



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

SISTEMA DE CONCENTRACION DE RADIACION SOLAR CON 18 ESPEJOS PARABOLICOS PARA ESTUDIOS DE CAMPOS RADIATIVOS (CONSTRUCCION Y PUESTA EN OPERACION)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO MECANICO - ELECTRICISTA PRESENTA: SERGIO ENRIQUE HIGUERA ALVA

DIRECTOR DE TESIS: DR. CLAUDIO A. ESTRADA GASCA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. MEXICO

1996

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

62  
2ij



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

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

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FEG-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
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 TITULADA:  
"Sistema de Concentración de Radiación Solar con 18 espejos parabólicos para Estudios de Campos Radiativos (construcción y puesta en operación)".

que presenta el pasante Sergio Enrique Higuera Alva con número de cuentas 7926706-9 para obtener el TITULO de Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicha 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 Méx., a 28 de Marzo de 1996

PRESIDENTE	<u>Ing. Filiberto Leyva Piña</u>	
VOCAL	<u>Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez</u>	
SECRETARIO	<u>Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Daniel Bonilla Sapién</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Bernardo Muñoz Martínez</u>	

**No hay tesoro más grande que el conocimiento**

**A Dios por darme la oportunidad de estar en esta tierra**

**A mi Madre Lourdes**

**A mis Abuelitas Sarita y Ma. Gracia**

**A mi hermano Mario Alberto**

**A mi compañera Eugenia**

**Mi más profundo agradecimiento al Dr. Claudio Estrada G. por dirigir este proyecto y brindarme su apoyo y amistad.**

**Al D.I. Adrian Oskam V. por su apoyo técnico, ideas y paciencia en la construcción de este dispositivo.**

**Al Dr. Jaime Cervantes por su interés en este proyecto.**

**A Gregorio Hernández y Miguel Ríos por su participación desinteresada en la construcción del DEFRAC.**

**A mis asesores de la FES-Cuautitlan, Antonio Sánchez, Filiberto Leyva, Daniel Bonilla y Bernardo Muñoz que también a lo largo de mi carrera me impulsarán.**

**Quiero agradecer a todos aquellos que me han honrado con su amistad...**

# Indice

	página
Lista de Figuras	iii
Lista de Tablas	vi
Nomenclatura	vii
Resumen	x
<b>1. INTRODUCCION</b>	
1.1. Tecnologías termosolares de potencia	1
1.2. Sistemas de concentración solar	2
1.3. Desarrollos recientes	6
1.4. Objetivos	8
<b>2. DISEÑO DEL DEFRAC</b>	
2.1. Descripción general	9
2.2. Marco principal	12
2.3. Marco hexagonal	13
2.4. Largueros Superiores y Soporte Receptor	15
2.5. Largueros Inferiores, Soporte de Contrapesos y Cámara CCD	17
2.6. Pedestales y Soporte Móvil	19
2.7. Contrapesos y Centro de Gravedad del Sistema	21
<b>3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA</b>	
3.1. Límites en el Movimiento de Operación	24
3.2. Puntos Críticos de la Estructura	26
3.3. Óptica del Sistema	36
3.4. Espejos A,B y C	37
3.5. Tamaño de Imágenes	42
3.6. Razón de Concentración	47
3.7. Temperaturas Alcanzables	49
3.8. Movimiento de la imagen solar en el plano focal	53

## **4. ARMADO Y ALINEACIÓN DEL SISTEMA**

4.1.	Secuencia de Armado	56
4.2.	Montaje y Alineación de Espejos	62

## **5. PUESTA EN OPERACIÓN**

5.1.	Descripción del Experimento	66
5.2.	Resultados	67
5.3.	Conclusiones y Sugerencias para Estados Futuros	69

## **APÉNDICE A**

### **CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE GEOMETRÍA SOLAR** 70

Tiempo Solar	75
Factores que afectan la intensidad de la radiación solar	76
Ángulos Solares	77

