectividad de espejo. Esta reflectividad va ser asignada mediante el parámetro REFLEC.

Definición de la geometría del sistema.

La geometría del concentrador es definida usando un plano referencial absoluto X-Y-Z, llamado “sistema coordenado del colector”, el origen estará localizado en el centro de gravedad del sistema, así para sistemas de una faceta éste correspondería al centro de la faceta. Para sistemas de facetas múltiples se hará necesario definir la posición de cada una de las facetas, respecto al origen del marco referencial absoluto, así las coordenadas $(X_{IDF}, Y_{IDF}, Z_{IDF})$ para el vértice de cada faceta corresponde a su posición relativa, donde IDF es el índice que identifica al número de faceta. De esta manera, Circe2 denomina a cada punto $(X_{IDF}, Y_{IDF}, Z_{IDF})$ como punto de dirección de la faceta, el parámetro ICPQR controla mediante dos opciones la asignación de los puntos de dirección de cada faceta así para ICPQR igual a:

1. Circe2 determina internamente el punto dirigible para cada una de las facetas.
2. El usuario podrá interactivamente asignar el valor del punto dirigible para $IDF=1$ hasta NFACET

IBETA es un parámetro más utilizado en la geometría del concentrador. este parámetro controla la orientación rotacional de la faceta. Para facetas de forma

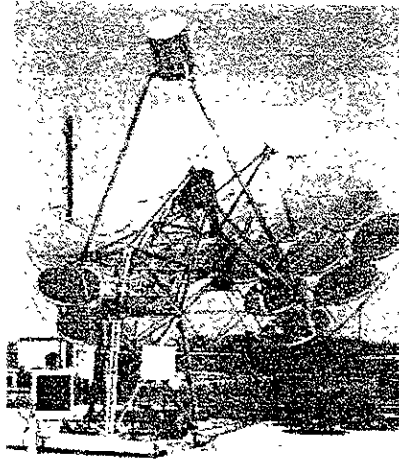


Figura 3.8 Fotografía de un concentrador de receptor central de múltiples facetas localizado en Shenandoah, Georgia. Cortesía de General Electric company

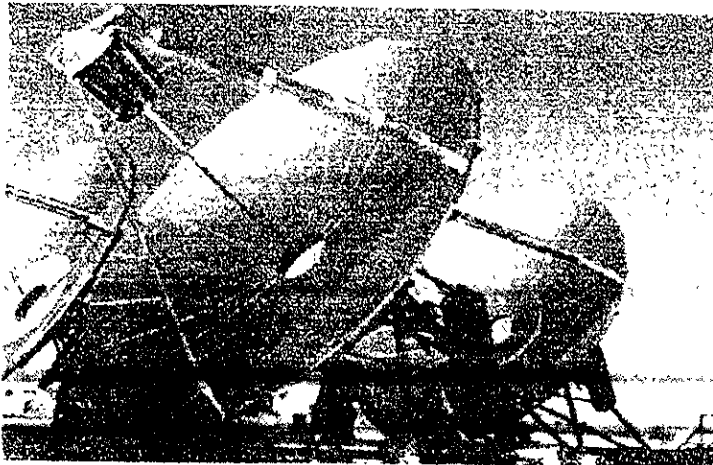


Figura 3.9 Fotografía de un concentrador generador de potencia CPG-460. Cortesía de Cummins Engine Company.

circular proyectada IBETA tendrá un valor igual a cero (ver sección 3.6).

Factor de sombreamiento y bloqueo.

En sistemas de concentración solar un aspecto a considerar es el sombreamiento de algunas porciones de las facetas debidas comúnmente al sombreamiento por el montaje del receptor, al sombreamiento de los tirantes que soportan al receptor, o bien a cualquier otro objeto montado en las proximidades de las facetas, que podrían ser instrumentos de medición.

Circe2 asigna un factor de sombreamiento, definido por el parámetro SBM, para cada una de las facetas. De manera tal que el sombreamiento debido a las anteriores causas mencionadas sea considerado como una fracción de faceta que ha sido bloqueada y que por tanto no tendrá contribución en el flujo radiativo concentrado. Así un valor SBM=0 indicará no sombreamiento y un valor SBM=1 indicará un total sombreamiento y con ello una contribución nula de la faceta.

El parámetro ISHAD es un controlador dentro de Circe2, que determina tres posibles opciones para determinar la manera en que puede ser asignado el sombreamiento, así, para:

ISHAD=0 Circe2 considera un factor de sombreamiento despreciable.

ISHAD=1 El factor de sombreamiento será computarizado internamente por Circe2.

ISHAD=2 El usuario podrá interactivamente asignar el valor del factor

Esta información sobre el modelado del concentrador tratada a lo largo de la sección 3.5, puede ser resumida en una fila de entrada para posteriormente incorporarla en el generador de datos DEKGEN2. Así esta fila contendrá de manera tabular la siguiente información.

- Una primer columna que identifique el número de faceta IDF.
- Una segunda, tercer y cuarta columna para los puntos $(X_{IDF}, Y_{IDF}, Z_{IDF})$, para cada faceta.
- Una quinta columna que asigne la distancia focal para cada faceta.
- Una sexta columna que especifique el factor de sombreamiento de cada faceta.
- Una séptima columna que defina el número de puntos dirigibles dentro de la faceta.
- Una octava y última faceta para el ángulo de rotación de la faceta, IBETA.

3.8 MODELADO DE LA FACETA.

El sistema óptico para un concentrador solar del tipo plato-parabólico de foco puntual, puede estar compuesto por una o varias facetas. Circe2 tiene la capacidad de modelar ambos tipos de concentradores, para ello se hace necesario la utilización de los parámetros que definen las características.

Formas proyectadas típicas de facetas.

La geometría de la faceta es definida por Circe2 mediante la forma proyectada y su contorno, la figura 3.10 permite el entendimiento visual del significado de estos términos. Así la faceta mostrada en la figura tiene su vértice en el origen del sistema coordenado X-Y-Z, y su eje a lo largo de la dirección Z, considerando el

área sombreada como el contorno de la faceta entonces la proyección sobre el plano X-Y será llamada la “forma proyectada” que para el caso de un contorno esférico como el de la figura se tendrá una forma triangular proyectada. Circe2 controla la forma proyectada mediante el parámetro KORD, así tenemos para:

- KORD=1 Una forma circular proyectada.
- KORD=2 Una forma rectangular proyectada.
- KORD=3 Una forma de triángulo equilátero proyectada.

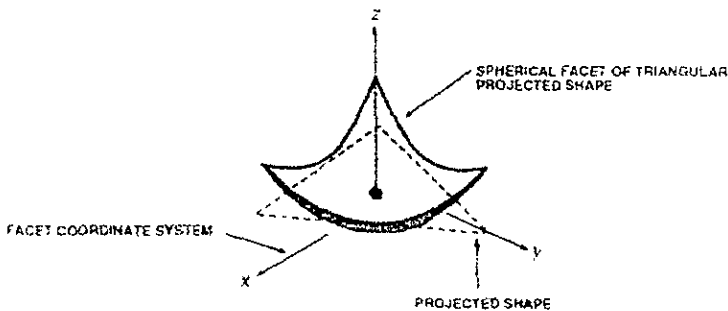


Figura 3.10 Faceta esférica de forma triangular proyectada

Para KORD=1, que es el caso del DEFRAC, es además necesario especificar el valor del radio de proyección mediante el parámetro FLENG (ver figura 3.12)

Partición de la faceta de forma circular.

Por otro lado tenemos que, la contribución del total de rayos reflejados por la faceta estará en función de la división o fragmentación de la faceta, pequeñas porciones que serán llamadas subfacetas. Para el caso de una forma circular proyectada de radio FLENG, la división se hace mediante el parámetro NSUB que

tomara un valor menor o igual que 100 y que divide a la faceta en círculos concéntricos de radio inicial R_0 , gobernado por:

$$R_0 = \text{FLENG} / (2\text{XNSUBF}) \quad 3.6$$

con un ancho Δr dado por:

$$\Delta r = (\text{FLENG} - R_0)(\text{NSUBF} - 1) \quad 3.7$$

así, cada anillo será automáticamente subdividido en M sectores angulares de igual tamaño, de manera que la longitud de arco en el exterior del sector no sea más grande que el ancho del anillo (Δr). De esta manera el numero de anillos esta dado por:

$$M = \text{INT}(2\pi b / \Delta r) + 1 \quad 3.8$$

y por:

$$\Delta\theta = 2\pi / M \quad 3.9$$

donde, b es el radio exterior de un determinado anillo y $\Delta\theta$ es la extensión angular del sector dentro de ese anillo. La figura 3.11 ilustra cada una de estas dimensiones, para la forma circular proyectada.

Una vez definida la forma proyectada, es de interés además definir el tipo de contorno el se determina mediante el parámetro IOPT, así para:

- | | |
|--------|---|
| IOPT=1 | Se tiene un contorno tipo arco - parabólico |
| IOPT=2 | Se tiene un contorno tipo plano. |
| IOPT=3 | Se tiene un contorno tipo circular. |

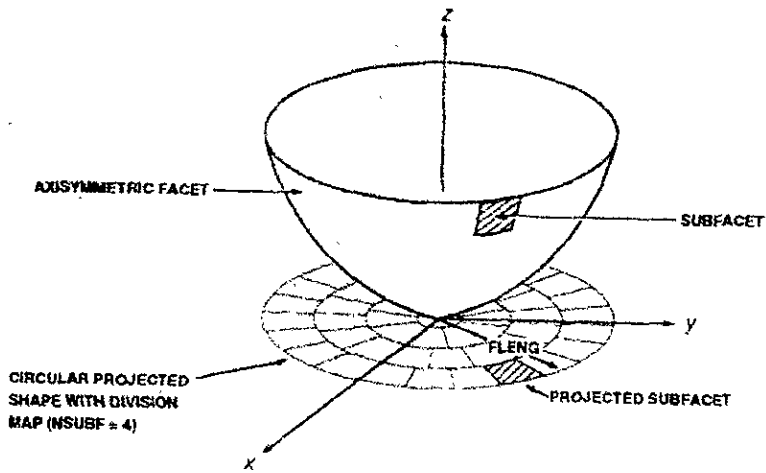


Figura 3.11 Faceta de proyectada forma circular, dividida en subfacetas.

- IOPT=4 Se tiene un contorno definido por una curva polinomial
- IOPT=5 Se tiene un contorno definido por pares ordenados de radio en función del desplazamiento.
- IOPT=6 El usuario puede definir su propio contorno mediante una subrutina elaborada en programación fortran.

En el caso del DEFRAC fue considerado un IOPT=1, Para este caso se hace necesario definir la distancia focal f , así Circe2 determinará internamente el valor de f utilizando la ecuación siguiente:

$$f = 0.5 r_{dish} [(\cot \varphi + (\cot^2 \varphi + 1))^{-0.5}] \quad 3.10$$

donde, r_{dish} es el radio de la faceta valor asignado mediante el parámetro RISHRD y ϕ es el ángulo de orilla que será asignado mediante el parámetro RIMANG.

3.9 MODELACION DEL RECEPTOR.

Para sistemas receptores en sistemas de concentración solar de foco puntual los aspectos de interés a considerar son los concernientes a el modelado del receptor y al análisis e interpretación de datos. Dentro del modelado se vera la generación de un blanco geométrico, y la generación de una malla de puntos sobre la superficie del receptor que representaría en un momento dado el numero de intercepciones de la potencia concentrada, así integrando la contribución de cada punto sobre el receptor determinamos la potencia concentrada total interceptada. Dentro del análisis e interpretación de resultados Circe2 genera un archivo de salida llamada FLUX en el cual tendremos resultados de la distribución de manera matricial en coordenadas polares del flujo radiativo concentrado en W/cm^2 , además ofrece un sumario de resultados de valores definidos antes de la corrida de Circe2 como el valor de reflectividad de espejos, el valor de la insolación directa, etc. o bien de valores calculados por Circe2 durante la corrida como el área solar proyectada, el área reducida por sombreamiento, el número de soles para el nivel de intensidad máxima, la máxima potencia interceptada, la potencia sobre el receptor, y la eficiencia del concentrador, entre otros.

Típicas formas geométricas de recibidores.

El parámetro ITARSH dentro de Circe2 da la opción de seleccionar la geometría del receptor, así tenemos que para:

- ITARSH=0 Tendremos un receptor con geometría rectangular.
- ITARSH=1 Tendremos un receptor de sección esférica.
- ITARSH=2 Tendremos un receptor que podrá ser generado por el usuario mediante el uso de una subrutina en programación fortran.
- ITARSH=3 Tendremos un receptor de sección cilíndrica.
- ITARSH=4 Tendremos un receptor de sección cónica.
- ITARSH=5 Tendremos un receptor de sector plato circular.
- ITARSH=N Tendremos un receptor híbrido de N componentes.

Para el sistema de concentración solar DEFAC, se consideró un receptor de sector plato circular que corresponde a ITARSH=6. Para este caso Circe2 modela al receptor considerando un sistema de referencia K-L (ver figura 3.12), definiendo por un lado la orientación del receptor mediante los ángulos que permiten la inclinación de este, α (ALPHA) que determina la orientación en el plano 1-K, y β (BETA) que determina la orientación en el plano 2-L de la Figura 3.12. Por otro lado se requiere de la definición de un sistema de coordenadas polares para la asignación de puntos (θ, r) sobre la superficie del receptor, donde θ es el barrido angular positivamente desde el eje K hasta el eje L, generando de esta manera la malla de puntos sobre el receptor. Circe2 asigna mediante el uso de los parámetros RPTS (desde 3 a 51) puntos radiales igualmente espaciados y por TPTS (desde 1 a 51) puntos con igual espaciamiento angular. para la generación de la malla. El parámetro RMAX define la longitud del radio exterior máximo y el parámetro THETAMAX define la máxima abertura angular para θ , teniendo en cuenta que $(0 < \theta \leq 2\pi)$. Para el ejemplo de la figura 3.12 la abertura de THETAMAX es de 90° , el valor de RPTS es igual a 5 y el valor de TPTS es igual a tres.

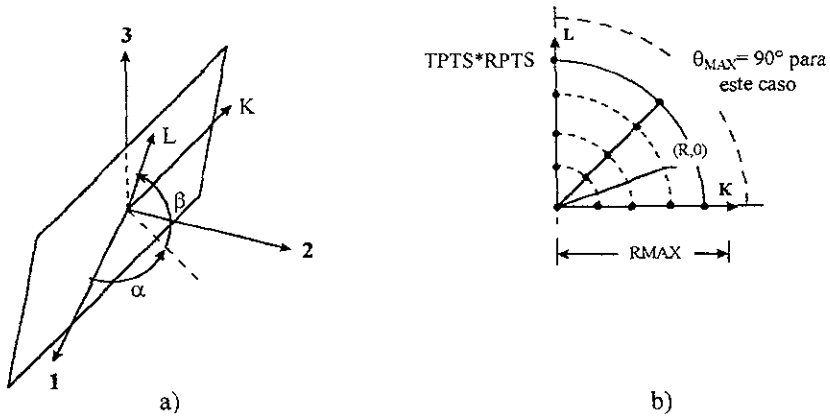


Figura 3.12 a) Orientación de un receptor rectangular y b) Malla del flujo para un receptor de sección circular.

Determinación de la potencia interceptada por el receptor.

La distribución del flujo normal incidente de cada uno de los puntos de la malla del receptor, es numéricamente integrado para determinar la potencia total interceptada por el receptor. Haciendo una transformación de sistema de coordenadas polares (θ, r) al sistema de coordenadas cartesianas (K, L) , Circe2 determina la potencia total colectada mediante la siguiente ecuación:

$$P(I) = \int_A F(K, L) ds \quad 3.11$$

3.10 ADECAUCION DEL CODIGO CIRCE2 AL DEFRAC.

La tabla 3.1 muestra el archivo de entrada INPUT que fue generado mediante la utilización de DEKGEN2, y el cual corresponde a los parámetros que modelan al

sistema de concentración solar DEFRAC. Para explicar el porque de la asignación de cada uno de estos parámetros se hace necesario dividir al archivo en cuatro secciones a saber: la primer sección corresponde a la simulación de la forma solar y a la estimación del error normal de superficie que llegue a tener el sistema, la segunda sección modela al receptor, la tercer sección modela el comportamiento general de faceta, y la cuarta sección define características para cada una de las 18 facetas. Cabe mencionar que la tabla 3.1 corresponde al total de los 18 espejos y las tablas 3.2, 3.3, y 3.4 que se muestran al final corresponden a los grupos A,B, y C respectivamente.

Parámetros controladores de la forma solar.

SV(I)=(0,0,1), parámetro que define el vector de posición del sol en un marco referencial X-Y-Z.

JSUN=1, parámetro que controla la forma solar, en este caso se define por medio de datos tabulados. Para la intensidad solar dada en $W/m^2\cdot sr$ contra desplazamiento angular ρ dado en mrad.

I=863, para la insolación directa en el momento de la captura de la imagen experimental dada en W/m^2 .

NTABL=18, indica el número de datos a tabular, en esta caso 18.

NER=1, parámetro que controla el número de errores de desviación del rayo solar incidente, para este caso se considero un solo error.

IDIM=2, parámetro que controla dimensionalmente al cono error, en este caso fue definido a una función gaussiana de dos dimensiones.

IANLYT=0, determina que la convolucion entre la distribución del cono error y la distribución de la forma solar se hará numéricamente

NEWCONV=2, parámetro que justifica la reconvolución, para este caso es considerado el vértice de cada faceta como centro de una nueva convolución, en el caso del DEFRAC se tendrán 18 convoluciones.

THETA= θ , determina el ángulo de rotación de la elíptica en la distribución del cono error, el valor en este caso es de 0° , debido a que $s_r = s_s$.

SIGR=0.55, representa al error normal de superficie en la dirección r que de acuerdo a la aproximación obtuvo un valor de 0.55 mrad.

SIGS=0.55, representa al error normal de superficie en la dirección s que de acuerdo a la aproximación obtuvo un valor de 0.55 mrad.

Parámetros controladores de la modelación del receptor.

ITHARS=6, define al receptor del DEFRAC como un receptor de geometría circular.

THETAMAX= 6.2832, máximo valor del ángulo de barrido en la generación de la malla de 6.2832 mrad equivalentes a 360° que cubriría al receptor.

RMAX= 0.03, máxima longitud del radio del receptor, teniendo cobertura de 0.03 metros.

TPTS=50, número de divisiones de igual espaciamento angular.

RPTS=50, número de divisiones de igual espaciamento radial.

(0,0,2.0024), (X_0 , Y_0 , Z_0) coordenadas del origen del receptor referenciado al sistema X-Y-Z del concentrador. Donde $Z_0=2.0024$ representa la distancia focal dada en metros.

Tabla 3.1 Contenido del archivo INPUT, simulación para los 18 espejos del sistema DEFRAC.

SISTEMA DE CONCENTRACION SOLAR DEFRAC- PARAMETROS DE ALINEAMIENTO.						
MODELACION DE LA FORMA SOLAR						
0	0	1				
1	863					
18						
1	0.00	202.40				
2	0.22	202.40				
3	0.65	202.40				
4	1.09	200.28				
5	1.53	197.10				
6	1.96	192.86				
7	2.40	188.63				
8	2.84	182.27				
9	3.27	172.73				
10	3.71	155.78				
11	4.15	105.97				
12	4.58	7.50				
13	5.02	0.28				
14	5.45	0.18				
15	5.89	0.12				
16	6.33	0.09				
17	6.76	0.07				
18	7.20	0.07				
1	2.00	0.00				
0.00	0.63	0.63	2			
MODELACION DEL RECIBIDOR						
6						
6.28319	0.03	50	50			
0	0	2.0024				
0	0	0				
0						
0						
MODIFICACION DE LA FACETA						
1	1	0.92				
0.15	6					
2	0					
CARACTERISTICAS DE LA FACETA						
1	0	0	2			
18						
1	-0.3134	-0.5428	0	2.030	0	1
2	0	-0.5428	0	2.015	0	1
3	0.3134	0.5428	0	2.025	0	1
4	0.4701	-0.2714	0	2.020	0	1
5	0.6268	0	0	2.030	0	1
6	0.4701	0.2714	0	2.020	0	1
7	0.3134	0.5428	0	2.025	0	1
8	0	0.5428	0	2.015	0	1
9	-0.3134	-0.5428	0	2.030	0	1
10	-0.4701	0.2714	0	2.020	0	1
11	-0.6268	0	0	2.025	0	1
12	-0.4701	-0.2714	0	2.020	0	1
13	-0.1567	-0.2714	0	2.000	0	1
14	0.1567	0.2714	0	2.007	0	1
15	0.3134	0	0	2.005	0	1
16	0.1567	0.2714	0	2.010	0	1
17	-0.1567	0.2714	0	2.005	0	1
18	-0.3134	0	0	2.010	0	1

ALPHA=0, inclinación del receptor mediante el ángulo α (ver figura 3.12).

BETA=0, inclinación del receptor mediante el ángulo β (ver figura 3.12).

IAPT=0, parámetro de diseño e indica que no existe apertura sobre la superficie del receptor.

INORM=0, parámetro de diseño e indica que el receptor es de superficie plana.

Parámetros controladores de la modelación de la faceta.

KORD=1, parámetro que define una forma circular de la proyección de la faceta.

IOPT=3, parámetro que define un contorno circular.

REFLEC=0.92, asigna un valor de 0.92 a la reflectividad de espejo, valor considerado para cada una de las facetas.

RISHRD=0.15, asigna un valor de 0.15 metros para el radio de la faceta.

RIMANG=4.29, valor del ángulo de orilla en espejos parabólicos de 15 cm de diámetro.

NSUBF=6, este parámetro maneja las divisiones hechas dentro de una faceta, para este caso Circe2 maneja 124 subfacetas.

Parámetros controladores de las características por faceta.

ISHAD=2, mediante esta opción el usuario interactivamente asigna el valor del factor de sombreado, para cada una de las facetas.

ICPQR=1, mediante esta opción el usuario interactivamente asigna el valor de la coordenada de posición (X_{IDF} , Y_{IDF} , Z_{IDF}) para $IDF=18$ que es el caso del DEFAC.

(0,0,2.0024), representa el punto de localización del centro del receptor, dentro de un sistema absoluto X-Y-Z.

NFACET=18, determina el número de facetas para el sistema de concentración solar DEFAC.

Al final del archivo, se define en ocho columnas las características para cada una de las 18 facetas en la manera siguiente: la primera columna numera a cada faceta. La segunda, tercera y cuarta columna definen la coordenada de posición (X_{IDF} , Y_{IDF} , Z_{IDF}) para cada faceta. La quinta columna define la distancia focal para cada faceta ya que esta depende de la posición de la faceta. La sexta columna asigna el valor del factor de sombreado para cada faceta. La séptima columna define el número de puntos dirigibles a considerar en cada faceta ($NAIM=1$). Por último la octava columna define el ángulo IBETA con valor de 0° , para cada una de las facetas.

Tabla 3.2 Contenido del archivo INPUT, simulación para el grupo A de espejos del sistema DEFRAC.

SISTEMA DE CONCENTRACION SOLAR DEFRAC-PARAMETROS DE ALINEAMIENTO GRUPO A.								
MODELACION DE LA FORMA SOLAR								
	0	0	1					
	1	867						
	18							
	1	0	202.4					
	2	0.22	202.4					
	3	0.65	202.4					
	4	1.09	200.28					
	5	1.53	197.1					
	6	1.96	192.86					
	7	2.4	188.63					
	8	2.84	182.27					
	9	3.27	172.73					
	10	3.71	155.78					
	11	4.15	105.97					
	12	4.58	7.5					
	13	5.02	0.28					
	14	5.45	0.18					
	15	5.89	0.12					
	16	6.33	0.09					
	17	6.76	0.07					
	18	7.2	0.07					
	1	2	0	2				
	0	0.45	0.45					
MODELACION DEL RECIBIDOR								
	6							
	6 28319	0.03	50	50				
	0	0	2.0024					
	0	0	0					
	0							
	0							
MODELACION DE LA FACETA								
	1	1	0.92					
	0.15	6						
	2	0						
	1							
CARACTERISTICAS INDIVIDUALES POR FACETA								
	1	0.00E+00	0.00E+00	2.00E+00				
	6							
	1	-0.1567	-0.2714	0	2	0	1	0
	2	0.1567	0.2714	0	2.007	0	1	0
	3	0.3134	0	0	2.005	0	1	0
	4	0.1567	0.2714	0	2.01	0	1	0
	5	-0.1567	0.2714	0	2.005	0	1	0
	6	-0.3134	0	0	2.01	0	1	0

Tabla 3.3 Contenido del archivo INPUT, simulación para el grupo B de espejos del sistema DEFRAC.