## **APÉNDICE B**

### **PLANOS MECÁNICOS DEL DEFRAC** 81

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Designación	Página
1.1	Principales configuraciones de concentradores: (a) Recibidor plano con reflectores planos; (b) Concentrador parabólico; (c) Reflector Fresnel; (d) Campo de helióstatos	3
2.1	Esquema general del concentrador	9
2.2	Marco hexagonal	10
2.3	Marco principal y pedestales	11
2.4	Marco principal	13
2.5	Marco hexagonal, partes principales	14
2.6	Largueros Superiores con pernos de sujeción	15
2.7	Ángulo de ajuste entre el larguero superior y el Marco hexagonal	16
2.8	Cilindro Soporte del Receptor	16
2.9	Cilindro Soporte de contrapesos y Cámara CCD	17
2.10	Larguero inferior	18
2.11	Ángulo de ajuste entre el larguero inferior y el marco hexagonal	18
2.12	Pedestal	19
2.13	Base móvil	20
2.14	Equilibrio del sistema	21
2.15	Relaciones trigonométricas para calcular $X_i$ y $X_s$	22
3.1	Movimiento del marco principal	24
3.2	Movimiento del marco hexagonal	25
3.3	Los Nos. 1 y 2 indican la posición de los puntos críticos de la estructura	27

figura	Designación	página
3.4	Esfuerzo en la flecha del marco principal	27
3.5	D.C.L. para el cálculo de las reacciones en los apoyos A y C	28
3.6	D.C.L. para el cálculo de las reacciones en los apoyos A y C, primer caso	29
3.7	D.C.L. para el cálculo de las reacciones en los apoyos A y C, segundo caso	30
3.8	D.C.L. para el cálculo de los momentos en los apoyos A y C	31
3.9	Carga sobre la viga I del marco principal	33
3.10	Sección transversal de la viga compuesta I	34
3.11	Distribución de los espejos	38
3.12	Angulo de posición de los espejos respecto al marco hexagonal	40
3.13	Numeración de los espejos en el marco hexagonal.	41
3.14	Relación de distancia de la tierra y el sol	42
3.15	Geometría de una parábola	43
3.16	Formación de la imagen solar para un espejo parabólico con radiación directa paralela a su eje	44
3.17	Formación de la imagen solar del espejo tipo A donde el rayo incidente forma un ángulo $\alpha$ con el eje óptico del espejo	45
3.18	Densidad de radiación solar en la superficie del sol	48
3.19	Gráfica de temperatura de estancamiento en el receptor contra radiación directa	52
3.20	Desplazamiento de la imagen solar en el plano focal debido a un grado de error	53
3.21	Desplazamiento de la imagen solar en el plano focal para el marco hexagonal	54
4.1	Colocación de los pedestales a la base móvil	56
4.2	Colocación del marco principal sobre los pedestales	57

<b>figura</b>	<b>designación</b>	<b>página</b>
<b>4.3</b>	<b>Colocación del marco hexagonal en el marco principal</b>	<b>58</b>
<b>4.4</b>	<b>Posición de los largueros inferiores</b>	<b>59</b>
<b>4.5</b>	<b>Colocación de los largueros</b>	<b>60</b>
<b>4.6</b>	<b>Sistema armado con contrapesos y pantalla receptora</b>	<b>61</b>
<b>4.7</b>	<b>Ubicación de los espejos</b>	<b>64</b>
<b>4.8</b>	<b>Fotografías del DEFRAC</b>	<b>65</b>
<b>1</b>	<b>Relaciones tierra-sol</b>	<b>71</b>
<b>2</b>	<b>Variación de la radiación solar extraterrestre con el mes del año</b>	<b>73</b>
<b>3</b>	<b>Ángulos del zenit, inclinación, azimuth de una superficie horizontal y ángulo de azimuth para una superficie inclinada.</b>	<b>78</b>

## LISTA DE TABLAS

No.	designación	Página
3.1	Variación del ángulo del zenit en el LES en el transcurso del año	26
3.2	Características de los espejos	41
3.3	Resumen de la numeración de espejos, su tipo y su distancia focal real	42
3.4	Tamaño del diámetro de la imagen formada por los espejos del DEFRAC	46
3.5	Valores razonables de los parámetros de la ecuación 1.	51
3.6	Cálculo de la temperatura en el receptor sin extracción de calor	52
3.7	Desplazamiento de la imagen solar para el marco principal.	54
3.8	Desplazamiento de la imagen solar para el marco hexagonal.	55
4.1	Distancia focales de los 18 espejos en centímetros	63
5.1	Primera prueba del DEFRAC	67
5.2	Características Generales del DEFRAC	68
I	Radiación solar extraterrestre en incrementos de longitud de onda	72

## NOMENCLATURA

$A_{ap}$	Area de abertura del concentrador
$A_r$	Area del recibidor
$A_s$	Area del disco solar
$C_f$	Concentración de flujo
$C_g$	Razón de concentración geométrica
$C_{max}$	Razón de concentración máxima
$E$	Módulo de Elasticidad
$F$	Fuerza, Peso.
$f$	Distancia focal
$G_s$	Constante de radiación en el sol
$G_{sc}$	Constante de radiación en solar en la tierra
$h$	Coefficiente convectivo de transferencia de calor
$I$	Módulo de Inercia
$I_a$	Flujo de energía en el área de abertura
$I_{cg}$	Segundo momento de área transversal con respecto a su eje centroidal
$I_x$	Segundo momento de área correspondiente a cualquier eje paralelo
$I_r$	Flujo de energía en el receptor
$L$	Longitud de la orilla extrema del paraboloide al foco del sistema
$L_i$	Longitud de los largueros inferiores
$L_s$	Longitud de los largueros superiores
$M$	Masa, Momento flexionante
$m$	metro
$n$	Abertura relativa del espejo
$N$	Newton, No. del día del año en transcurso
$P$	Peso de los contrapesos, Carga aplicada.
$P_a$	Pascal
$Q_u$	Energía útil
$Q_b$	Energía que llega al receptor

$Q_c$	Energía que pierde por convección
$Q_r$	Energía que se pierde por radiación
$R_{ca}$	Radio de la órbita terrestre
$R_{oa}$	Distancia del centro del sistema óptico al centro del espejo "A"
$R_{ob}$	Distancia del centro del sistema óptico al centro del espejo "B"
$R_{oc}$	Distancia del centro del sistema óptico al centro del espejo "C"
$R_s$	Radio del sol
$R$	Reacción en un apoyo
$R_t$	Distancia media tierra-sol
$r_m$	Radio de la imagen de un espejo
$r_r$	Radio de orilla
$S$	Desplazamiento de la imagen solar en el plano focal
$T_r$	Temperatura del receptor
$T_s$	Temperatura del sol
$V$	Fuerza cortante, Volumen
$W$	ángulo horario, carga
$W_{ii}$	Peso del larguero inferior
$W_{is}$	Peso del larguero superior
$X_x$	Radio de posición del espejo
$Y$	Deflexión
$y(x)$	Ecuación de la parábola
$y'(x)$	Ecuación de la tangente a cualquier punto de la parábola

## CARACTERES GRIEGOS

$\alpha$	ángulo de inclinación del espejo "A"
$\beta$	ángulo de inclinación del espejo "B"
$\gamma$	ángulo de inclinación del espejo "C"
$\kappa/2$	mitad del ángulo sólido subtendido por el sol
$\delta$	declinación solar ( ángulo)

$\varepsilon$	emisividad
$\eta$	fracción de la radiación que entra al concentrador
$\eta^{\circ}$	eficiencia óptica
$\phi$	ángulo de latitud terrestre, ángulo de orilla, fracción de energía
$\rho$	densidad, reflectividad de una superficie
$\rho_v$	densidad del vidrio
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzman
$\theta_z$	ángulo del zenit
$\Delta$	triángulo

## RESUMEN

En el presente trabajo se presentan las características más importantes de un sistema de concentración solar denominado DEFRAC ( Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados ) y los primeros resultados experimentales obtenidos con el mismo. El dispositivo fue construido en el Laboratorio de Energía Solar del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México con el propósito de realizar investigaciones con altas energías de flujo radiativo solar concentrado. El dispositivo es un concentrador solar de foco puntual con espejos múltiples y está constituido por un marco hexagonal que soporta a 18 espejos paraboloïdales. Este marco a su vez está soportado en otro marco formando un sistema con montura ecuatorial para el seguimiento aparente del sol. Los espejos son de primera superficie de vidrio aluminizado de 30 centímetros de diámetro. El sistema óptico tiene una distancia focal equivalente a 200 cm. En la primera prueba que se realizó con el DEFRAC se alcanzó una temperatura máxima en la placa de acero que actuaba como receptor de 970°C en 5 minutos de exposición al flujo radiativo concentrado con una insolación global de 650 W/m<sup>2</sup>.

## CAPITULO 1

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 TECNOLOGIAS TERMOSOLARES DE POTENCIA.