SISTEMA DE CONCENTRACION SOLAR DEFRAC-PARAMETROS DE ALINEAMIENTO GRUPO B							
MODELACION DE LA FORMA SOLAR							
	0	0	1				
	1	860.65					
	18						
	1	0	202.4				
	2	0.22	202.4				
	3	0.65	202.4				
	4	1.09	200.28				
	5	1.53	197.1				
	6	1.96	192.86				
	7	2.4	188.63				
	8	2.84	182.27				
	9	3.27	172.73				
	10	3.71	155.78				
	11	4.15	105.97				
	12	4.58	7.5				
	13	5.02	0.28				
	14	5.45	0.18				
	15	5.89	0.12				
	16	6.33	0.09				
	17	6.76	0.07				
	18	7.2	0.07				
	1	2	0	2			
	45	0.25	0.25				
MODELACION DEL RECIBIDOR							
	6						
	6.28319	0.03	50	50			
	0	0	2.0024				
	0	0	0				
	0						
	0						
MODELACION DE LA FACETA							
	1	1	0.92				
	0.15	6					
	2	0					
	1						
CARACTERISTICAS INDIVIDUALES POR FACETA							
	1	0.00E+00	0.00E+00	2.00E+00			
	6						
	1	0	-0.5428	0	2.015	0	1
	2	0.4701	-0.2714	0	2.02	0	1
	3	0.4701	0.2714	0	2.02	0	1
	4	0	0.5428	0	2.015	0	1
	5	-0.4701	0.2714	0	2.02	0	1
	6	-0.4701	-0.2714	0	2.02	0	1

Tabla 3.4 Contenido del archivo INPUT, simulación para el grupo C de espejos del sistema DEFAC.

SISTEMA DE CONCENTRACION SOLAR DEFAC-PARAMETROS DE ALINEAMIENTO GRUPO C							
MODELACION DE LA FORMA SOLAR							
	0	0	1				
	1	881.94					
	18						
	1	0	202.40				
	2	0.22	202.40				
	3	0.65	202.40				
	4	1.09	200.28				
	5	1.53	197.10				
	6	1.96	192.86				
	7	2.4	188.63				
	8	2.84	182.27				
	9	3.27	172.73				
	10	3.71	155.78				
	11	4.15	105.97				
	12	4.58	7.50				
	13	5.02	0.28				
	14	5.45	0.18				
	15	5.89	0.12				
	16	6.33	0.09				
	17	6.76	0.07				
	18	7.2	0.07				
	1	2	0	2			
	0	0.4	0.4				
MODELACION DEL RECIBIDOR							
	6						
	6.28319	0.03	50	50			
	0	0	2.0024				
	0	0	0				
	0						
	0						
MODELACION DE LA FACETA							
	1	1	0.92				
	0.15	6					
	2	0					
	1						
CARACTERISTICAS INDIVIDUALES POR							
	1	0.00E+00	0.00E+00	2.00E+00			
	6						
	1	-0.3134	-0.5428	0	2.03	0	1
	2	0.3134	0.5428	0	2.025	0	1
	3	0.6268	0	0	2.03	0	1
	4	0.3134	0.5428	0	2.025	0	1
	5	-0.3134	0.5428	0	2.03	0	1
	6	-0.6268	0	0	2.025	0	1

4. CAPTURA DE IMÁGENES DEL FLUJO RADIATIVO CONCENTRADO.

Durante los meses de febrero a mayo de 1997 se realizó el mapeo gráfico con video de los flujos radiativos concentrados por el DEFRAC, obteniéndose cerca de 50 imágenes para la contribución de energía concentrada para cada espejo, para cada grupo de espejos y para el total de los 18 espejos, del sistema. Este capítulo presenta el procedimiento mediante el cual se digitalizaron y almacenaron las imágenes, mostrando además, la descripción del equipo utilizado. Mientras que el análisis teórico y experimental de la distribución de los flujos radiativo concentrados será tema del siguiente capítulo.

4.1 INSTRUMENTACION Y MONTAJE DEL EXPERIMENTO.

Descripción general.

Para realizar el estudio de la distribución de energía concentrada en el receptor de placa plana del DEFRAC, se utilizó un sistema de videograbado que permitió la captura y almacenamiento de las imágenes. El montaje del equipo necesario en la captura de imágenes es mostrado en la figura 4.1. El sistema de vídeo tiene una cámara que va montada sobre un soporte con dos grados de libertad angular, este soporte está fijo en la parte inferior del marco hexagonal, como se indica en la misma figura, el cual permite una vez montada la cámara la alineación de ésta. La cámara es una cámara CCD de estado sólido marca Cohu-4800 de cobertura en longitud de onda de 200-1000 nm del espectro solar. Se colocó en ella una lente con obturador de diafragma, acercamiento de imagen (zoom) y nitidez de imagen. Esto, con la finalidad de atenuar la intensidad de la imagen para no saturar la

cámara CCD, así como para enfocar la imagen. La cámara de vídeo se conectó a su vez, mediante una tarjeta convertidora de señal A/D y una de soporte, a la computadora HP-VL2/450 provista con el programa de computo (software) para el análisis y diagnóstico de imágenes llamado BEAMCODE. De esta forma la imagen del flujo solar concentrado observada por la cámara, es capturada como imagen de vídeo, que se digitaliza y almacena por la tarjeta de marco fijo (frame grabber). La tarjeta de marco fijo se conectó además a un monitor de tiempo real en el cual la imagen es observada instantáneamente antes de ser capturada por la cámara y mediante el cual se decide que imagen será tomada.

Con el propósito de determinar las condiciones a las que fueron tomadas las imágenes se instalaron dos sensores de temperatura (termopares tipo "T" con un rango de error de $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$); uno para medir la temperatura de la placa y otro para medir la temperatura ambiente. También se contó con un Pirheliómetro marca Eppley, ($K=17.08 \times 10^{-6}\text{ V/W-m}^2$) para registrar la radiación directa (G_b). Para el registro de esta información se utilizó un sistema adquirente de datos, conformado por la computadora PC-466d, tarjetas adquirentes de datos PCL-812PG y la PCLD-789, y el software adquirente de datos llamado GENIE. La información correspondiente a las corridas de las mediciones quedó registrada en archivos de lectura para su posterior manejo.

4.2 SISTEMA DE VIDEO BEAMCODE.

BEAMCODE es un paquete de software para ser utilizado en ordenadores IBM PC-AT (100% compatible), programador que provee cualitativa y cuantitativamente un diagnóstico de rayo. Varios tipos de fuentes de rayo pueden

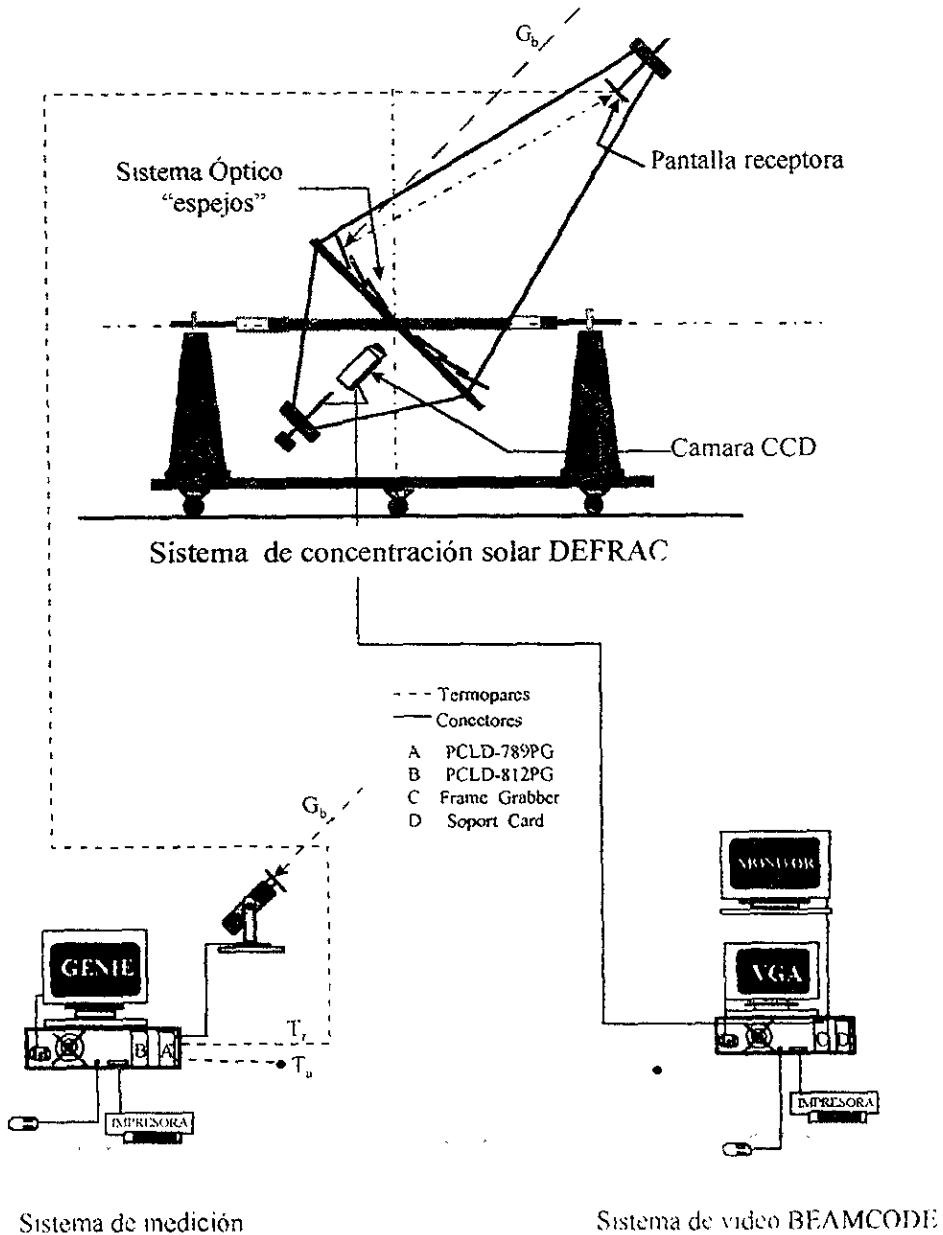


Figura 4.1 Sistema para la captura de la imagen

ser analizadas con BEAMCODE incluyendo potencia, modulada o sistemas de laser pulsado. En nuestro caso analizaremos la imagen del flujo concentrado del arreglo de un sistema de 18 espejos parabólicos, enfocados en el mismo punto.

La figura 4.2, muestra un diagrama a bloques de un típico diagnóstico de rayo, arreglo definido para una óptima operación de BEAMCODE. Un rayo proveniente de la fuente del laser es dirigido a la video cámara, la imagen de video capturada es digitalizada y almacenada por el marco fijo (frame-grabber) y, sincronizada por la tarjeta de soporte; BEAMCODE entonces, analiza la imagen digitalizada utilizando para ello las funciones propias del paquete y los gráficos que ofrece el mismo.

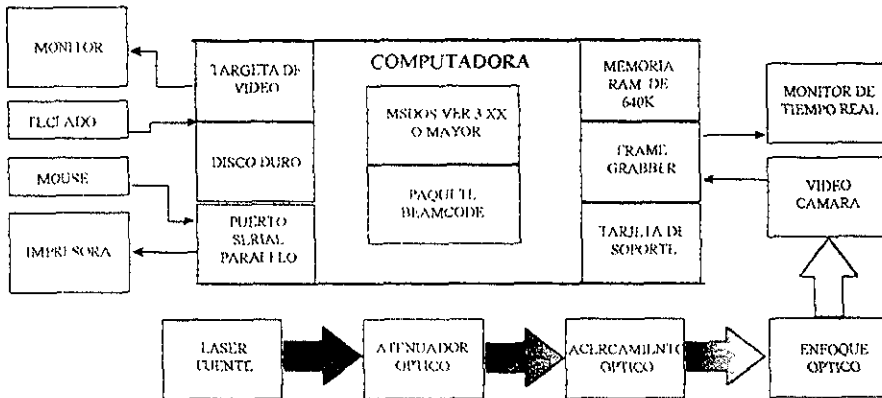


Figura 4.2 Diagrama a bloques de un diagnóstico de rayo utilizando el código BEAMCODE.

Conexión y cableado de elementos.

El cableado y las conexiones entre los elementos físicos del sistema constituyen una parte importante y depende sobre todo del marco fijo, del tipo de cámara de

video utilizada, y del monitor de imagen real utilizado. Para facilitar la conexión entre elementos del hardware tanto en la tarjeta de soporte como la tarjeta del marco fijo se cuenta con un código de colores que ayudará en la instalación del cableado.

La figura 4.3 muestra el diagrama para la conexión entre elementos de hardware del sistema BEAMCODE. A continuación se da una descripción breve de la instalación y de su función de cada elemento del sistema.

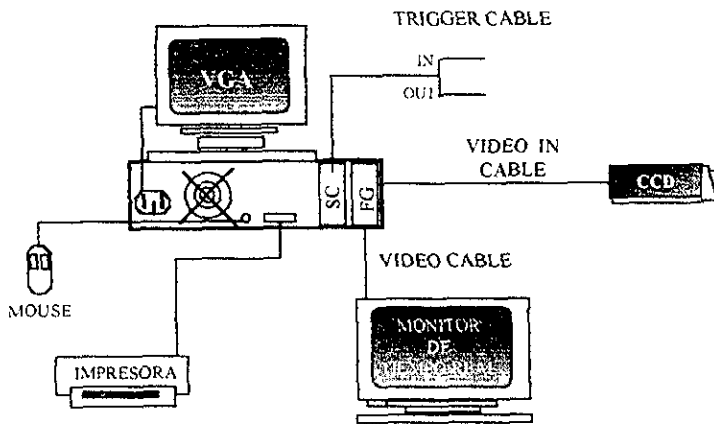


Figura 4.3 Diagrama de la conexión entre elementos del sistema BEAMCODE.

Cable Trigger.

Cable auxiliar, mediante el cual se recibe la señal automática de captura de imagen. Por tanto, este cable es solo necesario si BEAMCODE es usado con un pulso disparador de la fuente del láser. Este cable tiene dos conexiones BNC finales nombradas como "TRIG IN" y "TRIG OUT" y un conector de forma D, de 9 espigas. Este último va conectado a la tarjeta de soporte, y los dos conectores

BNC finales van conectados al equipo de sincronización del láser. Este cable no fue utilizado para la captura de las imágenes de este trabajo de tesis, el método utilizado se describe en los capítulos siguientes.

Frame grabber.

El marco fijo se conecta externamente a la cámara de video y al monitor; a la cámara mediante el cable VIDEO IN etiquetado en color azul, en uno de los extremos a la tarjeta de soporte (conector de forma D), en el otro extremo a la cámara de video (conector BNC). Al monitor mediante el cable VIDEO OUT etiquetado en color azul, uno de los extremos va conectado a la tarjeta (conector de forma D) y el otro extremo conectado al monitor (conector forma D).

La tarjeta de marco fijo utiliza un convertidor de señal analógica de video a digital, para producir una imagen digitalizada de el perfil del rayo. Para propiamente en BEAMCODE, el rango de voltaje digitalizado del convertidor A/D puede ser igualado al rango de voltaje de video de la cámara que sea usada.

Cámara.

Cámara CCD (Dispositivo Cargador Acoplado) monocromática de estado sólido, modelo 4800 ideal para aplicaciones que requieren altas resoluciones y alta sensibilidad la figura 4.4 muestra la respuesta espectral, en la cual se puede observar la cobertura en longitud de onda de 200 a 1000 nm del espectro solar teniendo la mayor eficiencia de un 70% a los 700 nm, dentro del visible. Este elemento se conecta a la tarjeta de marco fijo mediante un conector BNC y se alimenta con un voltaje de 12 V de Cd.

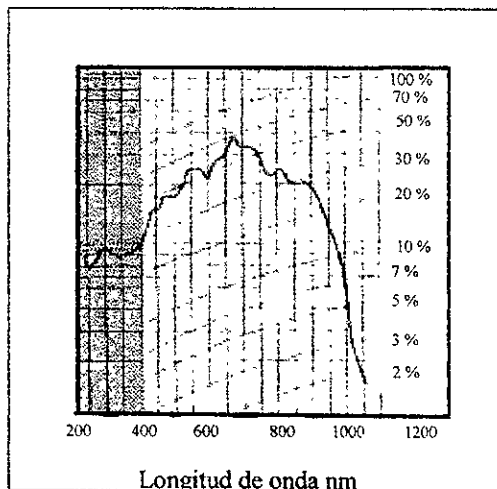


Figura 4.4 Respuesta espectral de la cámara CCD COHU-4800.

La cámara 4800 utiliza el método de marco transferido y con 367 952 elementos de imagen genera una alta resolución, con una variación de contraste menor del 5%. Con poca potencia consumida permite un sistema de integración flexible y una fácil operación. En resumen, la cámara CCD COHU 4800 presenta las características siguientes:

- Alta resolución. 754 (horizontal) x 488 (vertical) elementos de imagen.
- Alta sensibilidad. 0 007 fc/0.07 luxes
- Automático control de ganancia (AGC).
- No retroceso o retención de imagen.
- Arriba de 365 000 elementos de imagen. (píxeles)

Monitor de tiempo real.

El Frame grabber provee la disponibilidad de la visualización de las imágenes de video almacenadas, mediante el monitor de tiempo real o bien las vistas

directamente desde la cámara. Diferentes tipos de video monitores pueden ser conectados a el frame grabber, pero habrá limitaciones dependiendo del mismo frame grabber y de la cámara de video utilizados.

Monitor de la imagen digitalizada. (display)

El monitor en el que se podrá visualizar la imagen digitalizada, así como el texto normal y los modos gráficos será conectado a la tarjeta EGA o VGA del CPU. Ver manual técnico de la computadora para la conexión correcta del cableado de este elemento.

Impresora.

La conexión de este elemento es al puerto de impresión del CPU, normalmente un puerto paralelo asignado en la computadora como LPT1. Este elemento sirve como candado para tener acceso al software.

Mouse

BEAMCODE requiere un microsoft o compatible, mouse, rodamiento seguidor, o aparato punteador similar.

Cálculos efectuados por BEAMCODE.

Este punto incluye la descripción de los cálculos en el análisis del rayo, ejecutados por BEAMCODE.

Exactitud.

La exactitud de todo cálculo será afectada por: la máxima intensidad de rayo, el centrado, el conocimiento de ruido y el ajustamiento del convertidor de señal A/D.

Para asegurar óptimas mediciones las siguientes sugerencias deben mantenerse.

1. La intensidad de máximo rayo será entre 75% y 95% de saturación de cámara. El máximo rango dinámico de cámara será usado, es decir al cerrar el máximo rayo de saturación de cámara más exactas serán las medidas.
2. El tamaño del montículo del rayo no excederá del recomendada por el mínimo o máximo diámetro de rayo para la cámara.
3. La posición del rayo será centrada en el censor de la cámara.
4. El origen de ruido en la imagen del rayo afectará los resultados calculados. Asegúrese que todas las posibles fuentes de origen de ruido puedan ser eliminadas en lo posible.
5. Adecuado ajuste del convertidor de señal A/D y los niveles de voltaje de saturación sean críticos en la medida de lo posible.

Máxima respuesta de cámara.

La máxima respuesta de cámara es el nivel de intensidad del brillo del pixel en una muestra. Expresada como un porcentaje de la máxima respuesta de cámara. Desde el nivel de intensidad hasta un cualquier pixel, puede ser desde 0 hasta 255, así, una máxima respuesta corresponde al 100% de un pixel con un nivel de intensidad de 255.

Localización del centroide

La localización del centroide de potencia o energía de un rayo es determinado al sumar las intensidades de todos los pixeles de la muestra en ambos ejes X, Y, y encontrar el centro de masa. Las coordenadas de localización del centroide del rayo estarán dadas por:

$$X = \frac{\sum_j i_j x_j}{I_T} \quad , \quad Y = \frac{\sum_j i_j y_j}{I_T}$$

donde, i será llamada la intensidad de cada pixel e I_T será llamada la intensidad total.

Localización del nivel máximo de rayo.

La localización de la máxima intensidad es fundada al penetrar todos los pixeles en una muestra para el máximo nivel digitalizado. Esta penetración es acompañada al capturar cada dato de la imagen de izquierda a derecha comenzando con los datos de la fila de arriba. La localización del máximo será el máximo valor leído en caso de que exista más de un pixel con la máxima intensidad entonces el nivel máximo será el del pixel primeramente leído.

Manejo de beamcode.

Aun cuando BEAMCODE ofrece variadas funciones para el análisis de las imágenes capturadas, como es la presentación de la imagen en cinco diferentes modos gráficos: el de contorno, la presentación gráfica en tres dimensiones, la presentación gráfica en coordenadas polares, el gráfico de perfiles, y el de histograma. Dentro de cada una de ellas existe variedad de opciones para determinar entre otras, la localización del punto máximo, la localización del punto centroíde, el ángulo de observación de la imagen mediante su rotación, observar la distribución en pixeles de la imagen, efectuar cortes horizontales y verticales en cualquier punto de la imagen y visualizar el gráfico de estos cortes con una correspondiente aproximación gaussiana.

Cabe mencionar que aun cuando el paquete tiene este potencial, para este trabajo de tesis BEAMCODE fue utilizado no como instrumento de análisis si no mas bien como una herramienta que nos permitió capturar y almacenar en un archivo de lectura en código ASCII las imágenes solares concentradas en el receptor del DEFRAC, de esta manera teniendo la información en archivos de lectura ASCII el análisis se efectuó posteriormente utilizando Excel como hoja de cálculo, Surfer como graficador y una serie de programas hechos en BASIC (ver apéndice B). A continuación se describe el manejo de BEAMCODE para capturar y almacenar la imagen solar concentrada.

Una vez alineada la imagen y previamente encendida la impresora se inicializa el paquete BEAMCODE . Dentro del paquete la primer pantalla mostrada es la llamada Menú principal, en la primer columna de esta pantalla se puede desplegar una serie de subrutinas, de las cuales se selecciona la correspondiente al Modo de Análisis dentro del cual se define el modo operacional del diagnóstico y captura de imagen. Una vez definidas las características bajo las cuales será capturada la imagen, se selecciona en el menú principal la subrutina Background mediante la cual es desplegado en el monitor de tiempo real el contorno de la imagen que esta siendo observada por la cámara CCD, a su vez en el monitor de la PC se observa un recuadro que nos indica el nivel en pixeles de esta imagen observada. Para un nivel de entre un 75% y un 95% de saturación de cámara, controlado por la lente atenuadora que ha sido colocada a la misma, se almacena mediante el uso de la subrutina Store View la imagen observada, esta subrutina da tres opciones de almacenamiento de entre las cuales seleccionamos la que nos da la posibilidad de que sea almacenada como un archivo de lectura en código ASCII, para facilitar su manejo en el análisis posterior.

4.3 SISTEMA ADQUISITOR DE DATOS.

GENIE es un programa poderoso y versátil para adquisición de datos y control en tiempo real, que ofrece una gran variedad de utilerías. Las estrategias de automatización son diseñadas por el usuario y ejecutadas en tiempo real y ambiente Windows. Genie proporciona una ventana de herramientas a base de iconos, para el diseño en tiempo real de estrategias de automatización y control, sistemas de supervisión, y desplegados dinámicos para el operador.

Este paquete es flexible y fácil de usar. Una biblioteca de iconos (bloques) presenta funciones matemáticas y de control normales en la industria, que se relacionan mediante un editor de estrategias. El paquete opera en ambiente Windows, y soporta las interfaces de entrada / salida de las señales de manera directa, a través de bibliotecas. Cualquier número de bloques e interfaces de entrada / salida pueden ser usados simultáneamente, limitado esto, únicamente por la velocidad y la memoria del sistema. Genie consiste de un editor de estrategias, de un editor de pantalla y de ejecución del programa (runtime).

Conexión de los elementos del sistema.

La figura 4.5 muestra el diagrama de bloques para la conexión física entre los elementos utilizados para la adquisición de los parámetros que nos indicaron las condiciones en las cuales fueron capturadas las imágenes solares. así la figura ilustra la conexión de la PC a dos elementos internos, tarjetas adquisitoras de datos PCL-812PG y PCLD-789 y a su vez estos elementos conectados a los elementos considerados como externos o elementos lectores dados por dos

censores de temperatura tipo T y un sensor de radiación directa, pirheliómetro marca Eppley mostrado en la figura 4.6.

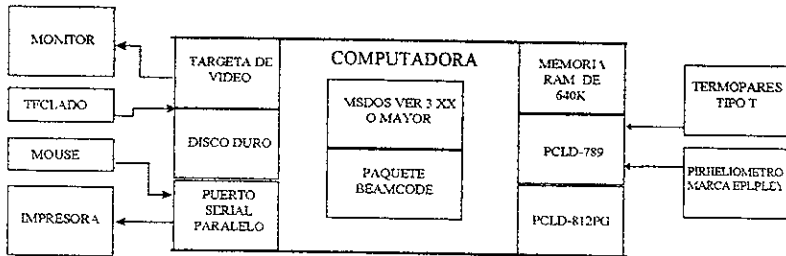


Figura 4.5 Diagrama a bloques, conexión entre elementos del sistema adquisitor de datos.

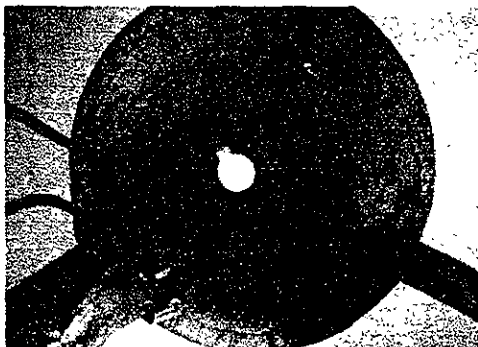


Figura 4.6 Pirheliómetro marca EPPLEY

4.4 PROCEDIMIENTO EN LA CAPTURA DE IMAGENES.

El sistema de concentración solar fue orientado en posición norte-sur geográfico y almeado hacia los rayos solares; después se almeó cada uno de los 18 espejos

del sistema, de manera tal que se obtuviera una adecuada superposición de imágenes, estos fueron cubiertos para ir descubriéndolos posteriormente como fuesen requeridos. La Figura 4.7 muestra una fotografía de la imagen concentrada por el grupo A de espejos.



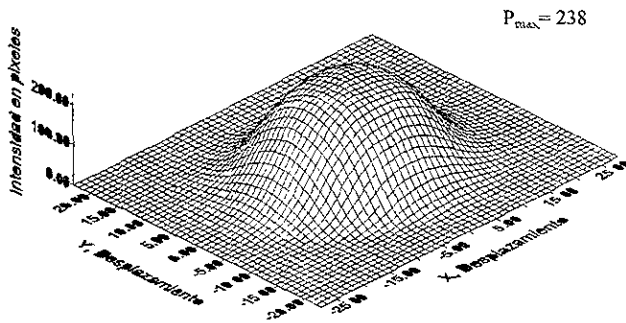
a)



(b)

Figura 4.7 (a) Fotografía de la imagen concentrada por el grupo A de espejos, sobre la placa receptora del calorímetro. (b) Regla fotografiada a la misma distancia que la imagen.

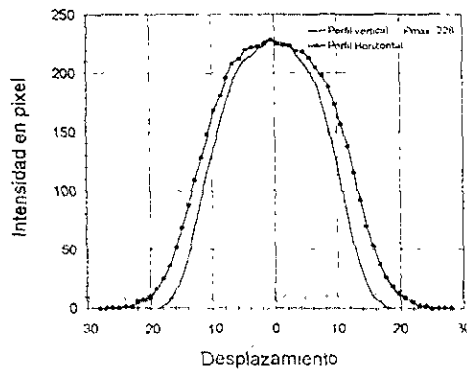
Se verificó que los sistemas de medición estuvieran funcionando correctamente para ello se hicieron algunas corridas de prueba. El siguiente paso consistió en la alineación de la cámara CCD con respecto a la imagen observada, para ello nos auxiliamos de la imagen observada en el monitor de tiempo real y por medio de los ajustes de atenuación y acercamiento de la lente y de posición permitido por el montaje de la cámara se logró la alineación, este hecho sucede para cuando la imagen vista en el monitor de tiempo real esta justo en el centro de la pantalla. Una vez hechas estas operaciones se procedió a la captura de la imagen, para un nivel de intensidad que estuviera en el rango de los 240-250 pixel controlado por el obturador, no rebasando los 250 pixel en intensidad, ya que para valores superiores la distribución se hacía plana debido a la saturación de cámara. Por medio de BEAMCODE se almacenaron las imágenes en archivos de lectura en código ASCII, tomándose varias imágenes para cada espejo, para cada grupo de espejos y para el total de los 18 espejos.. A la vez se registraron en archivos de lectura los parámetros correspondientes a las mediciones de temperatura de placa e insolación. Aun cuando fueron tomadas inclusive imágenes por espejo, este trabajo de tesis presenta el análisis para los tres grupos de espejos y para el total de los 18 espejos. De esta manera se presentaran en este capítulo solo los gráficos, previamente seleccionados, correspondientes a estos grupos; sin embargo los gráficos de las imágenes digitalizadas para cada espejo se presentaran en un anexo de esta tesis como consulta para posteriores estudios (ver apéndice C). Así, la figura 4.8 presenta el gráfico en tres dimensiones de la distribución en pixel, las curvas de nivel, y los perfiles correspondientes a cortes en el pico máximo para los ejes X y Y , de la imagen digitalizada del grupo A. Las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestran los correspondientes gráficos para el grupo B, para el grupo C y para el total de los 18 espejos, respectivamente.



a)

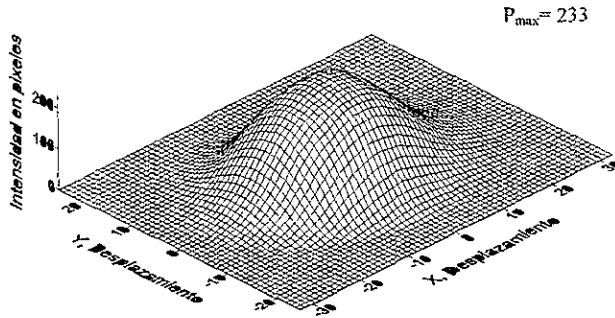


b)

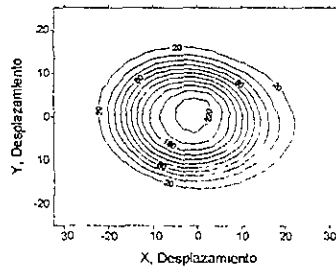


c)

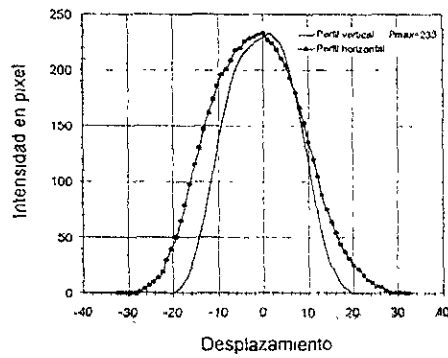
Figura 4.8 Gráficos del flujo radiativo concentrado para el grupo A de espejos, imagen digitalizada: a) Gráfico en 3D, b) Curvas de nivel y c) Perfil vertical y horizontal.



a)

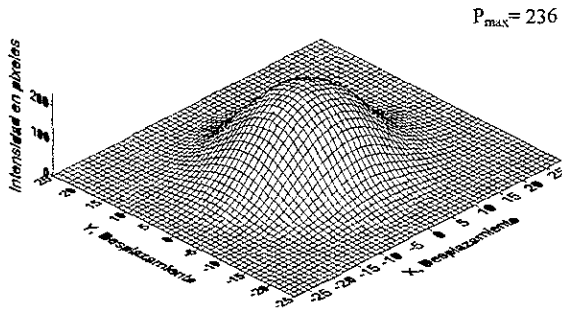


b)

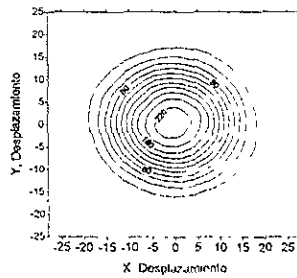


c)

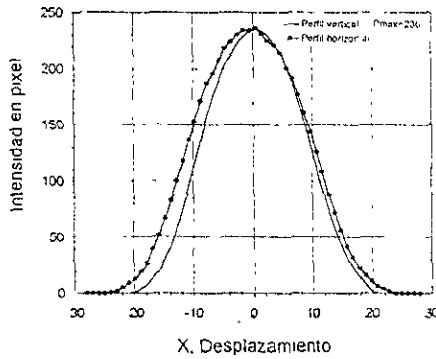
Figura 4.9 Gráficos del flujo radiativo concentrado para el grupo B de espejos, imagen digitalizada; a) Gráfico en 3D, b) Curvas de nivel y c) Perfil vertical y horizontal.



a)

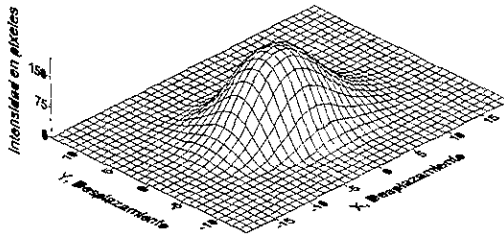


b)

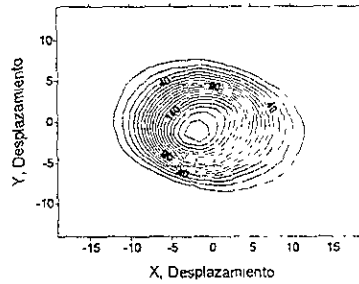


c)

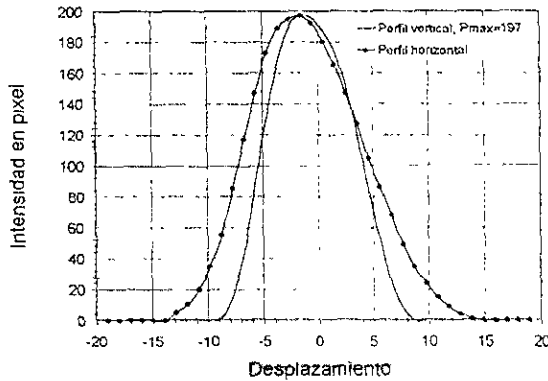
Figura 4.10 Gráficos del flujo radiativo concentrado para el grupo C de espejos, imagen digitalizada: a) Gráfico en 3D, b) Curvas de nivel y c) Perfil vertical y horizontal.

$P_{\text{max}} = 197$ 

a)



b)



c)

Figura 4.11 Gráficos del flujo radiativo concentrado para el grupo de los 18 espejos, imagen digitalizada; a) Gráfico en 3D, b) Curvas de nivel y c) Perfil vertical y horizontal

5. ANALISIS Y DETERMINACION TEORICA EXPERIMENTAL DE LA DISTRIBUCION DEL FLUJO RADIATIVO CONCENTRADO.

Este capítulo presenta el análisis teórico experimental que nos permitió obtener resultados sobre la distribución del flujo radiativo concentrado en el receptor de placa plana, localizado en el plano focal del sistema DEFRAC. Cabe mencionar que en el análisis se emplearan dos métodos, el primer método es aplicado solamente al grupo A de espejos mientras que el segundo método se aplica al mismo grupo A con el objetivo de validarlo para posteriormente aplicarlo a los grupos B,C y al total de los 18 espejos. La razón por la cual solo el primer método es aplicable al grupo A, consiste en el hecho de que solo para este grupo se consiguió medir el tamaño real de la imagen.

5.1 ANALISIS Y DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCION DEL FLUJO RADIATIVO CONCENTRADO PARA EL GRUPO A DE ESPEJOS.

Método de la normalización simple.

A la par con este trabajo de tesis fue desarrollado en el CIE por el mismo grupo de investigación del Dr. Claudio A. Estrada Gasca, otro trabajo mediante el cual se determinó la potencia concentrada por el DEFRAC, usando una técnica calorimétrica, para la cual se diseñó y construyó un calorímetro de superficie plana utilizando un depósito de negro de humo sobre la superficie expuesta al rayo concentrado, la figura 5.1 muestra el esquema y la fotografía del mismo. Así, este receptor fue utilizado en nuestro caso como pantalla en la captura de imágenes

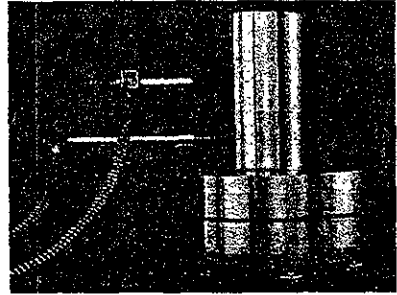
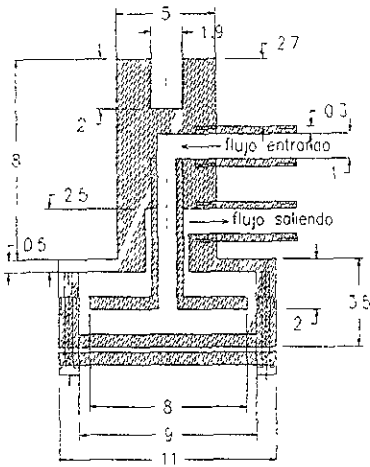


Figura 5.1 Diseño y fotografía del calorímetro [5].

La potencia es determinada por Cruz y Estrada [7,8], a partir de hacer un balance de energía sobre la superficie receptora del calorímetro, donde se considera la energía solar absorbida por la placa, la energía transferida al fluido térmico y la energía perdida por convección y radiación hacia el medio ambiente. Se establece entonces que, el balance de energía en estado estacionario en el receptor del sistema esta determinado por la ecuación 2.9 que recordaremos aquí:

$$G_b \rho_c \alpha_r F_s A_b = m C_p (T_s - T_c)_f + h_c A_p (T_p - T_a) + \epsilon \sigma f_{r \leftarrow c} A_p (T_p^4 - T_c^4) \quad 5.1$$

al ser considerada por Cruz y Estrada, una temperatura de placa proxima a la temperatura ambiente y a la temperatura de cielo, es decir $T_p \approx T_a \approx T_c$, (experimentalmente se consiguió mantener la temperatura de placa próxima a la

temperatura ambiente mediante la variación del flujo másico del fluido térmico) se puede establecer que, las pérdidas convectivas y radiativas pueden ser despreciadas obteniéndose:

$$G_b \rho_c \alpha_r F_s A_a = \dot{m} C_p (T_s - T_c)_f = Q_a \quad 5.2$$

donde Q_a es la energía absorbida por el fluido térmico y el término $(G_b \rho_c F_s A_a)$ es la potencia del flujo radiativo concentrado incidente en la placa receptora del DEFRAC antes de ser absorbida denotada por Q_o . De esta manera la expresión matemática anterior queda como:

$$\alpha_r Q_o = \dot{m} C_p (T_s - T_c)_f \quad 5.3$$

esto nos dice que, conociendo el calor ganado por el fluido y la absorptancia de la superficie receptora, entonces Q_o puede ser determinada también a partir de la ecuación (5.3) es decir:

$$Q_o = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_c)_f}{\alpha_r} \quad 5.4$$

A manera de resumen se presentan en la tabla 5.1, los resultados experimentales obtenidos por Cruz y Estrada, en ella se muestra la potencia absorbida por el fluido térmico y la potencia concentrada por el sistema, donde α_r representa la absorptividad del depósito de negro de humo.

Tabla 5.1 Resultados experimentales de Q_a y Q_o , bajo la técnica calorimétrica.

Grupo de espejos	G_b	α_r	Q_a	Q_o
	W/m ²	adimensional	Watts	Watts
Grupo A	867	0.952	301	316.1 ± 10
Grupo B	861	0.952	315	330.8 ± 12
Grupo C	864	0.952	295	309.8 ± 8
Total, 18 espejos	863	0.952	911	956.7 ± 30

Por otro lado en la figura 4.8 los desplazamientos en x y y corresponden a la discretización que el programa BEAMCODE hace de la imagen digitalizada para el grupo A de espejos. Para saber el tamaño real de la imagen se midió la imagen fotografiada de la figura 4.7 a), utilizándose como referencia para ello, una regla fotografiada (ver figura 4.7 b), a la misma distancia a la que fue fotografiada la imagen. Así determinamos que el tamaño medido de la imagen fue de 2.7 cm para el desplazamiento en x , y de 2.4 cm para el desplazamiento en y . La figura 5.2 muestra un acercamiento de la imagen fotografiada del grupo A de espejos, por medio de este acercamiento es posible apreciar claramente los límites del contorno de la imagen.

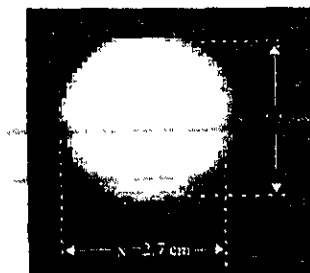


Figura 5.2 Acercamiento de la mancha solar concentrada en el receptor del DEFRAC

La figura 5.3 muestra el gráfico en 3 dimensiones, equivalente al gráfico de la figura 4.8 a) pero esta vez con los desplazamientos reales en x y y , e intensidad normalizada. En este análisis, se supone que el volumen bajo la superficie de la figura 5.3 multiplicado por un factor constante (C_o) debería de dar la potencia interceptada por el receptor, esto es:

$$Q_o = C_o V_N = C_o \int_A I_N(x, y) dx dy \quad 5.5$$

bien:

$$Q_o = C_o V_N = \int_A C_o I_N(x, y) dx dy = \int_A I(x, y) dx dy \quad 5.6$$

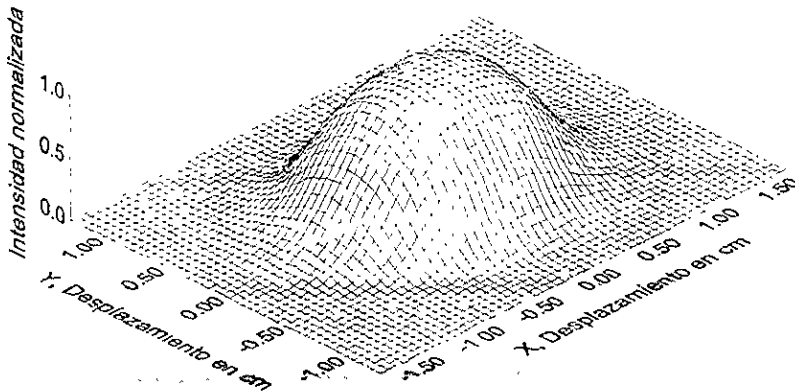


Figura 5.3 Gráfico en 3D, del flujo radiativo concentrado grupo A de espejos, desplazamientos en x y y reales.

Así, la distribución del flujo radiativo concentrado en el plano focal del DEFRAC queda determinada por:

$$I(x, y) = C_0 I_N(x, y) \quad 5.7$$

donde, $I_N(x, y)$ es la distribución normalizada del flujo determinada a partir de la imagen digitalizada con la ayuda de la cámara CCD, correspondiente al grupo A de espejos. El coeficiente C_0 se calcula mediante la ecuación 5.5, de manera que:

$$C_0 = Q_0 / V_N \quad 5.8$$

donde V_N es la integral numérica del volumen bajo la superficie, para este caso, correspondiente a la figura 5.3. Mediante la utilización del programa VNNEX.BAS (ver apéndice B), el cual determina a partir de la información de la distribución del flujo radiativo digitalizada de un arreglo matricial reducido, el valor de $V_N = 2.14 \text{ pixel-cm}^2$.

De esta manera con un valor de $C_0 = 154.7 \text{ W/cm}^2\text{-pixel}$, calculado a partir de la ecuación 5.8, y mediante la aplicación de la ecuación que determina la distribución del flujo radiativo concentrado, ecuación 5.7 se determina el valor de la intensidad para cada punto (x, y) sobre el receptor del DEFRAC, en este caso para la contribución del grupo A de espejos.

Auxiliándonos del programa EXPSURF.BAS (ver apéndice B) se genera la matriz con los valores reales de la intensidad en los puntos (x, y) de la distribución del flujo radiativo concentrado, calculados a partir del valor de C_0 obtenido

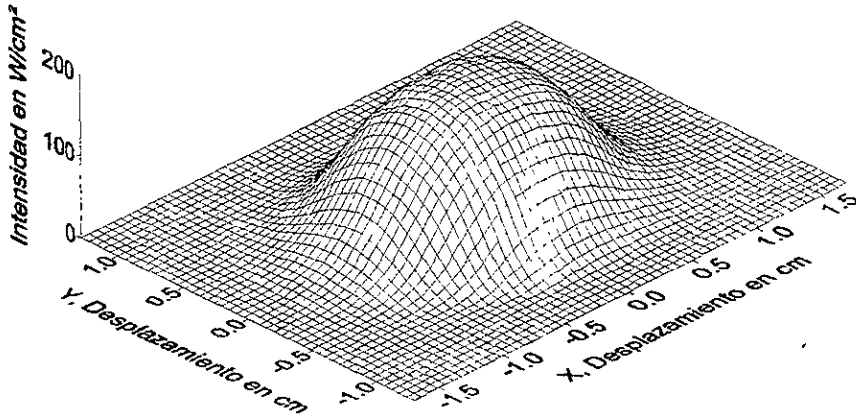
anteriormente. De esta manera la Figura 5.4 a) presenta el gráfico en tres dimensiones de la distribución $I(x,y)$, b) las curvas de nivel, y c) los perfiles correspondientes a cortes en el pico máximo para los ejes x y y , de la imagen.

Comparación con Circe2.

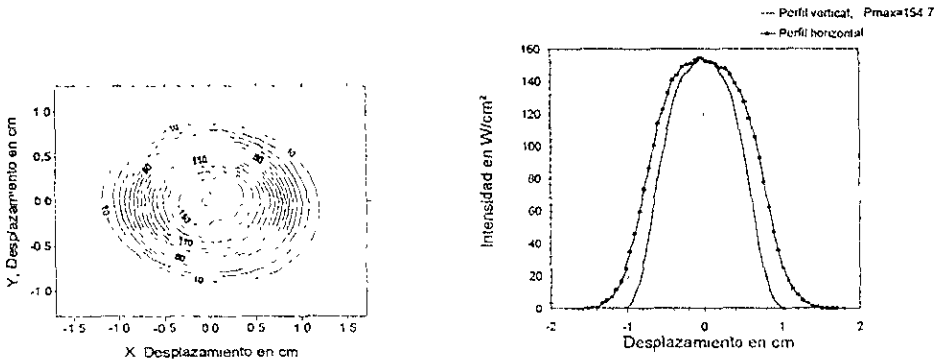
Mediante el uso del código Circe2, se utilizó la técnica de ajuste del error normal de superficie hasta que la distribución del flujo simulado para este grupo de espejos se ajustó a la distribución del flujo anteriormente determinado en la figura 5.4, las dos curvas se ajustaron para un valor de errores de superficie σ_x y σ_y igual a 0.45 mrad. Cabe mencionar que para la comparación de estas curvas se hizo necesario el uso de programas hechos en lenguaje BASIC los cuales se presentan en el apéndice B. La tabla 5.1 muestra el sumario de resultados correspondiente a la corrida para los valores de sigma anteriormente dados, mientras que la figura 5.5 muestra la comparación teórica experimental de la distribución del flujo radiativo concentrado para el grupo A de espejos. La diferencia porcentual calculada para los picos máximos entre estas curvas es del 1.18 %.

Tabla 5.1 Resumen de resultados de Circe2, para la distribución del flujo radiativo concentrado en espejos del grupo A, para errores en $\sigma_x = \sigma_y = 0.45$ mrad.