De la cantidad de energía que emite el sol, a la órbita de la tierra llegan  $1367 \text{ watts/m}^2$ . Cuando la atmósfera esta limpia, la superficie de la tierra recibe aproximadamente un kilowatt de potencia por cada metro cuadrado normal a los rayos del sol. Debido a su baja latitud ( $15^\circ$  a  $32^\circ$  de latitud norte) y a su clima México recibe energía solar de alta calidad en más de la mitad de su territorio. La superficie del territorio nacional es de  $1,958\,201 \text{ km}^2$ . Cuando mas, el 20 % del territorio es susceptible de cultivo agrícola, considerando solo la centésima parte de este último, es decir, aproximadamente  $4,000 \text{ km}^2$  (un rectángulo de  $100 \text{ km}$  por  $40 \text{ km}$ ), se tendría un potencial solar de 4 millones de megawatts, si además consideramos sistemas termosolares de potencia de baja eficiencia, digamos 10 %, entonces se podría tener en México una potencia solar de 400 000 de Mwe, que corresponde a mas de 14 veces la potencia instalada en México. Basten solo estas cifras para indicar la importancia del recurso solar en México y la necesidad de que se investiguen y desarrollen tecnologías de punta que aprovechen esta energía y que se impulse el uso de las tecnologías ya existentes.

La tecnología de los sistemas fotovoltaicos ha sido ampliamente desarrollada y se encuentra en fase de comercialización. Sin embargo, las eficiencias de fotoconversión son bajas (las comerciales son menores al 15 %), lo que limita su utilización a sistemas de poca potencia.

Por otro lado, los sistemas de conversión fototérmica prometen tener eficiencias superiores a las fotovoltaicas. De ahí la importancia del estudio, desarrollo e investigación de éstas tecnologías.

Se han propuesto esencialmente 3 tipos de sistemas térmicos que convierten la energía solar en eléctrica: los sistemas de receptor central, los de canal parabólico, y los de discos

parabólicos. En los primeros, grandes espejos que siguen al sol (Helióstatos) concentran la luz solar en un receptor localizado en una torre para calentar un fluido. El fluido transfiere el calor a una maquina térmica conectada a un generador eléctrico. En los segundos, los espejos de canal parabólico siguen al sol en un solo eje y enfocan la luz solar a lo largo de un tubo receptor localizado en el foco de la parábola. El fluido dentro del tubo transporta la energía térmica ganada a un sistema convertidor.

De los sistemas de discos parabólicos uno tiene particularmente gran potencial. En este sistema se emplea un receptor y un sistema de generación eléctrico montado en el plano focal del disco parabólico. Además de su alta eficiencia, este último sistema ofrece la característica de modularidad. En general las tecnologías termosolares de generación de potencia denominadas de disco/Stirling, son tecnologías de punta que se están desarrollando particularmente en Estados Unidos y Alemania. El Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos ha financiado y sigue financiando a la mayoría de estos proyectos. Como ejemplo de estos proyectos se pueden mencionar el sistema Vanguard de Disco Stirling que estableció un récord mundial de eficiencia de conversión de energía solar en eléctrica al alcanzar en 1984 un eficiencia del 31.6 %.[2]

En estos sistemas el calculo de los flujos radiativos concentrados es importante para el diseño de los receptores que se emplean para fines de generación de potencia. En los sistemas con múltiples espejos o reflectores, este cálculo resulta particularmente complejo.

## 1.2 SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR

Los colectores solares fototérmicos son intercambiadores de calor que transforman la energía solar en energía térmica. Para alcanzar altas temperaturas se interpone un dispositivo óptico entre el sol y la superficie absorbedora de energía con el objeto de aumentar la concentración incidente en el receptor.

El sistema óptico y el receptor que componen al colector solar lo hacen un concentrador solar o un sistema de concentración solar.

Existen diferentes configuraciones de concentración solar, en la figura 1.1. se observan la configuraciones geométricas principales.

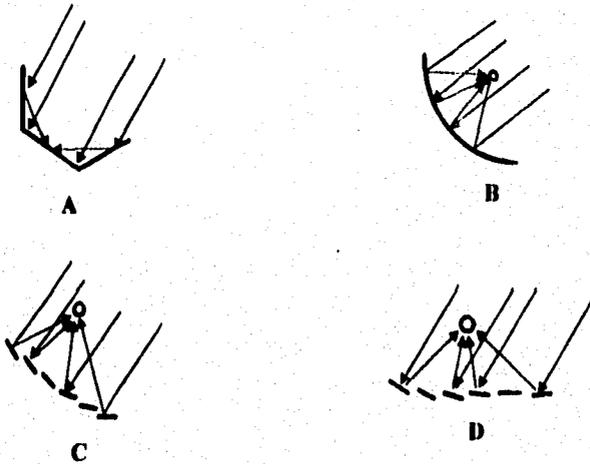
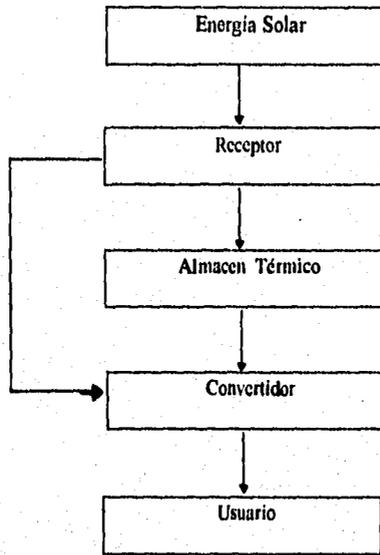