**** SUMMARY RESULTS ****
CONCENTRATOR SURFACE AREA = 0.424
Ap = SOLAR PROJECTED AREA = 0.423 M^2
Ar = Ap REDUCED BY SHADING AND BLOCKING = 0.423 M^2
I = SOLAR INSOLATION = 867.00 W/M^2
NO. OF SUNS AT PEAK = 1831.81
Pideal = MAX INTERCEPTABLE POWER = I*Ap = 0.366600E+03
Preff = PWR REFL FROM CONC = I*Ar*REFLEC = 0.337272E+03
Prec = POWER ON RECEIVER (GAGS & QNC79) = 0.337245E+03
Ceff = CONCENTRATOR EFFNCY = Preff/Pideal = 92.00%
Reff = RECEVR COLLECTION EFF = Prec/Preff = 99.99%
TOTAL COLLECTOR SYSTEM EFFNCY = Ceff*Reff = 91.99%



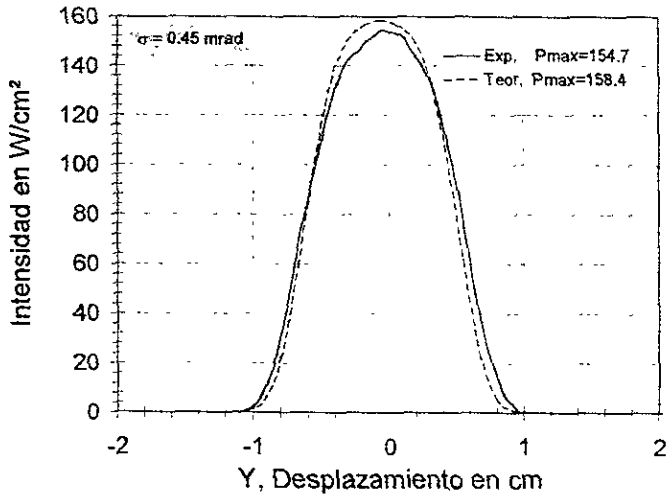
a)



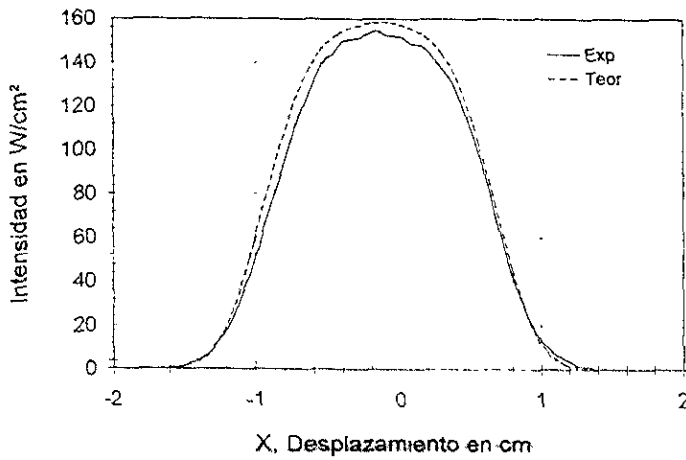
b)

c)

Figura 5.4 Distribución del flujo radiativo concentrado, imagen experimental reconstruida grupo A de espejos, a) Gráfico en 3D, b) Gráfico de curvas de nivel, y c) Perfil vertical y horizontal



a)



b)

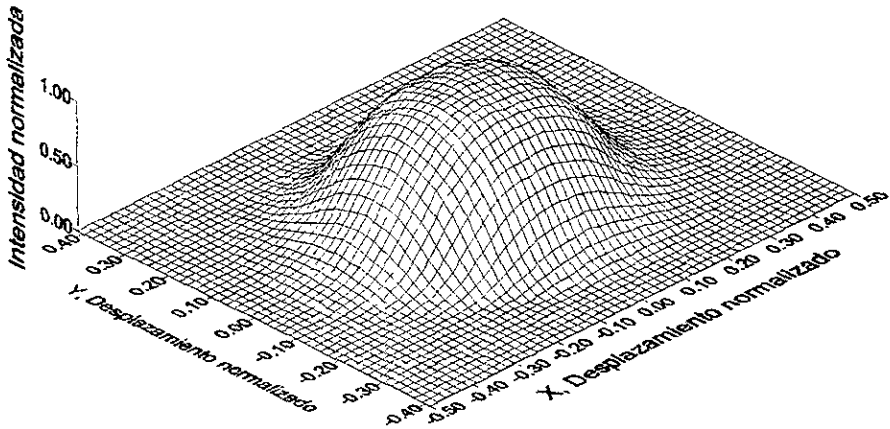
Figura 5.5 Comparación teórica-experimental del flujo radiativo concentrado para el grupo A de espejos, a) perfil vertical. b) perfil horizontal.

Método de la doble normalización.

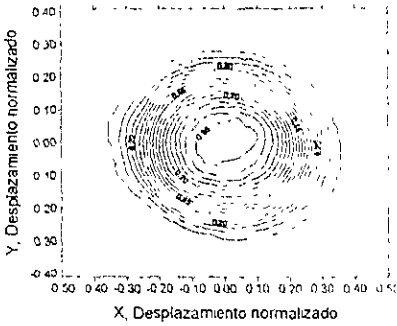
La aplicación de un segundo método se hace necesario en el momento en que el primer método no puede ser aplicado a los grupos B,C y total; esto debido a que lamentablemente no fue posible medir el tamaño real de la imagen concentrada por estos grupos, una de las causas fue el desmantelamiento del sistema, para ser rediseñado. El objetivo de esta sección es aplicar un segundo método al grupo A de espejos y en base a la comparación de los resultados ya obtenidos anteriormente validar este método y aplicarlo a los otros casos.

Partiendo de la distribución del flujo radiativo concentrado para la imagen digitalizada del grupo A, mostrado en la figura 4.8, se realiza una doble normalización mediante la utilización de los programas EXPSURF Y VNNEX.BAS. De esta manera, normalizamos con respecto al nivel máximo de intensidad y con respecto al tamaño de imagen, quedando por tanto un nivel máximo unitario y un área del dominio de la imagen unitaria. Así, la figura 5.6 muestra la distribución del flujo radiativo concentrado de la doble normalización para el, a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal; correspondientes a la Figura 4.8.

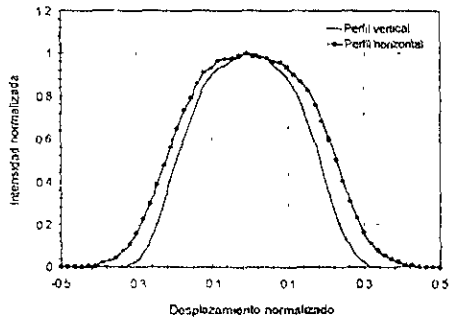
Por otro lado, la simulación que se puede obtener para el grupo A mediante Circe2, partiendo de la información correspondiente a este grupo (ver tabla 3 2), y un error de superficie inicial semejante a cero; se hace una comparación para incrementos del error del sistema, con la distribución del flujo radiativo concentrado de la Figura 5.6 hasta lograr la mejor aproximación. Para ello es necesario normalizar también la distribución que teóricamente se obtiene de Circe2, para este caso se utilizaron los programas CAMBPC.BAS y



a)



b)



c)

La Figura 5.6 Distribución del flujo radiativo concentrado para el grupo A, doble normalización; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal

VNTEO.BAS. Todo lo anteriormente mencionado se puede expresar matemáticamente de la manera siguiente:

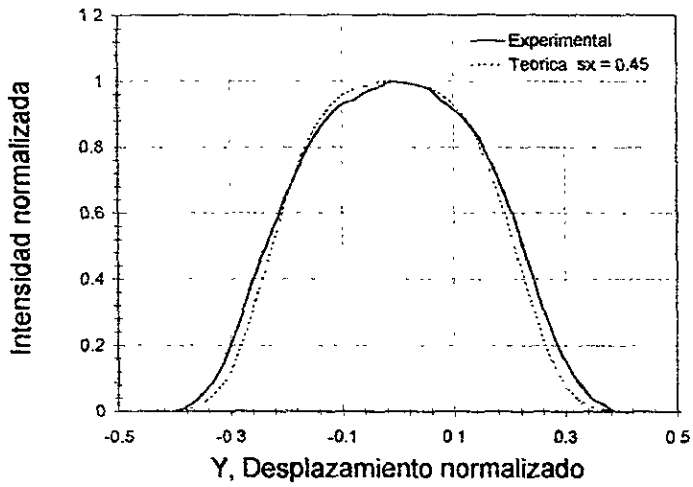
$$Q_{oNN} = \int_{A_{TN}} I_{TN}(x, y) dx dy = \int_{A_{EN}} I_{EN}(x, y) dx dy \quad 5.9$$

La figura 5.7 muestra la comparación teórica experimental de los perfiles horizontal y vertical para el grupo A de espejos. Determinando que la mejor aproximación entre ambas curvas, tanto para el perfil horizontal como para el vertical, se obtuvo para valores de $\sigma_x = \sigma_y = 0.45$ mrad.

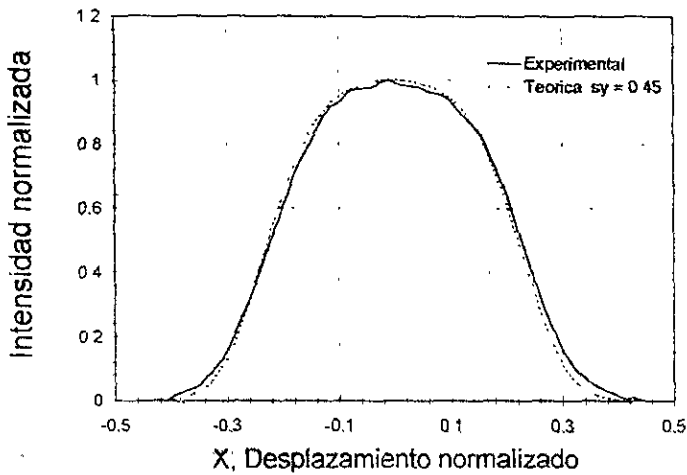
A partir de esta comparación se obtiene la magnitud de los desplazamientos en (x, y) y con ello el tamaño de la imagen encontrándose valores de $X=3\text{cm}$, $Y=2.4\text{cm}$. La figura 5.8 muestra los gráficos del perfil vertical y horizontal correspondientes a los de la figura 5.7, esta vez con intensidad normalizada y valores determinados en x y y , a demás muestra la comparación que guardan con los correspondientes perfiles teóricos. A este conjunto de gráficos les llamaremos gráficos en normalización simple.

Además, del perfil vertical y horizontal de normalización simple se puede también graficar la distribución del flujo radiativo concentrado de la imagen digitalizada en una normalización simple, como lo muestra la Figura 5.9. Así, se establece que, el volumen bajo la superficie de esta figura multiplicado por un factor constante debería de dar la potencia interceptada por el receptor (Q_o), es decir:

$$Q_o = \int_{A_r} I_{TN}(x, y) dx dy = C_o \int_{A_r} I_{EN}(x, y) dx dy = C_o V_N \quad 5.10$$

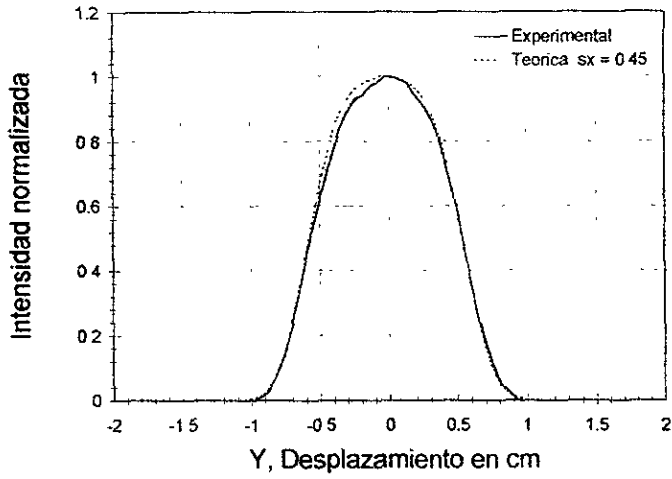


a)

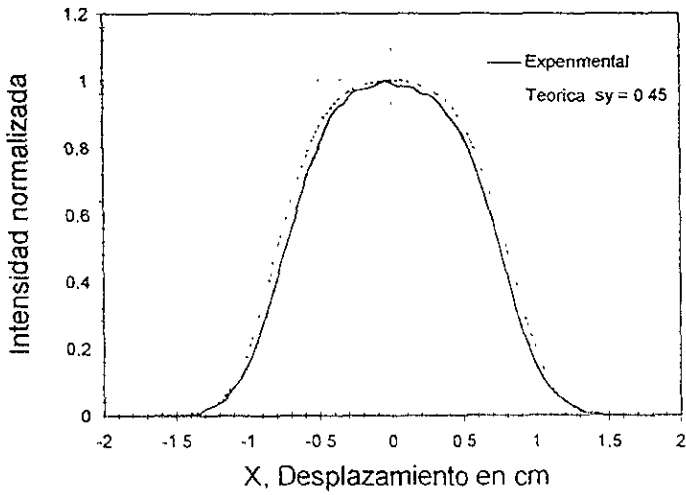


b)

Figura 5.7 Comparación teórica experimental para el grupo A de espejos, imagen doblemente normalizada: a) perfiles horizontal y b) perfil vertical.



a)



b)

Figura 5.8 Comparación teórica experimental para el grupo A de espejos, imagen de normalización simple: a)perfiles horizontal y b)perfil vertical .

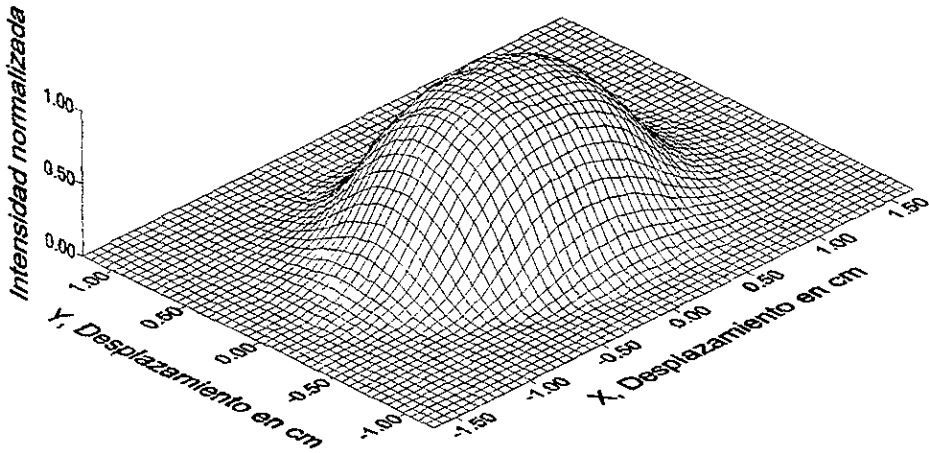


Figura 5.9 Gráfico en 3D, del flujo radiativo concentrado imagen con desplazamientos reales y intensidad normalizada.

que a diferencia del método de la normalización simple en el cual el valor de este dato se determinó experimentalmente, en este método lo conocemos de la simulación hecha por Circe2 el cual da un valor de $Q_o = 337.2$ Watts (ver tabla 5.1, Power on receiver) o bien, se puede determinar integrado el volumen bajo la sabana de la distribución teórica correspondiente al segundo término de la ecuación 5.9. Cabe mencionar que esta integración se llevó a cabo dando un valor próximo al arrojado por Circe2. La ecuación 5.9 se puede establecer también de manera siguiente:

$$Q_o = \int_A I_{TN}(x,y) dx dy - \int_A C_o I_{EN}(x,y) dx dy = \int_A I(x,y) dx dy \quad 5.11$$

Al normalizar con respecto al tamaño de imagen se tiene que $A_T=A_E=A$. Así, la distribución del flujo radiativo concentrado en el plano focal de DEFAC queda determinada nuevamente por la ecuación 5.7, dada por:

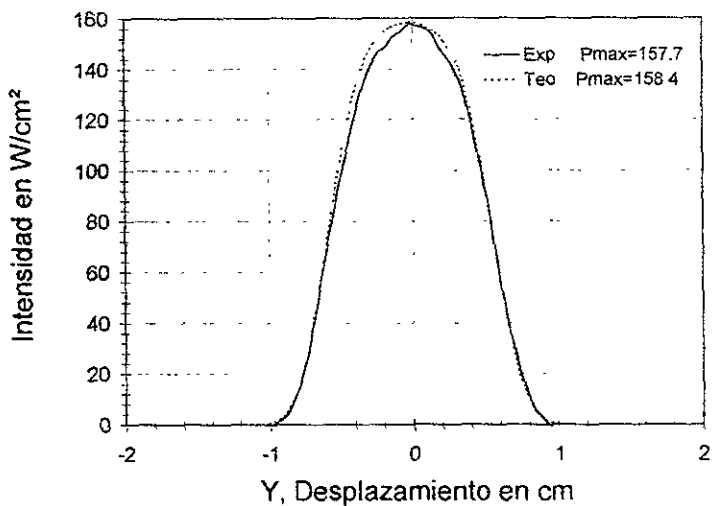
$$I(x, y) = C_o I_{EN}(x, y)$$

donde esta vez, $I_N(x,y)$ es la distribución normalizada del flujo a partir de la imagen digitalizada en base a la comparación con la simulación que Circe2 hace del grupo A de espejos. El coeficiente C_o se determina esta vez, de la ecuación 5.9, de manera que:

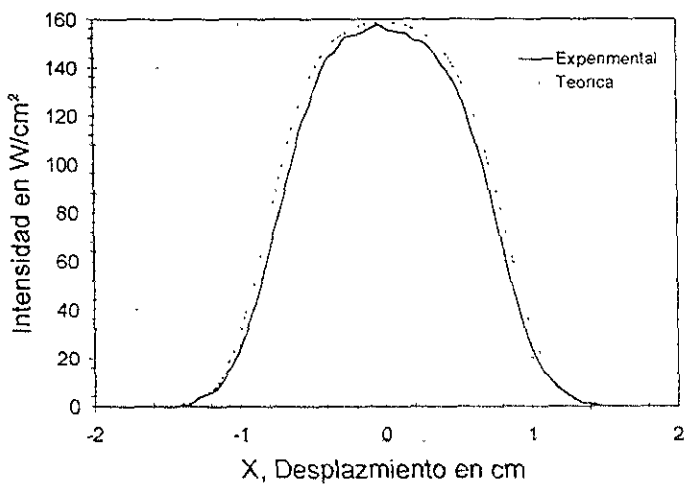
$$C_o = \frac{\int_{A_T} I_{TN}(x,y) dx dy}{\int_{A_E} I_{EN}(x,y) dx dy} = \frac{Q_o}{V_N} \quad 5.12$$

El valor determinado para V_N es de 2.14 cm²-pixel, igual que en el caso del primer método utilizado. De esta manera aplicando la ecuación 5.11 determinamos un valor para $C_o=157.6$ W/cm²-pixel. Con este valor, aplicando la ecuación que determina la distribución del flujo (ecuación 5.7) y auxiliándonos de los programas IMREC.BAS y MSEXP.BAS obtenemos el valor de la intensidad para cada punto (x,y) sobre el receptor de DEFAC. Así de esta manera la Figura 5.10 muestra a los perfiles vertical y horizontal reconstruidos y la comparación con sus correspondientes perfiles teóricos, la Figura 5.11 muestra la distribución en 3D y el gráfico de curvas de nivel para la imagen reconstruida.

A fin de comparar los dos métodos propuestos y así, validar este segundo método desarrollado, la Tabla 5.2 muestra un resumen de los resultados.



a)



b)

Figura 5.10 Comparación teórica experimental para el grupo A de espejos; a) perfil vertical y b) perfil horizontal

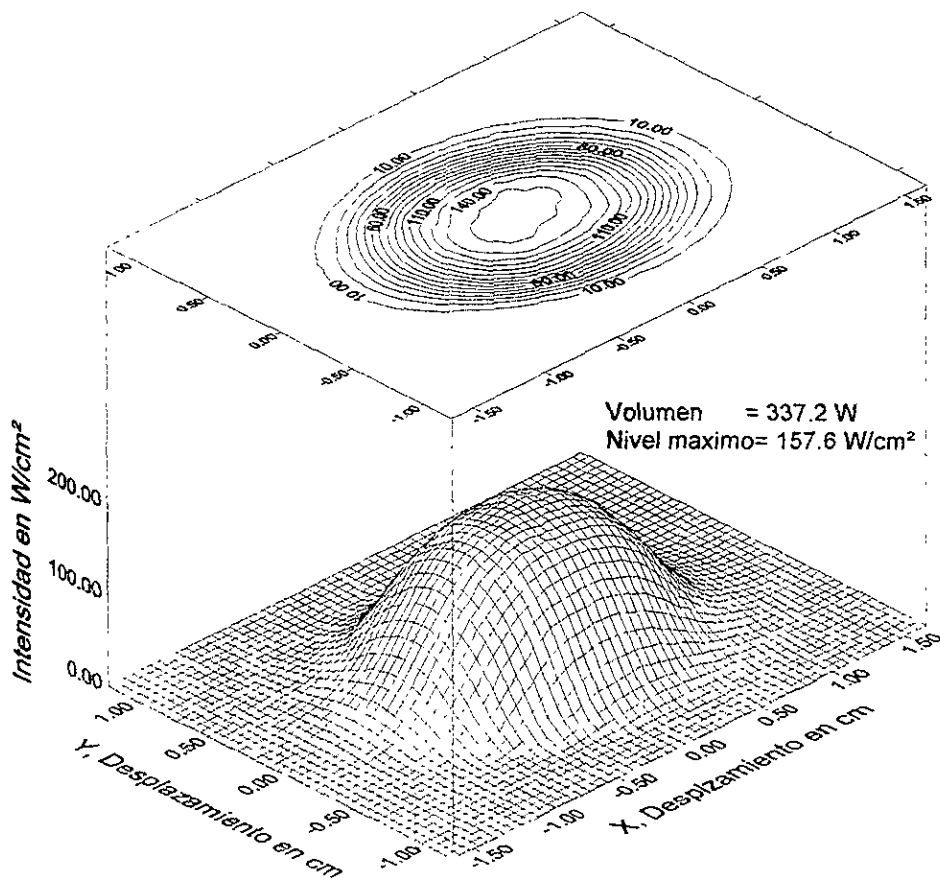


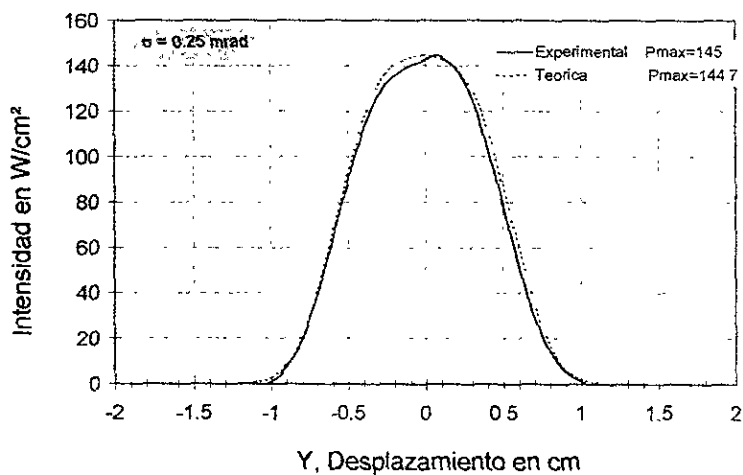
Figura 5.11 Gráfico en 3D y curvas de nivel de la distribución del flujo radiativo concentrado, imagen experimental reconstruida grupo A.

Tabla 5.2 Comparación de resultados de los dos métodos aplicados al grupo A de espejos.

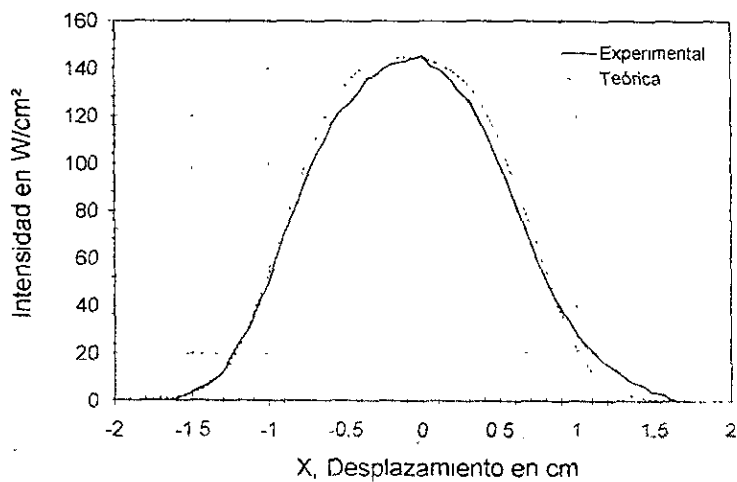
	Método de la normalización simple	Método de la doble normalización
$Q_{0 \text{ inicial}}$	316.1 Watts dado experimentalmente mediante la técnica calorimétrica	337.2 Watts determinado por integración numérica de la distribución por simulación teórica Circe2
C_0	Determinada con un valor de 154.7 W/cm ² -pixel.	Determinada con un valor de 157.6 W/cm ² -pixel
V_{λ}	Determinado por integración numérica, 2.14 W/cm ²	Determinado por integración numérica, 2.14 W/cm ²
Longitud X	Tamaño medido de 2.7 cm	Tamaño determinado de 3 cm
Longitud Y	Tamaño medido de 2.4 cm	Tamaño determinado de 2.4 cm
$Q_{0 \text{ final}}$	316.1 Watts, tomada de la anterior	336.5 Watts determinada por integración numérica
Error % en picos	1.18%	0.22%
Diferencia porcentual $Q_{0 \text{ final}}$ entre ambos métodos		6.5%

5.2 ANALISIS Y DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO RADIAATIVO CONCENTRADO PARA EL GRUPO B, GRUPO C Y GRUPO TOTAL.

A continuación se muestra los resultados obtenidos al aplicar el método de la doble normalización a los grupos restantes, se presentan así, los gráficos mediante los cuales se muestra la comparación teórica experimental de los perfiles, a la misma vez que, se indican el error para el cual se obtuvo esta comparación, la potencia y el nivel de intensidad máxima obtenida para cada caso. De esta manera las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14 muestran las comparaciones teóricas experimentales de los perfiles y las Figuras 5.15, 5.16 y 5.17 muestran los montículos, obtenidos para el grupo B, para el grupo C y para el grupo de los 18 espejos respectivamente.

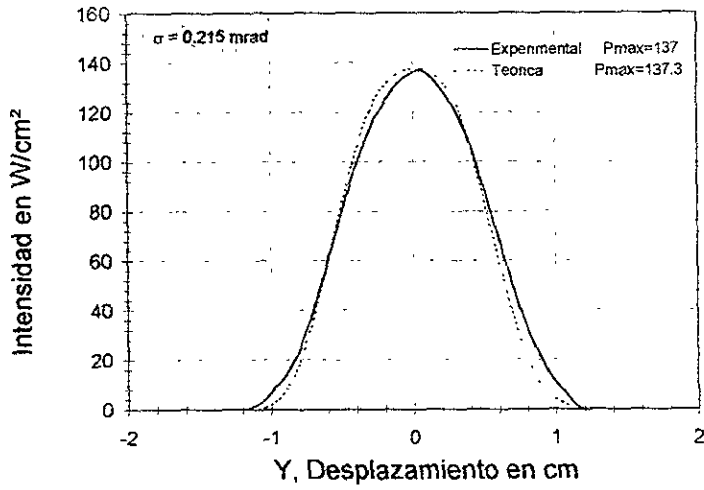


a)

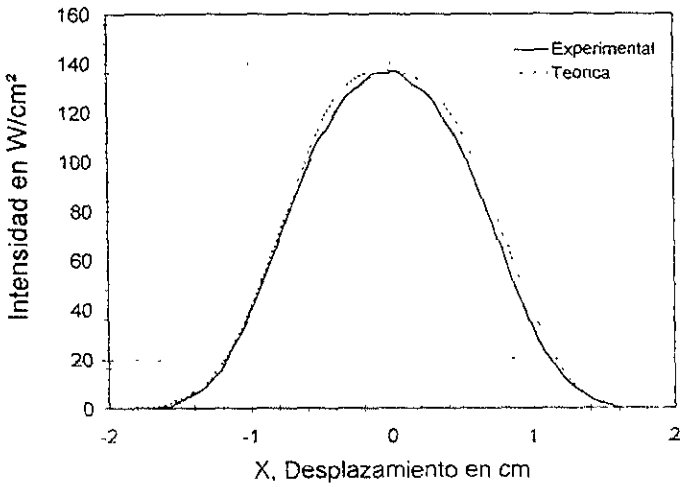


b)

Figura 5.12 Comparación teórica experimental para el grupo B de espejos; a) perfil vertical y b) perfil horizontal.

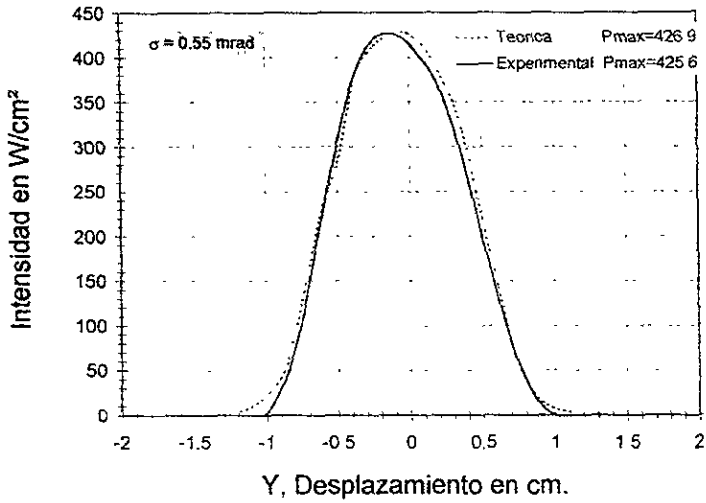


a)

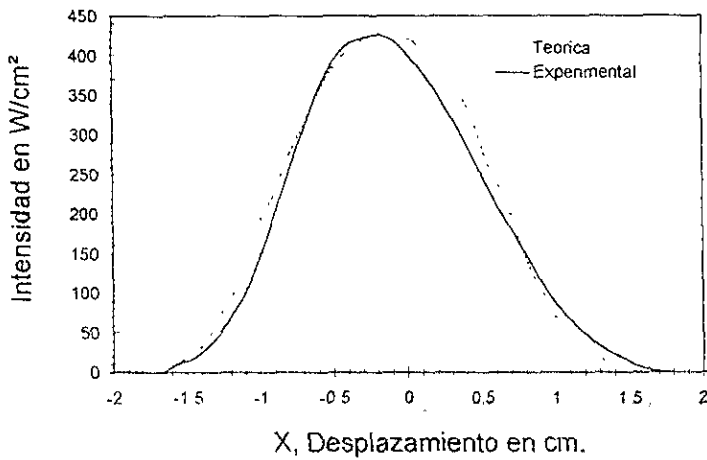


b)

Figura 5.13 Comparación teórica experimental para el grupo C de espejos. a) perfil vertical y b) perfil horizontal.



a)



b)

Figura 5.14 Comparación teórica experimental para el grupo total de espejos: a) perfil vertical y b) perfil horizontal.

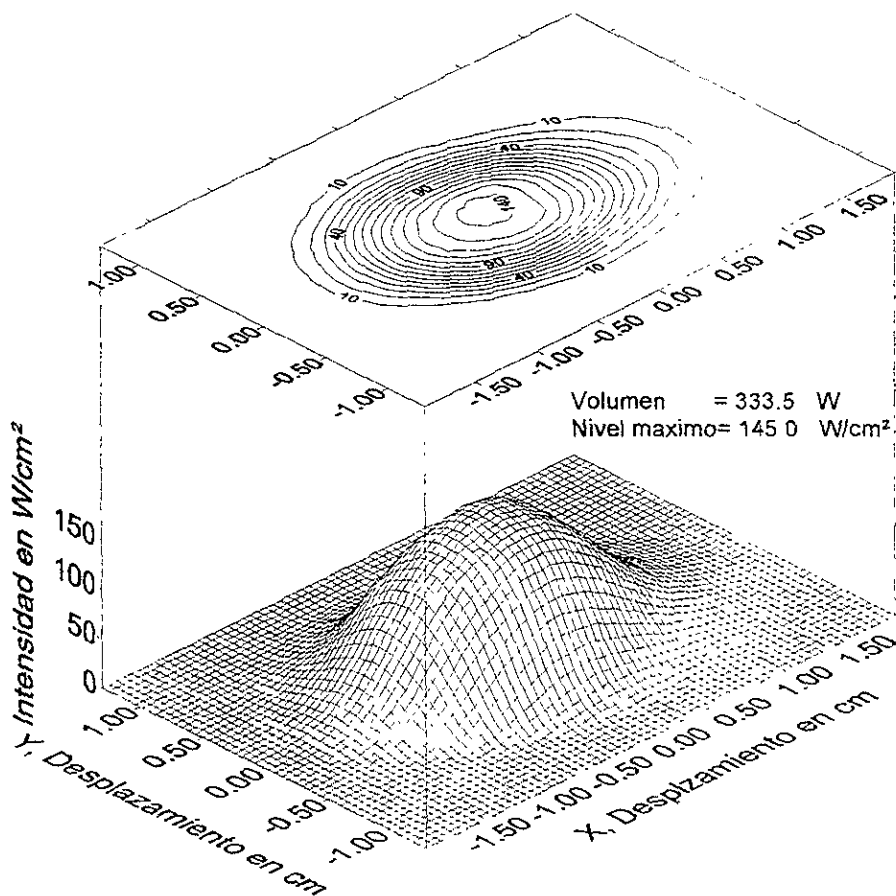


Figura 5.15 Gráfico en 3D y curvas de nivel de la distribución del flujo radiativo concentrado, imagen experimental reconstruida, grupo B

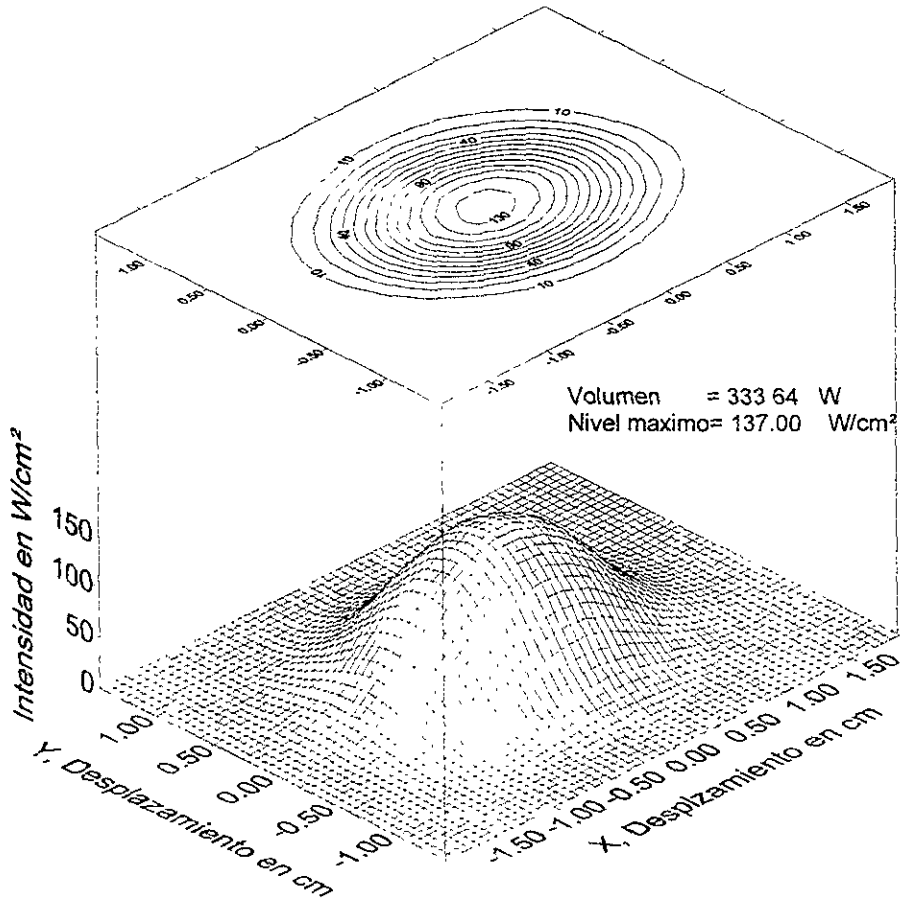


Figura 5.16 Gráfico en 3D y curvas de nivel de la distribución del flujo radiativo concentrado, imagen experimental reconstruida, grupo C.

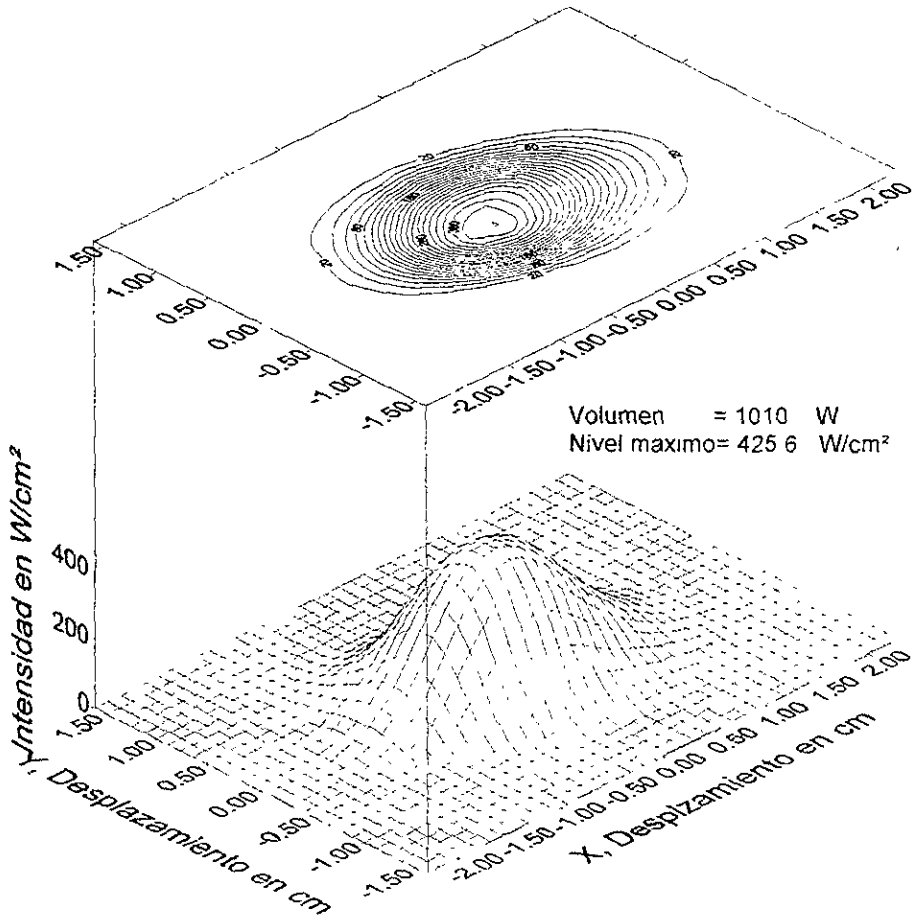


Figura 5.17 Gráfico en 3D y curvas de nivel de la distribución del flujo radiativo concentrado, imagen experimental reconstruida, total 18 espejos.

5.3 RESULTADOS.

A manera de resumen la tabla 5.4 muestra la información primordial recabada para cada grupo de espejos, a partir del análisis desarrollado en este capítulo.

Tabla 5.4 Resumen de resultados.

	G_b	Tamaño de imagen	$V_{T\text{CIRCE2}}$	$V_{T\text{INTEGRADO}}$	$V_{U\text{INTEGRADO}}$	V_N	$P_{T\text{MAX}}$	$P_{E\text{MAX}}$	σ
	W/m ²	cm	Watts			cm ² - pixel	W/cm ²		mrad
Grupo A	867	2.7 x 2.4	337.24	338.12	337.24	2.14	154.7	158.4	0.45
Grupo B	861	3.2 x 2.6	332.70	333.50	332.70	2.31	144.7	145.0	0.25
Grupo C	864	3.8 x 2.9	332.80	333.64	332.80	2.43	137.5	137.0	0.22
Total 18 espejos	863	4.6 x 3.2	1010.00	1021.30	1010.00	2.37	426.9	425.6	0.55

Función de distribución asociada al error de desviación del sistema DEFRAE.

Como parte de los resultados se puede obtener, una vez conocido el valor del error óptico del sistema de 0.55 mrad (ver tabla 5.4), la función error que lo caracteriza, así las figura 5.18, muestra gráficamente la función error en sus dos cortes el perfil vertical y horizontal que cruzan por el máximo de la distribución

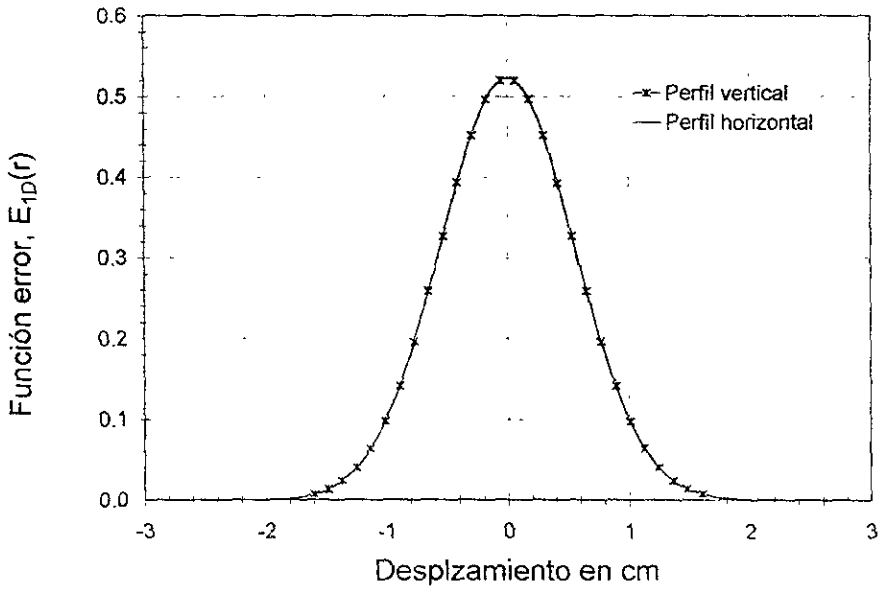


Figura 5.18 Función de distribución asociada al error de desviación del sistema DEFRAC.

6. CONCLUSIONES.

La caracterización óptica en sistemas de concentración solar de foco puntual, es importante debido a que, por un lado determina el error óptico del sistema y por otro lado, determina la distribución de los flujos radiativos concentrados. Así conociendo ambos parámetros se puede definir forma y dimensiones de sistemas receptores de tal manera que, este diseño optimice el aprovechamiento de la energía recibida.

En principio, para el DEFRAC sistema de concentración solar estudiado; considerando una especularidad para el espejo de 0.92 y una radiación directa normalizada a 1000 W/m^2 , se tendría una potencia Q_0 dada por: $G_b \rho A_a$, de 1 168.4 Watts; y se tendría una concentración geométrica de 3854 soles dada por A_r/A_a a la cual le correspondería una distribución uniforme a un nivel constante de 385.4 W/cm^2 . Ahora bien, de los resultados obtenidos para el total de los 18 espejos (tabla 5 4) podemos observar que para los 863 W/m^2 de radiación directa, se tiene una concentración de flujo dada por: $I(x,y)_{p_{max}}/G_b$, de 4 901 soles a la cual le corresponde una distribución no uniforme con un valor de máxima intensidad de 423 W/cm^2 . Si utilizamos la radiación solar directa normalizada a 1000 W/m^2 y esta concentración de 4901 soles se obtiene un valor máximo de intensidad I_{max} de 490.1 W/cm^2 . Contrastando ambos cálculos se aprecia la marcada diferencia entre lo que en principio podemos deducir y lo que en realidad es. De ahí la importancia de la caracterización óptica que se le ha realizado al DEFRAC, en este trabajo de tesis.

A manera de resumen podemos concluir de este trabajo lo siguiente:

1. Se determinó experimentalmente, la distribución del flujo radiativo concentrado por el grupo A de espejos, encontrándose para una radiación solar directa de 867 W/m^2 y una especularidad de espejo de 0.92, una densidad de flujo de 155 W/cm^2 (1.55 MW/m^2) correspondiente a una concentración de 1 784 soles; encontrándose, mediante comparación teórica, un error normal de superficie de 0.45 mrad.
2. Se determinó experimentalmente mediante comparación teórica, la distribución del flujo radiativo concentrado por el grupo B de espejos, encontrándose para una radiación solar directa de 861 W/m^2 y una especularidad de espejo de 0.92, una densidad de flujo de 145 W/cm^2 (1.45 MW/m^2) correspondiente a una concentración de 1 684 soles; encontrándose además un error normal de superficie de 0.25 mrad
3. Se determinó experimentalmente mediante comparación teórica, la distribución del flujo radiativo concentrado por el grupo C de espejos, encontrándose para una radiación solar directa de 864 W/m^2 y una especularidad de espejo de 0.92, una densidad de flujo de 137 W/cm^2 (1.37 MW/m^2) correspondiente a una concentración de 1 586 soles; encontrándose además un error normal de superficie de 0.215 mrad.
4. Se determinó experimentalmente mediante comparación teórica, la distribución del flujo radiativo concentrado para el total de los 18 espejos, encontrándose para una radiación solar directa de 863 W/m^2 y una especularidad de espejo de

0.92, una densidad de flujo de 423 W/cm^2 (4.23 MW/m^2) correspondiente a una concentración de 4 903 soles; encontrándose además un error normal de superficie de 0.54 mrad. Además se determinó la función de distribución asociada a este error de desviación.

5. Se midió el tamaño real de la imagen solar para el grupo A de espejos, mediante una fotografía tomada a la misma. De esta manera para una forma geoméricamente aproximada a una elipse medimos 2.7cm para el semi-eje mayor y 2.4cm para el semi-eje menor, que correspondería a una área aproximada de 5.2 cm^2 .
6. Se determinaron mediante Circe2 los tamaños de imágenes correspondientes al grupo B, al grupo C y al total de los 18 espejos; teniendo imágenes de 3.2×2.6 , 3.8×2.9 , y 4.6×3.2 respectivamente. Tamaños de imágenes que se esperarían medir posteriormente, por técnica fotográfica y así, comprobar estos resultados.
7. Por último, se pudo decir que con la contribución de este trabajo, se concluye la caracterización del DEFRAC como instrumento de investigación.

Para estudios relacionados con la determinación de la distribución de flujos radiativos en el DEFRAC, que posteriormente se realicen utilizando el procedimiento mostrado a lo largo de esta tesis, recomiendo lo siguiente:

- Caracterizar el comportamiento sensitivo de la cámara CCD-COHU 4800, para ello se recomienda trabajar con placas receptoras de diferentes materiales, trabajar con la contribución de un solo espejo, considerar un mismo intervalo de

tiempo de exposición del flujo solar concentrado en cada captura de imagen y trabajar con una radiación solar directa que no tenga variaciones grandes en la captura del inicio al final de las muestras a analizar.

- Utilizar una cámara CCD para observar al Sol, con el objetivo de determinar la distribución del flujo solar que esta incidiendo en los espejos en el momento en que una segunda cámara captura la imagen solar concentrada, así de esta manera se utilizaría en Circe2 no una forma tabular de la distribución del Sol sino una forma mas adecuada, que con seguridad daría una mejor aproximación al hacer las comparaciones teórica-experimental.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Johnston G., "Flux Mapping the 400 m² "Big Dish" at Dish Australian National University", Transaction of the ASME Vol. 117, November 1995, pp 290-293.
- [2] Manrique J., Energía Solar: Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas, Harla, 1984, Prólogo.
- [3] Stine, W. B. y B.W. Diver, "A Compendium of Solar Dish/Stirling technology", SAND93-7026 uc-236, Unlimited Release, January 1994.
- [4] Higuera Enrique S., "Sistema de concentración de radiación solar con 18 espejos parabólicos para estudios de campos radiativos", Tesis de licenciatura, C.I.E., Temixco, Mor, 1996.
- [5] Estrada C.A., S.E. Higuera A., J. Cervantes y A.H. Oskam, "Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados" DEFRAC. Memorias del 1^{er} Simposio Nacional sobre Tecnologías de Concentración Solar. Fac. de Ingeniería UAEM, Toluca, Edo. de Mex., julio 1995.
- [6] Grajeda Pérez M., "Sistema de control del DEFRAC (Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados)", Tesis de licenciatura, C.I.E., Temixco Mor., 1997.
- [7] Grajeda Monica., J. G. Pérez, G. O. Díaz, J. Cervantes y C.A. Estrada, "Sistema de control para el seguimiento solar del DEFRAC". Memorias de la XX Semana Nacional de Energía Solar, Xalapa, Veracruz, 1996, pp 266-270.
- [8] Cruz Felipe., Estrada C.A., y Cervantes J., "Caracterización del DEFRAC, Parte I: Estudio térmico" Memorias de la XXI-Semana Nacional de Energía Solar, Chihuahua, Chihuahua 1997
- [9] Cruz Sesma F., "Diseño Construcción y Prueba de un Calorímetro para el DEFRAC (Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados)", Tesis de Maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CENIDET, Cuernavaca Mor., 1997.

- [10] Riveros D., "Curvas de distribución de energía en un concentrador de 19 espejos parabólicos", Tesis de licenciatura, UNAM., Méx., 1996.
- [11] Quiñones A. J., Estrada C.A., Cruz Felipe., y Cervantes J., "Caracterización del DEFRAC, Parte II: Estudio óptico, primeros resultados", Memorias de la XX1 Semana Nacional de Energía Solar, Chihuahua, Chihuahua, 1997.
- [12] Duffie, J.A. y W.A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Process", John Wiley & Sons Inc. 1991.
- [13] Oskam A.H., S. Higuera, J. Cervantes, C.A. Estrada., "Diseño y Construcción de un Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados"., Laboratorio de Energía Solar, IIM-UNAM, 1994, pp. 272-275.
- [14] Almanza R., C. Jiefeng., G. Correa., "Nueva Opción para Concentradores Solares:Espejos de Aluminio de Primera Superficie"., Instituto de Física, UNAM. pp. 74-77.
- [15] Romero, V.J., "Circe2/Dekgen2: A Software Package for Facilitated Optical Analysis of 3-D Distributed Solar Energy Concentrators", Sandia National Laboratories, SAND91-2238, 1994.

FUNDAMENTOS Y CARACTERISTICAS DE LA RADIACION SOLAR.

El cálculo de la radiación solar recibida en un tiempo y lugar en particular, involucra varios factores debidos a:

- La rotación y traslación de la tierra.
- La atenuación atmosférica.
- El tiempo de día y año.
- La localización geográfica del lugar.

En este apéndice se presentan varios aspectos de la insolación solar, a demás muestra el método para definir un punto en la superficie de la tierra con respecto a los rayos solares (geometría solar) por medio de la latitud, el ángulo horario y la declinación.

La tierra recibe una enorme cantidad de energía en forma de radiación solar. De una manera tan natural sostenida sobre la tierra y causando cambios de tiempo. La energía solar progresivamente se ha convertido en una popular fuente de energía renovable, con aplicaciones térmicas y fotovoltaicas.

No obstante, los sistemas de conversión de energía solar difieren de otros sistemas de conversión de energía en una variada e importante manera. La cantidad de energía disponible sobre la tierra no es fácilmente controlable, es una variable la cual depende principalmente de los factores siguientes:

- 1 Distancia Tierra-Sol. Este parámetro no es constante, debido a que la trayectoria de la Tierra alrededor del Sol es una elipse.
- 2 Inclinación del eje de la Tierra. El eje de la Tierra está inclinado 23.5° con respecto a la órbita que describe alrededor del Sol. Esta posición inclinada junto con el periodo rotacional de la Tierra es determinante en la distribución de la radiación solar sobre la superficie de la Tierra, originando así las cambiantes extensiones del día y la noche y los cambios de estación.
- 3 Atenuación atmosférica. La Tierra esta rodeada por una atmósfera que contiene varias constituciones gaseosas, partículas suspendidas (polvo), materia líquida (nubosidad) y otros sólidos diminutivos (contaminación). Por tanto, la radiación solar es atenuada durante este pasaje a través de la atmósfera, la cantidad atenuada depende de las condiciones atmosféricas.

La nubosidad es la variable atmosférica de mayor importancia, que afecta la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra; frecuentemente la nubosidad puede reducir la cantidad de radiación solar incidente en un 90%.

4. Localización geográfica del colector. Regiones con pequeñas latitudes, en general, reciben más radiación solar, debido a la menor oblicuidad de los rayos; es decir más radiación solar es disponible para colectores en regiones soleadas que en nubladas o climas lluviosos.
5. Orientación del colector. Este factor es extremadamente importante. Colectores con seguimiento de la trayectoria aparente del sol para permanecer perpendiculares a los rayos solares, interceptan más radiación solar que los colectores estacionarios. De ahí la importancia de mantener la perpendicularidad entre colector y el rayo solar.
6. Tiempo de día. Generalmente, menor radiación es disponible para colectores expuestos a la radiación solar a la temprana mañana y puesta del sol que al medio día.
7. Tiempo de año. Para varias localizaciones geográficas más energía solar esta disponible durante el verano que en el invierno, simplemente porque los días son más largos en verano.

1. Consideraciones básicas de geometría solar.

La tierra tiene dos movimientos, básicos en el estudio de la geometría solar:

- Uno la revolución de la tierra alrededor del sol.
- Y dos la rotación de la tierra alrededor de su eje.

La tierra marca una rotación cada 24 hrs. y completa una revolución alrededor del sol en un periodo de 365.25 días aproximadamente. La tierra describe una elipse rodeando al sol. La trayectoria aparente del sol, como es visto desde la tierra es conocida como la eclíptica. La excentricidad de la tierra es muy pequeña ($e = 0.01673$) así, la órbita es en realidad casi circular. Así, la corta distancia entre la tierra y el sol (cuando la tierra está en perihelio) y la distancia larga (cuando la tierra esta en afelio), son respectivamente dadas por.

$$R_p \text{ Distancia corta tierra-sol} = a(1-e) = 147.10 \times 10^6 \text{ Km}$$

$$R_q \text{ Distancia larga tierra-sol} = a(1+e) = 152.10 \times 10^6 \text{ Km}$$

$$\text{Diferencia entre ambas distancias} = (R_p - R_q) = 5\,000\,000 \text{ Km}$$

donde a es el semieje mayor de la órbita terrestre. La así llamada, distancia principal de la tierra al sol es definida como la media aritmética de las distancias del afelio y el perihelio, y es por tanto igual a a . El valor de este número es de 149.5985×10^6 Km. Así tenemos que, alrededor del 3 de enero la tierra esta más próxima al sol mientras que sobre casi el 1° de julio está esta más distante.

El eje de la tierra está inclinado 23.45° con respecto a su órbita alrededor del sol. En este movimiento orbital la tierra mantiene su eje orientado en la misma dirección. Junto con los movimientos de traslación y rotación de la tierra la inclinación es un factor importante en la distribución de la radiación solar sobre la superficie de la tierra. La figura A1 muestra esquemáticamente el efecto de la inclinación del eje de la tierra para las estaciones del año y la figura A2 muestra la posición relativa de la tierra con respecto al sol, rayos en el solsticio de invierno y el solsticio de verano. En el solsticio de invierno (22 de diciembre) el Polo Norte

esta inclinado 23.45° lejos del sol. Todo punto sobre el norte de la superficie de la tierra con 66.5° latitud norte será una total obscuridad para todas las 24 hrs mientras las regiones con latitud de 23.45° de el polo sur recibirá continua luz solar. En el tiempo de el solcicio de verano (24 de junio), la situación es inversa. En el tiempo de los dos equinoccios (22 de marzo y 23 de septiembre, aproximadamente) ambos polos son equidistantes en la distancia tierra-sol y todo punto sobre la superficie de la tierra, tendrá 12 horas de día luz y 12 horas de obscuridad.

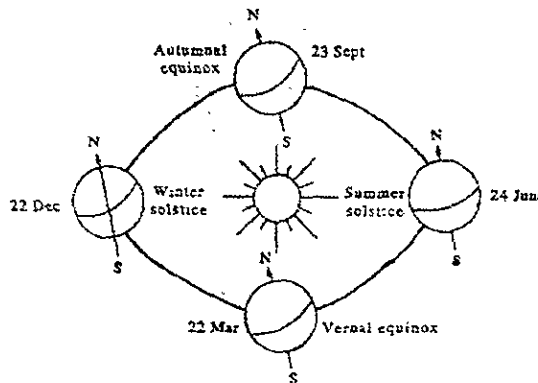


Figura A1 Posición de la Tierra con respecto al Sol en solsticios y equinoccios.

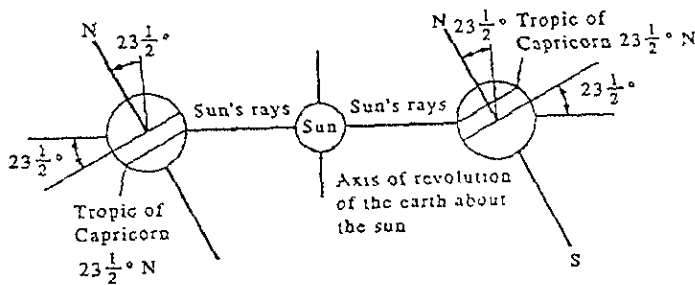


Figura A.2 Rayos en el solsticio de invierno y el solsticio de verano

2. Angulos básicos tierra-sol.

Para el cálculo de radiación solar y en el diseño de dispositivos de seguimiento de control solar, el conocimiento de la trayectoria solar en el cielo, durante los días de un año en un particular lugar es un prerrequisito fundamental. Para especificar la posición del sol en el cielo

en un particular tiempo, se utiliza para ello dos principales ángulos, el ángulo de altitud solar y el ángulo de azimuth solar. Desde nuestra experiencia tardía, el sol inicia su movimiento cruzando el cielo desde una dirección este a oeste, siguiendo la trayectoria de un arco circular, además de saber que su movimiento diurno es más largo en verano que en invierno. La figura A3 esquematiza una muestra de la aparente trayectoria solar y define a los ángulos solares zenith θ_z , altitud α , y azimuth β . Considerando un punto **P** sobre la superficie de la tierra cuyo centro se localiza en **O**. Así **op** representa la dirección del sol en cualquier instante. Así de esta manera tenemos que, el ángulo de altitud solar (α), está definido como el ángulo formado en un plano vertical entre el rayo solar y la proyección horizontal del rayo solar. El ángulo del Azimuth A_z , es el ángulo en el plano horizontal medido del sur a la proyección horizontal del rayo solar. Por ultimo, definimos el ángulo del zenith θ_z , al ángulo formado en el plano vertical entre la vertical **OV** y el rayo solar

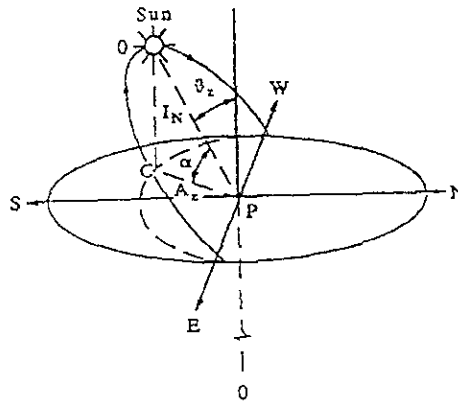


Figura A3 Ángulos solares básicos.

Latitud y Longitud.

Por otro lado, para especificar la posición de un punto sobre la superficie de la Tierra, se deben considerar la longitud λ , y la latitud ϕ , del punto en cuestión. De esta manera, para saber estas magnitudes, nos auxiliaremos de la figura A4, la cual muestra a la Tierra seccionada a lo largo del eje polar línea NOS y a lo largo del círculo ABRDA que marca el ecuador. Estando el centro de la tierra en el punto O, considere un punto C sobre la superficie de la Tierra, definimos a un meridiano como el semicírculo que pase a través del punto C y los polos. de esta manera el meridiano que pasa a través del observatorio en Greenwich, U. K. es llamado por convenio internacional primer meridiano o meridiano de Greenwich el cual será tomado como referencia. Así el ángulo formado entre el primer meridiano y cualquier otro meridiano será llamada longitud. Entonces el ángulo BOJ de la figura A4 es la longitud para el punto C. Las longitudes serán medidas de 0 a 180° hacia el este de Greenwich y de 0 a 180° hacia el oeste de Greenwich.

Por otro lado, definimos a la latitud de un punto sobre la superficie terrestre, al ángulo formado por la abertura entre el centro de la Tierra, el punto en cuestión y el cruce con el ecuador. De esta manera, en la figura A4 el ángulo formado por COB será la latitud del punto C. Por lo tanto, la latitud de un punto convenido siempre será menor que 0 o igual a 90°.

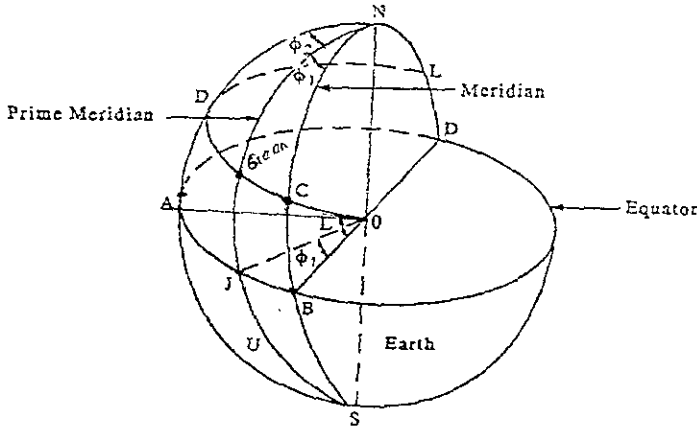


Figura A4 Posición de un punto sobre la superficie de la Tierra

Angulo horario y declinación solar

La posición de un punto P sobre la superficie de la Tierra con respecto a los rayos solares puede ser determinada en algún instante conociendo la latitud del lugar L, el ángulo horario (w) y la declinación solar (δ). Estos ángulos básicos son mostrados en la figura A5. Siendo que, el punto P representa un lugar en el hemisferio norte, tenemos entonces que, el ángulo horario w es el ángulo alrededor de la Tierra traído nuevamente al meridiano del punto P sobre la línea de los rayos solares. Teniendo que para el mediodía solar el ángulo horario es cero. Por otro lado, podemos decir que el ángulo horario expresa el tiempo del día con respecto al mediodía solar, siendo una hora de tiempo igual a 15° de ángulo horario

El desplazamiento angular del Sol desde el plano del ecuador de la Tierra es nombrado la declinación del Sol. Este ángulo varía entre +23 45° y -23 45°, debido a que la Tierra realiza anualmente su revolución alrededor del Sol. Los trópicos de Cáncer y Capricornio encierran solamente la región sobre la Tierra donde los rayos solares golpean normal a la superficie en alguna época del año. El día corto del año ocurre en el hemisferio norte cuando el Sol se encuentra verticalmente arriba del trópico de Capricornio en latitud de 23 45°

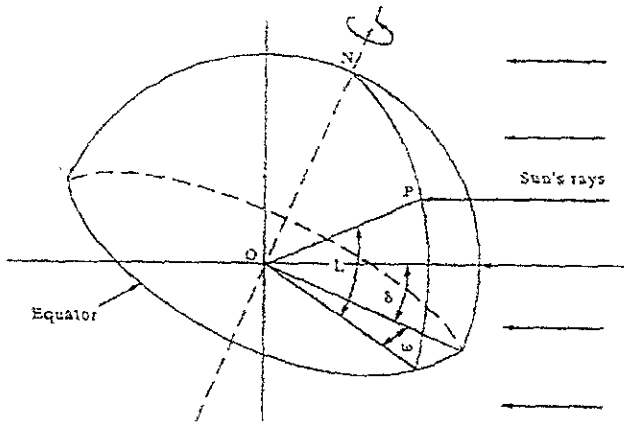


Figura A5 Latitud, ángulo horario y declinación solar.

Los valores de la declinación solar durante un año pueden ser aproximadamente determinados por la siguiente ecuación:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left[360 \frac{284 + n}{365} \right] \quad A1$$

donde n es el día del año. Debido a que el periodo en que la Tierra completa una revolución alrededor del Sol no coincide exactamente con el calendario del año, la declinación solar varía levemente para la misma fecha año con año.

3. Tiempo solar y ecuación del tiempo.

Cuando la Tierra se mueve alrededor del Sol, describe una trayectoria elíptica, por esta razón la velocidad de la Tierra alrededor del Sol no es constante. El tiempo solar promedio es el tiempo solar local asumiendo que la Tierra se mueve con una velocidad constante. Por otro lado, el tiempo de un día solar es el intervalo de tiempo en que el sol aparece tomando por completo un ciclo alrededor de un observador sobre la superficie de la Tierra, este día solar varía en longitud durante el año y no es necesariamente de 24 horas, tanto como, varía el tiempo durante el año en que el Sol aparece temprano o más tarde. La diferencia entre el verdadero tiempo solar y el tiempo solar promedio, es lo que se le ha llamado ecuación del tiempo. La ecuación del tiempo es un factor de corrección que depende del día del año.

Por otro lado, el tiempo solar promedio puede determinarse por la siguiente ecuación:

$$T_{\text{s promedio}} = T_{\text{oficial}} + ET + \frac{60}{15}(\lambda_{\text{ref}} - \lambda_{\text{local}}) \quad A2$$

donde: T_{oficial} es el tiempo comúnmente manejado en nuestros relojes.

ET, ecuación de tiempo dada por:

$$ET = (0.1236 \text{ sen } X - 0.0043 \text{ cos } X + 0.1538 \text{ sen } 2X + 0.0608 \text{ cos } 2X) \quad A3$$

$$X = \frac{360^\circ (n - 1)}{365.242} \quad n = \text{número del día del año}$$

λ_{ref} , longitud de referencia, normalmente se toma la correspondiente al meridiano de Greenwich.

λ_{ref} , longitud del lugar correspondiente a su meridiano.

LISTADO DE PROGRAMAS.

```
=====
PROGRAMA: EXPSURF.BAS
CIE UNAM
PROGRAMADOR. J. DE JESUS QUIÑONES AGUILAR
MAYO 26, 1997
```

" EL PROGRAMA GENERA LA MATRIZ DE SALIDA, CORRESPONDIENTE A LA PARTE EXPERIMENTAL IMAGEN DIGITALIZADA, QUE SERA LEIDA POR SURFER PARA SU GRAFICACION EN 3D. CON ESTE PROGRAMA SE PODRA OBTENER LOS GRAFICOS EN 3D PARA LA IMAGEN EN PIXEL Y PARA LAS NORMALIZACIONES QUE SE REQUIERAN.

```
ARCHIVO DE ENTRADA: * CSV MATRIZ REDUCIDA PROVENIENTE DE EXCEL.
ARCHIVO DE SALIDA: MSEXP.DAT VECTORES DE SALIDA X(I),Y(J) Y Z(K)
```

ASIGNACION DE VARIABLES

```
IC = 56      * Arreglo matricial de
JF = 46      * Y(j)(filas) por X(i)(columnas)

DIM A(JF, IC) AS SINGLE
DIM X(IC), Y(JF) AS SINGLE

RANGOX = 56  * TAMANO DE LA PARTICION
RANGOY = 46

DELTX = RANGOX / (IC - 1)
DELTY = RANGOY / (JF - 1)
```

LECTURA DEL ARCHIVO FUENTE PARA SU PROCESAMIENTO

```
OPEN "C:\ESTUDIAN\JESUS\Afuente\Grupoan\GA.CSV" FOR INPUT ACCESS READ AS #1
CLS
PRINT "ELEMENTOS DE LA MATRIZ FUENTE ELIMINANDO EL RUIDO"
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR:", K
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    INPUT #1, A(J, I)
    A(J, I) = A(J, I) - 10
    IF A(J, I) < 0 THEN A(J, I) = 0
    PRINT A(J, I);
  NEXT I
  PRINT
NEXT J
CLOSE #1
```

LOCALIZACION DEL MAXIMO

```
MAX = A(1, 1)
FOR J = 2 TO JF
  FOR I = 2 TO IC
    IF A(J, I) > MAX THEN
      MAX = A(J, I)
      JMAX = J
      IMAX = I
    ELSE
      END IF
  NEXT I
NEXT J
PRINT
PRINT "LOCALIZACION DE LA INTENSIDAD MAXIMA"
PRINT
PRINT "VALOR MAXIMO " MAX " COORDENADAS X(I)-", IMAX, " Y(J)-", JMAX
PRINT
```

'NORMALIZACION DE LA MATRIZ

```
PRINT
PRINT "ELEMENTOS DE LA MATRIZ NORMALIZADA"
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.", K
PRINT
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    A(J, I) = A(J, I) / MAX
    PRINT A(J, I);
  NEXT I
PRINT
NEXT J
```

'DETERMINACION DEL VOLUMEN'

```
SVOL = 0
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    VOLUMEN = (DELTX * DELTY * A(J, I))
    SVOL = SVOL + VOLUMEN
  NEXT I
NEXT J
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.", K
PRINT
PRINT "PARAMETROS QUE DETERMINAN EL FLUJO RADIATIVO CONCENTRADO EN W/CM^2"
PRINT
PRINT "VOLUMEN INTEGRADO EXPERIMENTAL NORMALIZADO ES ", SVOL

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.", K
```

'GENERACION DE LOS VECTORES X(i), Y(j), y Z(k) QUE SERAN LEIDOS POR SURFER.

```
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    X(I) = (I - ((IC + 1) / 2)) * DELTX
    Y(J) = (J - ((JF + 1) / 2)) * DELTY
    PRINT USING "### ###.### ###.### ##", X(I), Y(J), A(J, I)
  NEXT I
NEXT J
```

OPEN "C:\ESTUDIAN\JESUS\Asalida\MSEXPNN.DAT" FOR OUTPUT ACCESS WRITE AS #1

```
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    X(I) = (I - ((IC + 1) / 2)) * DELTX
    Y(J) = (J - ((JF + 1) / 2)) * DELTY
    PRINT #1, USING "### ###.### ###.### ##"; X(I), Y(J), A(J, I)
  NEXT I
NEXT J
CLOSE #1
END
```

* PROGRAMA: VNNEXP.BAS

Vier-20-jun. 97

* CIE UNAM

* PROGRAMADORES CLAUDIO A ESTRADA GASCA Y J DE JESUS QUIÑONES AGUILAR

'EL PROGRAMA DETERMINA LOS VECTORES X(r) v Y(r) DE UN PUNTO MAXIMO CONSIDERADO COMO EL CENTRO DEL ARREGLO MATRICIAL DE NXM ELEMENTOS DE LA IMAGEN DIGITALIZADA.

'ASIGNACION DE VARIABLES

IC = 56 *← Arreglo matricial de
 JF = 46 * Y(i)(filas) por X(i)(columnas)

DIM A(JF, IC) AS SINGLE
 DIM X(IC), Y(JF) AS SINGLE

RANGOX = 3.0 *← TAMAÑO DE LA PARTICION
 RANGOY = 2.4

DELT X = RANGOX / (IC - 1)
 DELT Y = RANGOY / (JF - 1)

'LECTURA DEL ARCHIVO FUENTE PARA SU PROCESAMIENTO'

OPEN "C:\ESTUDIAN\JESUSIAfuente\Grupoan\GA CSV " FOR INPUT ACCESS READ AS #1
 CLS
 PRINT "ELEMENTOS DE LA MATRIZ FUENTE ELIMINANDO EL RUIDO"
 PRINT
 INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.", K
 FOR J = 1 TO JF
 FOR I = 1 TO IC
 INPUT #1, A(J, I)
 A(J, I) = A(J, I) - 10
 IF A(J, I) < 0 THEN A(J, I) = 0
 PRINT A(J, I);
 NEXT I
 PRINT
 NEXT J
 CLOSE #1

'LOCALIZACION DEL MAXIMO

MAX = A(1, 1)
 FOR J = 2 TO JF
 FOR I = 2 TO IC
 IF A(J, I) > MAX THEN
 MAX = A(J, I)
 JMAX = J
 IMAX = I
 ELSE
 END IF
 NEXT I
 NEXT J
 PRINT
 PRINT "LOCALIZACION DE LA INTENSIDAD MAXIMA"
 PRINT
 PRINT "VALOR MAXIMO: ", MAX; "COORDENADAS. X(i)=", IMAX, " Y(j)=", JMAX
 PRINT

'NORMALIZACION DE LA MATRIZ

PRINT
 PRINT "****ELEMENTOS DE LA MATRIZ NORMALIZADA****"
 PRINT
 INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K
 PRINT
 FOR J = 1 TO JF
 FOR I = 1 TO IC
 A(J, I) = A(J, I) / MAX
 PRINT A(J, I);
 NEXT I
 PRINT
 NEXT J

DETERMINACION DEL VOLUMEN

```

SVOL = 0
FOR J = 1 TO JF - 1
  FOR I = 1 TO IC - 1
    ALTPROM = (A(J, I) + A(J, I + 1) + A(J + 1, I) + A(J + 1, I + 1)) / 4
    VOLUMEN = (DELTX * DELTY * ALTPROM)
    SVOL = SVOL + VOLUMEN
  NEXT I
NEXT J
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.", K
PRINT
PRINT "VOLUMEN INTEGRADO EXPERIMENTAL NORMALIZADO ES.": SVOL

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K

```

RECONSTRUCCION DE LA IMAGEN

```

FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    A(J, I) = A(J, I)
    PRINT A(J, I),
  NEXT I
  PRINT
NEXT J

```

DEFINICION LOS VECTORES X(I)MAXIMO y Y(J)MAXIMO

```

PRINT
PRINT "LOCALIZACION DE LOS CORTES. QUE DEFINEN AL PUNTO MAXIMO"

FOR I = 1 TO IC
  X(I) = (I - ((IC + 1) / 2)) * DELTX
NEXT I

FOR J = 1 TO JF
  Y(J) = (J - ((JF + 1) / 2)) * DELTY
NEXT J

```

ESCRITURA DEL ARCHIVO

```

PRINT
PRINT "SECCION VERTICAL "
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K
FOR J = 1 TO JF
  PRINT USING "###.###.#####.##", Y(J), A(J, IMAX),
  PRINT
NEXT J
PRINT "SECCION HORIZONTAL "
PRINT

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.", K

FOR I = 1 TO IC
  PRINT USING "###.###.#####.##", X(I), A(JMAX, I),
  PRINT
NEXT I
PRINT

```

OPEN "C:\ESTUDIANUESUSIAS\aida\vn\NEX VEC" FOR OUTPUT ACCESS WRITE AS #1

```

PRINT #1 "VOLUMEN INTEGRADO EXPERIMENTAL NORMALIZADO ES ", SVOL
PRINT #1

```

```

PRINT #1, "SECCION VERTICAL "
PRINT #1,
FOR J = 1 TO JF
  PRINT #1, USING "###.###,##### ###", Y(J), A(J, IMAX),
  PRINT #1,
  NEXT J

  PRINT #1,

PRINT #1, "SECCION HORIZONTAL "
PRINT #1,
FOR I = 1 TO IC
  PRINT #1, USING "###.###,##### ###", X(I), A(JMAX, I);
  PRINT #1,
  NEXT I
CLOSE #1
END

```

```

=====
* PROGRAMA: CAMBPC.BAS VIER-06-JUNIO 97
* CIE UNAM
* PROGRAMADORES J. DE JESUS QUIÑONES AGUILAR

```

```

* COMENTARIO: EL PROGRAMA HACE EL CAMBIO DE UN ARREGLO MATRICIAL DE 50 X 50 ELEMENTOS EN UN PLANO
POLAR, GENERADOS POR CIRCE2. A UN ARREGLO DE 3 X 2500 EN ELEMENTOS DE X, Y, Z EN UN PLANO CARTESIANO
QUE SERAN LEIDOS POSTERIORMENTE POR EL PAQUETE SURFER.

```

```

* ARCHIVO DE ENTRADA: FLUX MATRIZ DE 50X50 ELEMENTOS, GENERADA POR CIRCE2
* ARCHIVO DE SALIDA * DAT VECTORES X(I), Y(J) Y Z(K), PARA SER LEIDOS POR SURFER

```

```

=====
* ASIGNACION DE VARIABLES
INTEN = 2600
JF = 50          * <----- Arreglo matrcial de
IC = 51          * Y(j)(filas) por X(i)(columnas)
DIM A(JF, IC) AS SINGLE
DIM V(INTEN) AS SINGLE
DIM X(IC), Y(JF) AS SINGLE
DIM THETA(IC) AS SINGLE
DIM RADIO(JF) AS SINGLE

```

```

* LECTURA DEL ARCHIVO FUENTE PARA SU PROCESAMIENTO *

```

```

OPEN "C:\CIRCE2\FLUX " FOR INPUT ACCESS READ AS #1
CLS
PRINT "" ELEMENTOS DE LA MATRIZ FUENTE ""

```

```

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR:", K

```

```

FOR I = 1 TO INTEN
  INPUT #1, V(I)
  PRINT V(I)
NEXT I
PRINT
CLOSE #1

```

```

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.", K

```

```

FOR I = 1 TO JF
  THETA(I) = V(I)
  PRINT THETA(I)
NEXT I

```

```

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K

```

```

* DETERMINACION DEL VECTOR INTENSIDAD, COORDENADA CARTESIANA Z(K) *

```


RANGOX = 6 ← TAMAÑO DE LA PARTICION
 RANGOY = 6 'EN cm

DELT X = RANGOX / (IC - 1)
 DELT Y = RANGOY / (JF - 1)

LECTURA DEL ARCHIVO FUENTE PARA SU PROCESAMIENTO

```
OPEN "C:\CIRCEZJESUS\RSURFERIGA GRD " FOR INPUT ACCESS READ AS #1:
CLS
PRINT """" ELEMENTOS DE LA MATRIZ FUENTE """"
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K
```

```
FOR I = 1 TO DV
  INPUT #1, V(I)
  PRINT V(I)
NEXT I
PRINT
CLOSE #1
```

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K

```
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    A(J, I) = V(I) + (J - 1) * 50
    IF A(J, I) < 0 THEN A(J, I) = 0
    PRINT USING "### ##", A(J, I).
  NEXT I
  PRINT
NEXT J
```

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K

```
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    A(J, I) = A(J, I)
    PRINT USING "### ##", A(J, I).
  NEXT I
  PRINT
NEXT J
```

LOCALIZACION DEL MAXIMO

```
MAX = A(1, 1)
FOR J = 2 TO JF
  FOR I = 2 TO IC
    IF A(J, I) > MAX THEN
      MAX = A(J, I)
      JMAX = J
      IMAX = I
    ELSE
      END IF
  NEXT I
NEXT J
PRINT
PRINT "LOCALIZACION DE LA INTENSIDAD MAXIMA"
PRINT
PRINT "VALOR MAXIMO.", MAX, "COORDENADAS. X(i)=", IMAX, " Y(j)=", JMAX
PRINT
```

NORMALIZACION DE LA MATRIZ

```
PRINT
PRINT "ELEMENTOS DE LA MATRIZ NORMALIZADA"
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K
PRINT
FOR J = 1 TO JF
```

```

FOR I = 1 TO IC
  A(J, I) = A(J, I)
  PRINT A(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J

```

DETERMINACION DEL VOLUMEN NORMALIZADO

```

SVOL = 0
FOR J = 1 TO JF - 1
  FOR I = 1 TO IC - 1
    ALTPROM = (A(J, I) + A(J, I + 1) + A(J + 1, I) + A(J + 1, I + 1)) / 4
    VOLUMEN = (DELTX * DELTY * ALTPROM)
    SVOL = SVOL + VOLUMEN
  NEXT I
NEXT J
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K
PRINT
PRINT "PARAMETROS QUE DETERMINAN EL FLUJO RADIATIVO CONCENTRADO EN W/CM^2"
PRINT
PRINT "VOLUMEN INTEGRADO NORMALIZADO ES "; SVOL

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR: ", K

```

DEFINICION LOS VECTORES X(MAXIMO) y Y(MAXIMO)

```

PRINT

PRINT "LOCALIZACION DE LOS CORTES, QUE DEFINEN AL MAXIMO MATRICIAL"

FOR I = 1 TO IC
  X(I) = (I - ((IC + 1) / 2)) * DELTX
NEXT I

FOR J = 1 TO JF
  Y(J) = (J - ((JF + 1) / 2)) * DELTY
NEXT J

```

ESCRITURA DEL ARCHIVO

```

PRINT
PRINT "SECCION VERTICAL "
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K
FOR J = 1 TO JF
  PRINT USING "###.###,##### ##"; Y(J), A(J, IMAX);
  PRINT
NEXT J
PRINT "SECCION HORIZONTAL: "
PRINT

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K

FOR I = 1 TO IC
  PRINT USING "###.###,##### ##"; X(I), A(JMAX, I);
  PRINT
NEXT I
PRINT

OPEN "C:\ESTUDIAN\JESUS\Asalida\VNTEO.VEC" FOR OUTPUT ACCESS WRITE AS #1

PRINT #1, "VOLUMEN INTEGRADO TEORICO NORMALIZADO ES "; SVOL
PRINT #1,
PRINT #1, "SECCION VERTICAL "
PRINT #1,
FOR J = 1 TO JF

```

```

PRINT #1, USING "###.###,##### ####"; Y(J), A(J, IMAX);
PRINT #1,
NEXT J

PRINT #1,

PRINT #1, "SECCION,HORIZONTAL "
PRINT #1,
FOR I = 1 TO IC
PRINT #1, USING "###.###,##### ####"; X(I), A(JMAX, I);
PRINT #1,
NEXT I
CLOSE #1
END

```

```

PROGRAMA: MSEXP.BAS
CIE UNAM

```

Vier-20-jun. 97

PROGRAMADORES: CLAUDIO A. ESTRADA GASCA, J. DE JESUS QUIÑONES AGUILAR

EL PROGRAMA DETERMINA LOS VECTORES X(c) y Y(c) DEL MAXIMO CONSIDERADO COMO EL CENTRO DEL ARREGLO MATRICIAL EN CADA UNA DE LAS DISTRIBUCIONES DEL FLUJO RADIATIVO CONCENTRADO DE LOS ESPEJOS

ASIGNACION DE VARIABLES

```

IC = 56          <----- Arreglo matricial de
JF = 46          ' Y(j)(filas) por X(i)(columnas)

```

```

DIM A(JF, IC) AS SINGLE
DIM X(IC), Y(JF) AS SINGLE

```

```

RANGOX = 3 3    <----- TAMAÑO DE LA PARTICION
RANGOY = 2 4

```

```

DELT X = RANGOX / (IC - 1)
DELT Y = RANGOY / (JF - 1)

```

LECTURA DEL ARCHIVO FUENTE PARA SU PROCESAMIENTO

```

OPEN "C:\ESTUDIAN\JESUS\Afuente\Grupoan\GA CSV " FOR INPUT ACCESS READ AS #1
CLS
PRINT "ELEMENTOS DE LA MATRIZ FUENTE ELIMINANDO EL RUIDO"
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.", K
FOR J = 1 TO JF
FOR I = 1 TO IC
INPUT #1, A(J, I)
A(J, I) = A(J, I) - 10
IF A(J, I) < 0 THEN A(J, I) = 0
PRINT A(J, I);
NEXT I
PRINT
NEXT J
CLOSE #1

```

LOCALIZACION DEL MAXIMO

```

MAX = A(1, 1)
FOR J = 2 TO JF
FOR I = 2 TO IC
IF A(J, I) > MAX THEN
MAX = A(J, I)
JMAX = J
IMAX = I

```

```

ELSE
END IF
NEXT I
NEXT J
PRINT
PRINT "LOCALIZACION DE LA INTENSIDAD MAXIMA"
PRINT
PRINT "VALOR MAXIMO", MAX; "COORDENADAS: X(i)=", IMAX; " Y(j)=", JMAX
PRINT

```

"NORMALIZACION DE LA MATRIZ"

```

PRINT
PRINT " ***ELEMENTOS DE LA MATRIZ NORMALIZADA*** "
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR:", K
PRINT
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    A(J, I) = A(J, I) / MAX
    PRINT A(J, I),
  NEXT I
  PRINT
NEXT J

```

"DETERMINACION DEL VOLUMEN"

```

SVOL = 0
FOR J = 1 TO JF - 1
  FOR I = 1 TO IC - 1
    ALTPROM = (A(J, I) + A(J, I + 1) + A(J + 1, I) + A(J + 1, I + 1)) / 4
    VOLUMEN = (DELTX * DELTY * ALTPROM)
    SVOL = SVOL + VOLUMEN
  NEXT I
NEXT J
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR:", K
PRINT
PRINT "PARAMETROS QUE DETERMINAN EL FLUJO RADIATIVO CONCENTRADO EN W/CM^2"
PRINT
PRINT "VALOR DE SVOL ES:", SVOL

```

"DETERMINACION DE LA CONSTANTE"

```

PRINT "VOLUMEN EXPERIMENTAL NORMALIZADO", SVOL
Qotao = 337.2
Co = Qotao / SVOL      '----- Constante de integración
PRINT "VALOR DE Co.:", Co
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR:", K

```

"RECONSTRUCCION DE LA IMAGEN"

```

FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    A(J, I) = A(J, I) * Co
    PRINT A(J, I),
  NEXT I
  PRINT
NEXT J

```

"DETERMINACION DEL VOLUMEN REAL RECONSTRUIDO"

```

SVOL = 0
FOR J = 1 TO JF - 1
  FOR I = 1 TO IC - 1
    ALTPROM = (A(J, I) + A(J, I + 1) + A(J + 1, I) + A(J + 1, I + 1)) / 4
    VOLUMEN = (DELTX * DELTY * ALTPROM)

```

```

    SVOL = SVOL + VOLUMEN
NEXT I
NEXT J
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K
PRINT
PRINT "PARAMETROS QUE DETERMINAN EL FLUJO RADIATIVO CONCENTRADO EN W/CM^2"
PRINT
PRINT "VOLUMEN INTEGRADO EXPERIMENTAL REAL ES.": SVOL

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.": K

```

DEFINICION LOS VECTORES X(MAXIMO) y Y(MAXIMO)

```

PRINT
PRINT "LOCALIZACION DE LOS CORTES, QUE DEFINEN AL MAXIMO MATRICIAL"

FOR I = 1 TO IC
    X(I) = (I - ((IC + 1) / 2)) * DELTX
NEXT I

FOR J = 1 TO JF
    Y(J) = (J - ((JF + 1) / 2)) * DELTY
NEXT J

```

ESCRITURA DEL ARCHIVO

```

PRINT
PRINT "SECCION VERTICAL "
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.": K
FOR J = 1 TO JF
    PRINT USING "###.###.#####.##": Y(J), A(J, IMAX),
    PRINT
NEXT J
PRINT "SECCION HORIZONTAL "
PRINT

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K

FOR I = 1 TO IC
    PRINT USING "###.###.#####.##": X(I), A(JMAX, I);
    PRINT
NEXT I
PRINT

```

OPEN "C:\ESTUDIAN\JESUS\A salida\IMSEXP.VEC " FOR OUTPUT ACCESS WRITE AS #1.

```

PRINT #1, "VOLUMEN INTEGRADO EXPERIMENTAL REAL ES "; SVOL
PRINT #1,
PRINT #1, "SECCION VERTICAL "
PRINT #1,
FOR J = 1 TO JF
    PRINT #1, USING "###.###.#####.##": Y(J), A(J, IMAX);
    PRINT #1,
NEXT J

PRINT #1,

PRINT #1, "SECCION HORIZONTAL "
PRINT #1,
FOR I = 1 TO IC
    PRINT #1, USING "###.###.#####.##": X(I), A(JMAX, I);
    PRINT #1,
NEXT I
CLOSE #1

```

END

```

=====
* PROGRAMA: IMGREC.BAS
* CIE UNAM
* PROGRAMADORES: J. DE JESUS QUIÑONES AGUILAR
    
```

Vier-20-jun. 97

```

=====
'EL PROGRAMA GENERA LA MATRIZ DE SALIDA, CORRESPONDIENTE A LA PARTE 'EXPERIMENTAL IMAGEN
RECONSTRUIDA, QUE SERA LEIDA POR SURFER PARA SU 'GRAFICACION EN 3D.
    
```

```

=====
'ASIGNACION DE VARIABLES
    
```

```

IC = 56          '----- Arreglo matricial de
JF = 46          ' Y(i)(filas) por X(i)(columnas)
    
```

```

DIM A(JF, IC) AS SINGLE
DIM X(IC), Y(JF) AS SINGLE
    
```

```

RANGOX = 3.3     '----- TAMAÑO DE LA PARTICION
RANGOY = 2.4
    
```

```

DELTX = RANGOX / (IC - 1)
DELT Y = RANGOY / (JF - 1)
    
```

```

=====
'LECTURA DEL ARCHIVO FUENTE PARA SU PROCESAMIENTO"
    
```

```

OPEN "C:\ESTUDIAN\JESUS\afuente\Grupoan\GA.CSV" FOR INPUT ACCESS READ AS #1
CLS
PRINT "          *** ELEMENTOS DE LA MATRIZ FUENTE ****"
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR.:", K
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    INPUT #1, A(J, I)
    A(J, I) = A(J, I) - 10
    IF A(J, I) < 0 THEN A(J, I) = 0
    PRINT A(J, I),
  NEXT I
  PRINT
NEXT J
CLOSE #1
    
```

```

=====
'LOCALIZACION DEL MAXIMO
    
```

```

MAX = A(1, 1)
FOR J = 2 TO JF
  FOR I = 2 TO IC
    IF A(J, I) > MAX THEN
      MAX = A(J, I)
      JMAX = J
      IMAX = I
    ELSE
      END IF
  NEXT I
NEXT J
PRINT
PRINT "VALOR MAXIMO:", MAX, "COORDENADAS: X(i)=", IMAX, " Y(j)=", JMAX
PRINT
    
```

```

=====
'NORMALIZACION DE LA MATRIZ
    
```

```

PRINT
PRINT "          *** ELEMENTOS DE LA MATRIZ NORMALIZADA *** "
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR ", K
    
```

```

FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    A(J, I) = A(J, I) / MAX
    PRINT A(J, I);
  NEXT I
  PRINT
NEXT J

```

INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR: ", K

DETERMINACION DEL VOLUMEN

```

SVOL = 0
FOR J = 1 TO JF - 1
  FOR I = 1 TO IC - 1
    ALTPROM = (A(J, I) + A(J, I + 1) + A(J + 1, I) + A(J + 1, I + 1)) / 4
    VOLUMEN = (DELTX * DELTY * ALTPROM)
    SVOL = SVOL + VOLUMEN
  NEXT I
NEXT J
PRINT
PRINT "PARAMETROS QUE DETERMINAN EL FLUJO RADIATIVO CONCENTRADO EN W/CM^2"
PRINT
PRINT "VOLUMEN INTEGRADO EXPERIMENTAL NORMALIZADO ES: ", SVOL

```

DETERMINACION DE LA CONSTANTE Co

```

VTEO = 337.2
Co = VTEO / SVOL      ← Constante de integración
PRINT
PRINT "VALOR DE LA CONSTANTE DE INTEGRACION Co", Co
PRINT
PRINT

```

RECONSTRUCCION DE LA IMAGEN SOLAR EXPERIMENTAL

```

PRINT "      *** IMAGEN RECONSTRUIDA ***"
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR: ", K
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    A(J, I) = A(J, I) * Co
    PRINT A(J, I);
  NEXT I
  PRINT
NEXT J

```

DETERMINACION DEL VOLUMEN EXPERIMENTAL RECONSTRUIDO

```

SVOL = 0
FOR J = 1 TO JF - 1
  FOR I = 1 TO IC - 1
    ALTPROM = (A(J, I) + A(J, I + 1) + A(J + 1, I) + A(J + 1, I + 1)) / 4
    VOLUMEN = (DELTX * DELTY * ALTPROM)
    SVOL = SVOL + VOLUMEN
  NEXT I
NEXT J
PRINT
PRINT "VOLUMEN INTEGRADO EXPERIMENTAL ES ", SVOL
PRINT
INPUT "PRESIONE ENTER PARA CONTINUAR: ", K

```

GENERACION DE LOS VECTORES X(i), Y(i), y Z(k) QUE SERAN LEIDOS POR SURFER

```

FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC

```

```

X(I) = (I - ((IC + 1) / 2)) * DELTX
Y(J) = (J - ((JF + 1) / 2)) * DELTY
PRINT USING "###.###,###.###,###.##"; X(I), Y(J), A(J, I)
NEXT I
NEXT J

```

OPEN "C:\ESTUDIANJESUS\Asalida\IMGREC.DAT" FOR OUTPUT ACCESS WRITE AS #1.

```

PRINT "      *** IMAGEN RECONSTRUIDA DE SALIDA ***"
PRINT
FOR J = 1 TO JF
  FOR I = 1 TO IC
    X(I) = (I - ((IC + 1) / 2)) * DELTX
    Y(J) = (J - ((JF + 1) / 2)) * DELTY
    PRINT #1, USING "###.###,###.###,###.##"; X(I), Y(J), A(J, I)
  NEXT I
NEXT J

CLOSE #1
END

```


GRAFICOS DE IMAGENES SOLARES CONCENTRADAS, POR ESPEJO.

Grupo A

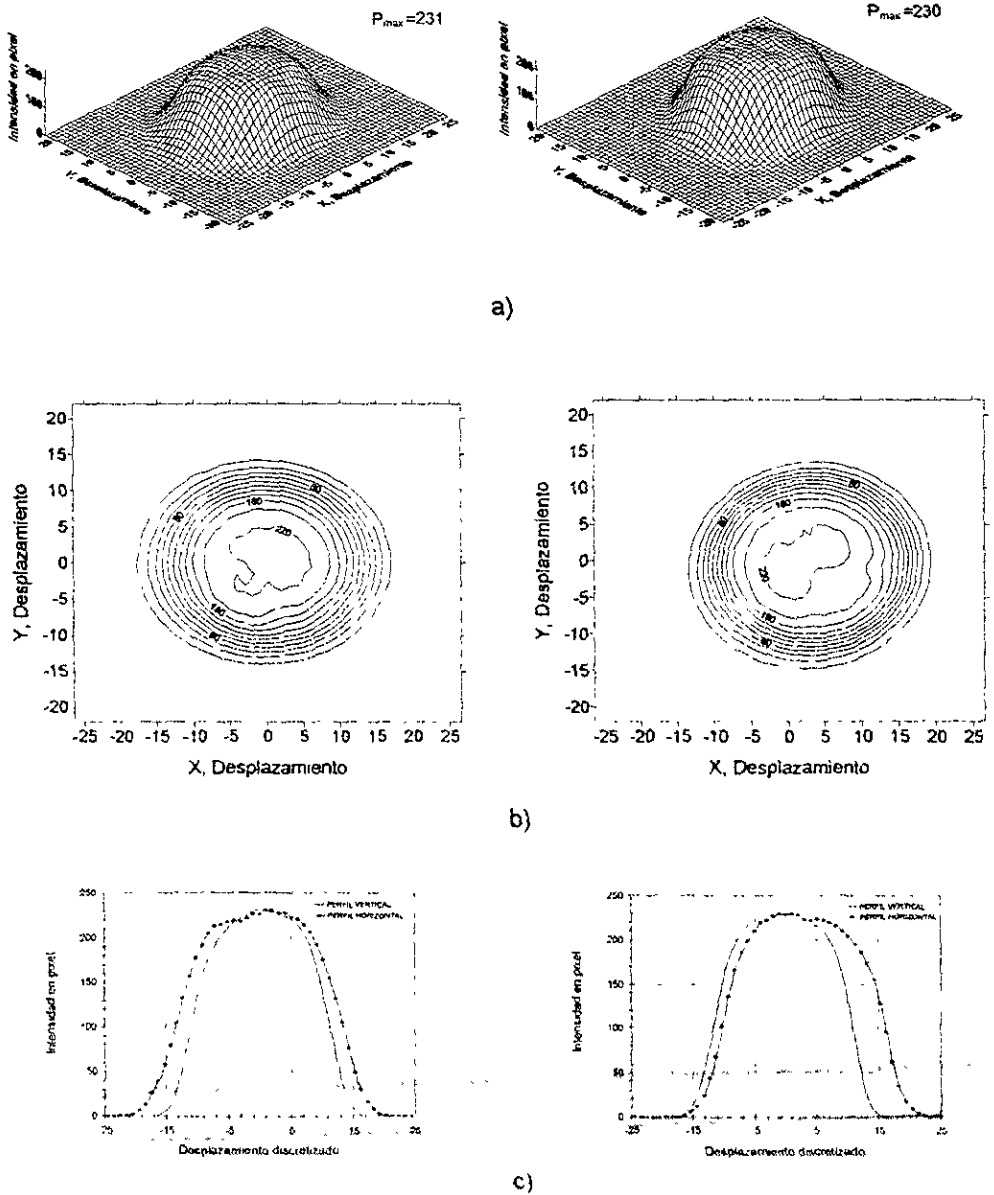
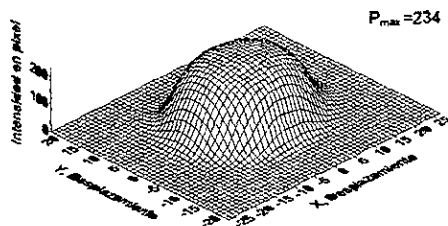
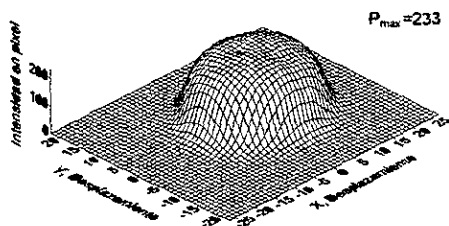
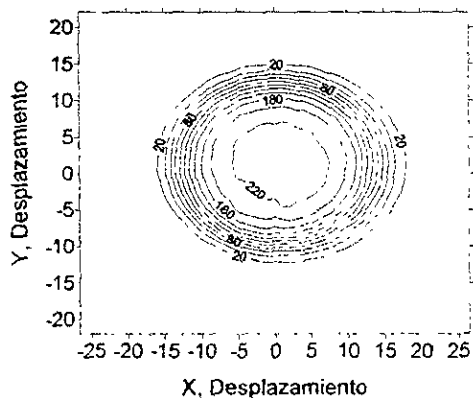
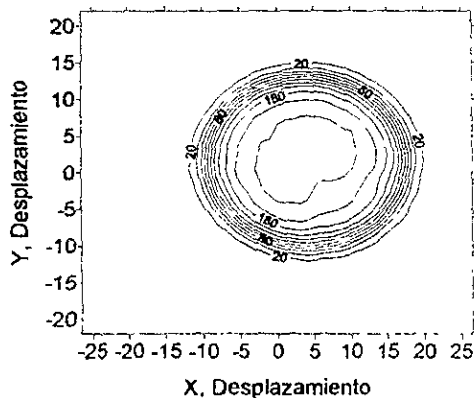


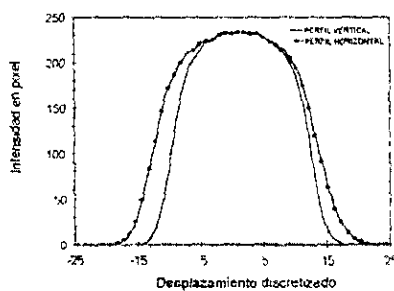
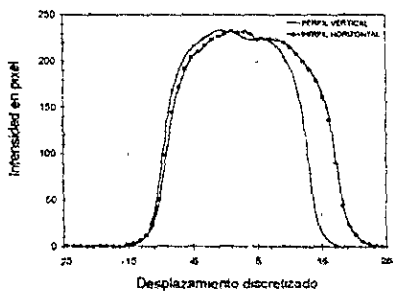
Figura E1 Imágenes digitalizadas espejos 13 y 14, columnas izquierda y derecha respectivamente: a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.



a)



b)



c)

Figura E2. Imágenes digitalizadas espejos 15 y 16, columnas izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal

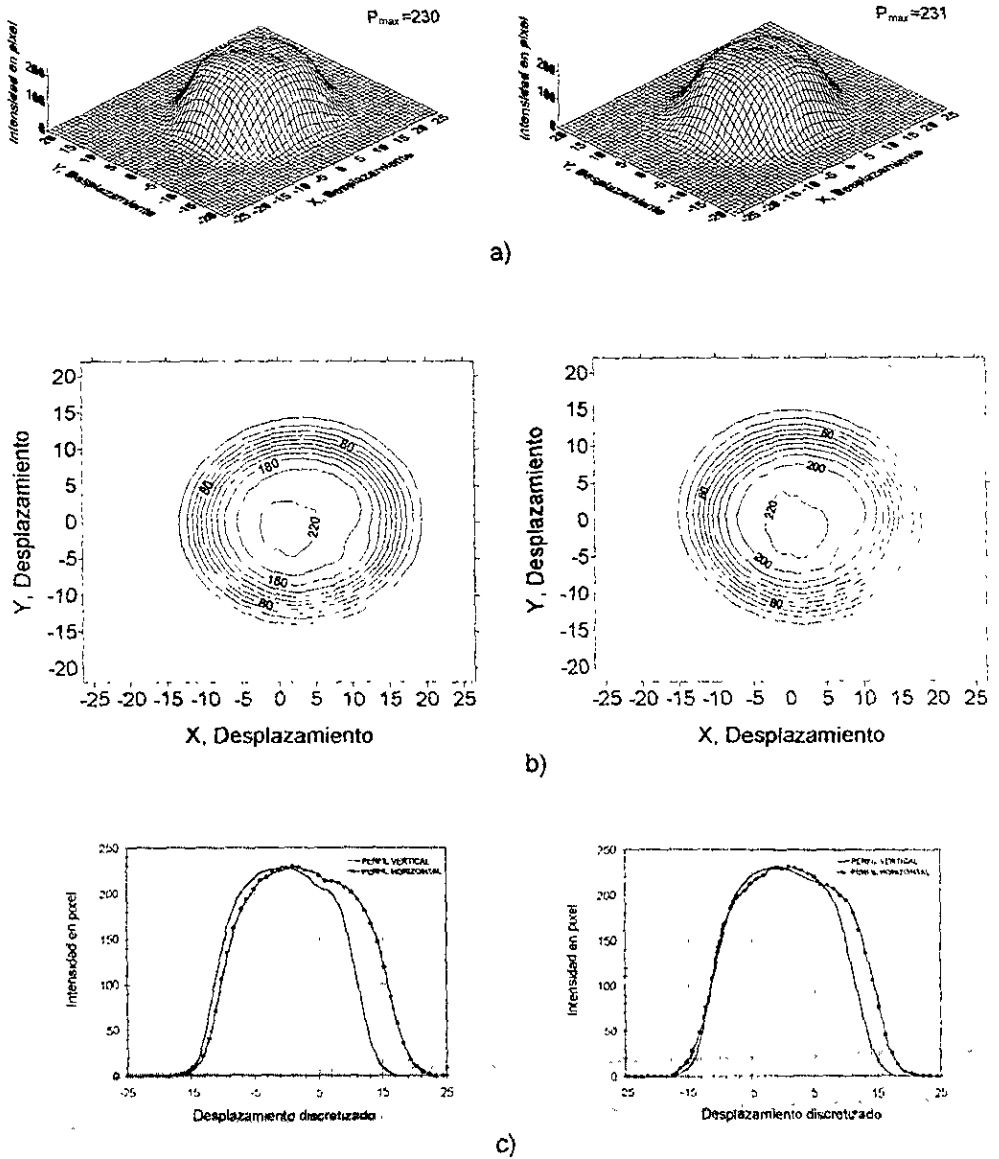
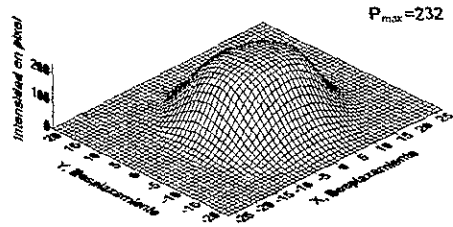
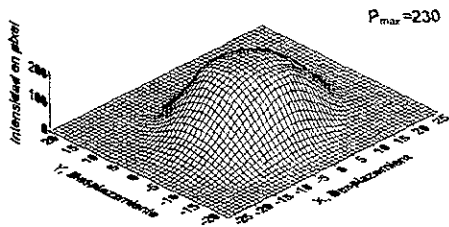
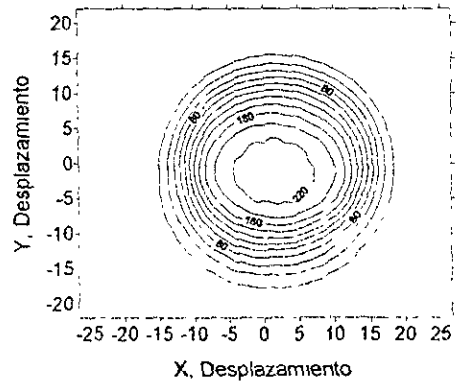
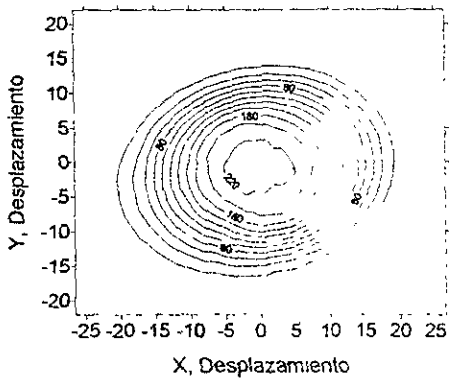


Figura E3. Imágenes digitalizadas espejos 17 y 18. columnas izquierda y derecha respectivamente, a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal

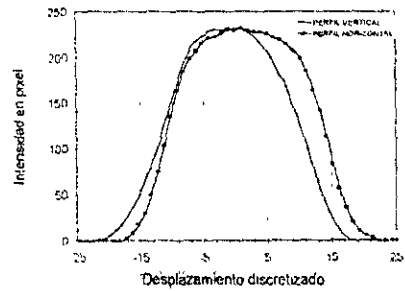
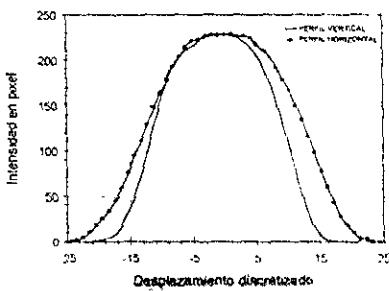
Grupo B



a)

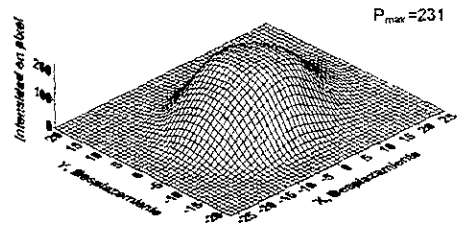
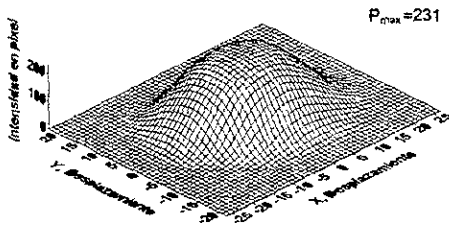


b)

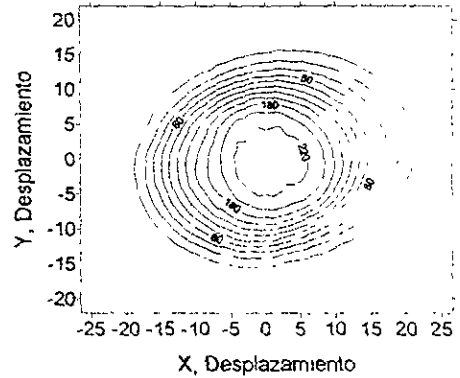
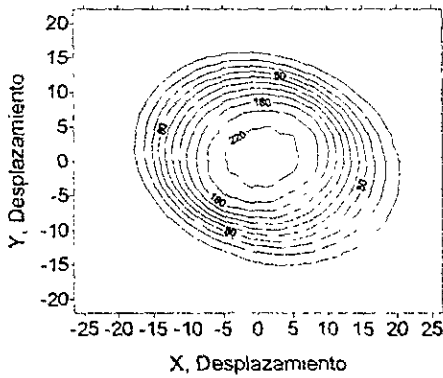


c)

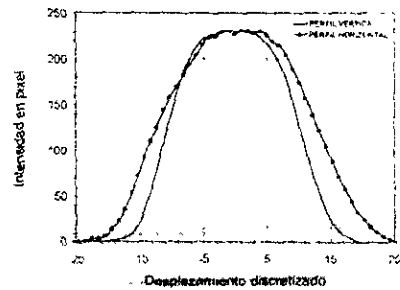
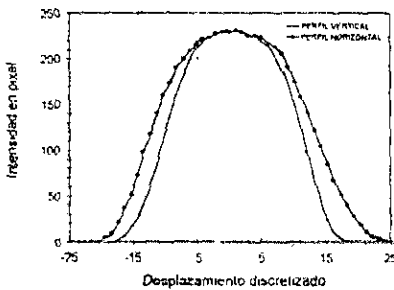
Figura E4. Imágenes digitalizadas espejos 2 y 4, columnas izquierda y derecha respectivamente. a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal



a)

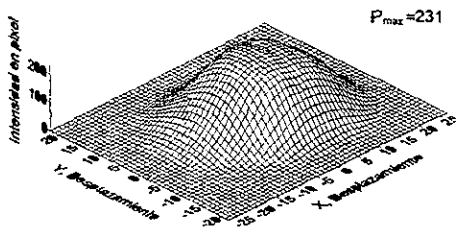
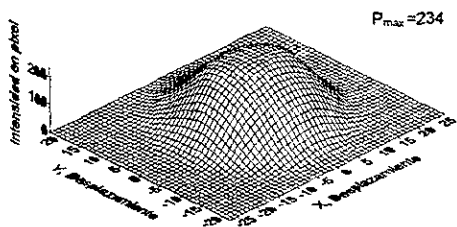


b)

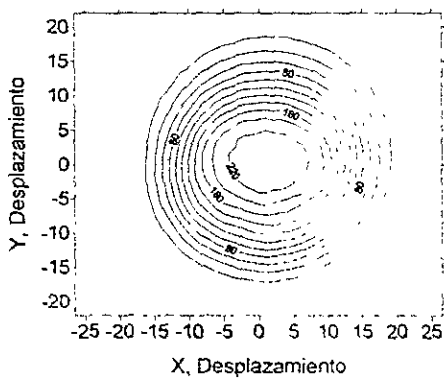


c)

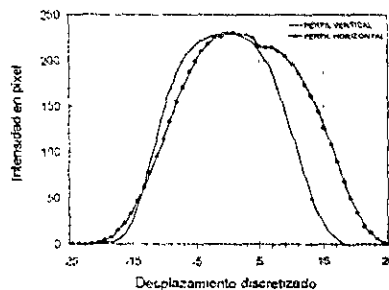
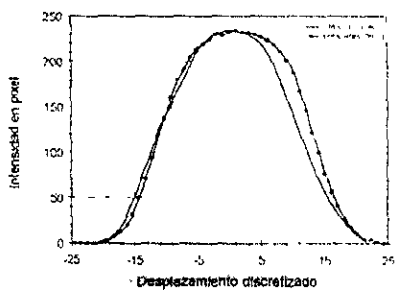
Figura E5 Imágenes digitalizadas espejos 6 y 8, columnas izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.



a)



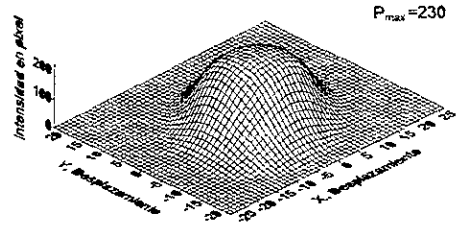
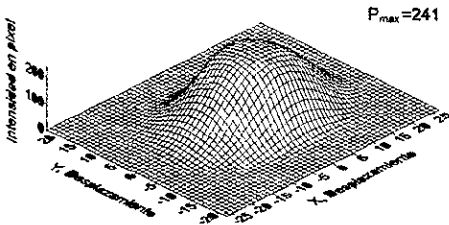
b)



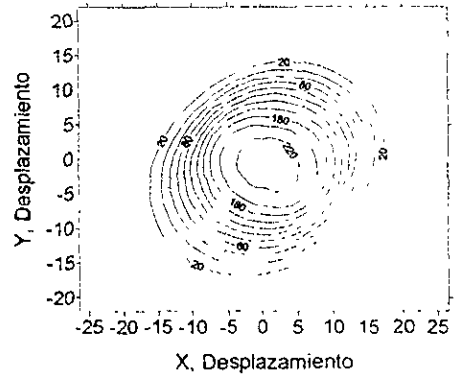
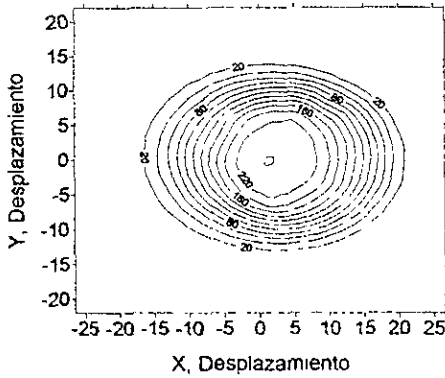
c)

Figura E6 Imágenes digitalizadas espejos 10 y 12, columnas izquierda y derecha respectivamente, a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.

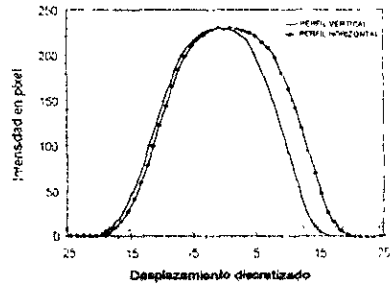
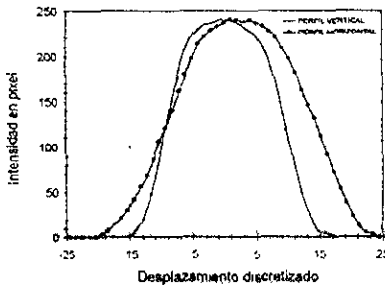
Grupo C



a)

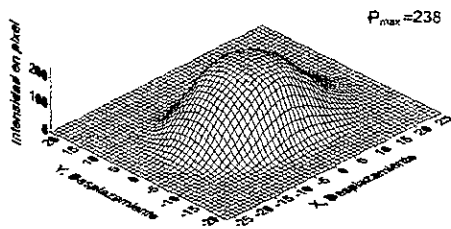
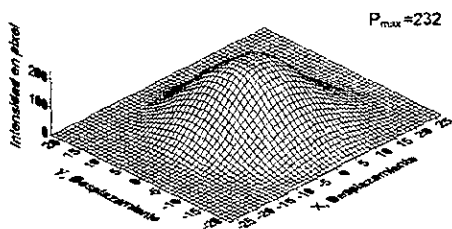


b)

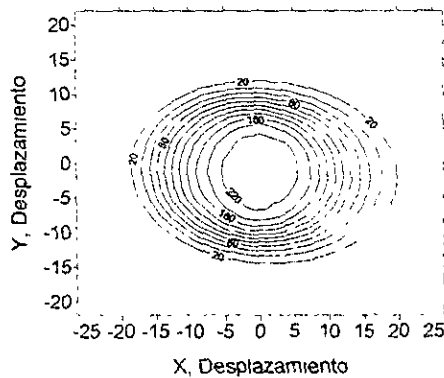
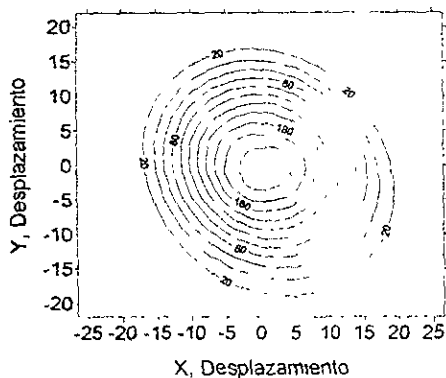


c)

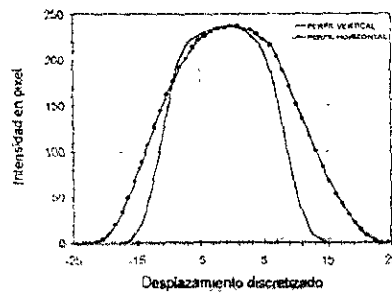
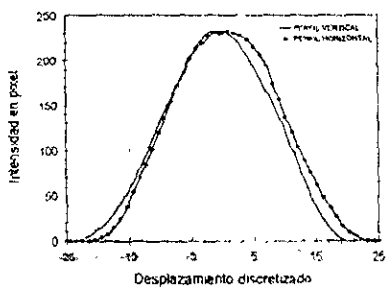
Figura E7 Imágenes digitalizadas espejos 1 y 3, columnas izquierda y derecha respectivamente, a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.



a)

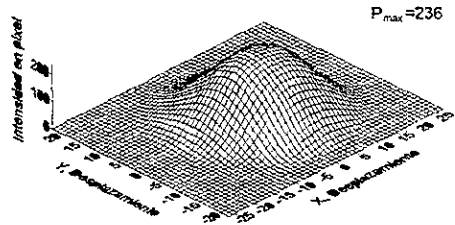
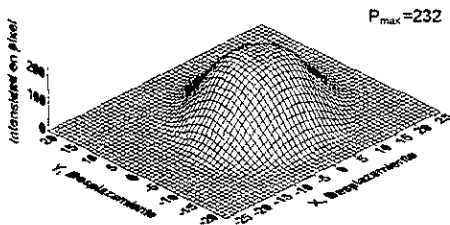


b)

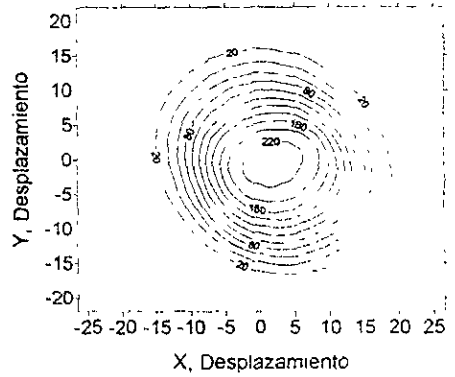
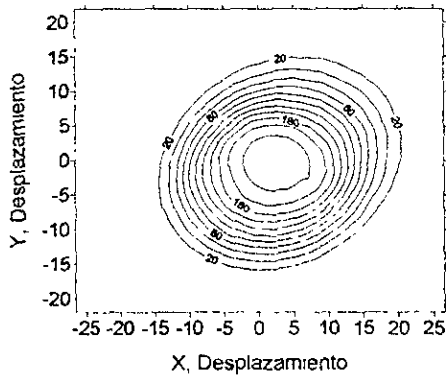


c)

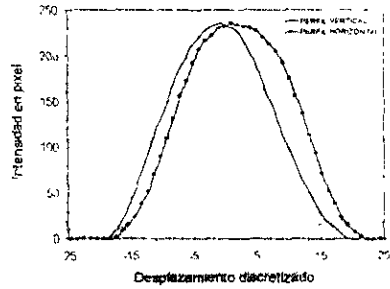
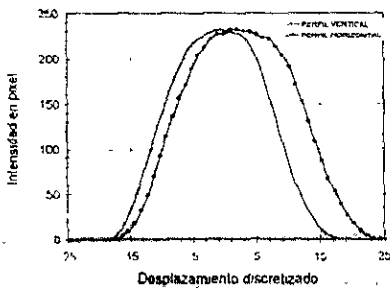
Figura E8. Imágenes digitalizadas espejos 5 y 7, columnas izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D. b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal.



a)



b)



c)

Figura E9. Imágenes digitalizadas espejos 9 y 11, columnas izquierda y derecha respectivamente; a) gráfico en 3D, b) curvas de nivel y c) perfil vertical y horizontal