Figura 1.1. Principales Configuraciones de Concentradores: (a) Recibidor Plano con Reflectores Planos ; (b) Concentrador Parabólico ; (c) Reflector Fresnel ; (d) Campo de Heliostatos [1].

La radiación directa es la más importante para el aprovechamiento de estos sistemas y el ángulo de incidencia sobre el concentrador varía de acuerdo a la naturaleza de éste y los movimientos del sistema de seguimiento van de acuerdo al diseño del sistema óptico.

El sistema de control de los sistemas de concentración solar pueden ser sistemas de orientación continua mecanizados, que buscan al sol, o bien, sistemas programados. Los sistemas ópticos usan detectores ópticos y hacen el desalineamiento de los rayos solares lo menor posible. Los sistemas programados mueven el colector de forma determinada tomando en cuenta consideraciones básicas de geometría solar. Estos sistemas se pueden combinar para obtener un mejor seguimiento.

Los sistemas termosolares de concentración solar convierten la radiación solar en calor y de ahí en energía mecánica ó electricidad como se observa en el siguiente esquema:



Existen tres tipos básicos de sistemas termosolares de concentración:

- Los sistemas de receptor central ( Torre central, 10 Mw - 200Mw )
- Los sistemas de canal parabólico ( 20 kW - 80 Mw )
- Los sistemas de plato parabólico ( platos stirlings; 5 kW - 50 kW )

De los diseños que están siendo desarrollados como sistemas de concentración, algunos consisten en una serie de superficies reflectoras de forma paraboloïdal montados sobre una estructura con seguimiento de la trayectoria solar, y en el plano focal del sistema de espejos parabólicos se coloca una máquina de Stirling para la generación de electricidad.

Para conocer la potencia resultante de un sistema de concentración es necesario evaluar el flujo radiativo en el receptor del sistema. De allí la necesidad de impulsar el desarrollo de este tipo de dispositivos. Por ejemplo, los sistemas de concentración de plato/Stirling están siendo desarrollados como unidades de generación de potencia ( 5 - 50 kW ) que podrán ser

utilizadas individualmente en lugares remotos o ser conectados entre sí para escalar sistemas de potencia del orden de megawatts. Esta tecnología en desarrollo se espera que a mediano plazo sea una alternativa energética comercializada.

Para muchas aplicaciones es necesario emplear un sistema óptico para concentrar la radiación solar incidente, sobre una pequeña área en donde será aprovechada como energía térmica. Los concentradores solares bajo este principio incrementan el nivel de concentración de ésta energía y esto en otras palabras quiere decir que se va a incrementar nuestro flujo radiativo.

Los concentradores solares se pueden dividir en dos extensas categorías : a) Bidimensionales, y b) Tridimensionales. Los concentradores Bidimensionales enfocan generalmente sobre una línea y utilizan receptores típicamente largos de forma tubular , en cambio los tridimensionales enfocan sobre un punto y el área dispuesta como receptor es pequeña. Aunque los concentradores bidimensionales requieren de un sistema simple de operación para el seguimiento sobre un solo eje e inclusive sin seguimiento, su razón de concentración es baja en comparación con los concentradores tridimensionales. Los concentradores solares tridimensionales requieren de un sistema más sofisticado de seguimiento aplicado sobre dos ejes, que corresponden respectivamente al movimiento horario en el transcurso del día y al movimiento referente al ángulo del zenit que depende de la declinación, la latitud y la hora del día y a su vez la declinación que depende del día del año. Los colectores concentradores pueden tener razones de concentración desde 1.5 hasta del orden de 48000.

Para evitar confusión en la terminología se define la palabra colector como la que se refiere a todo el sistema incluyendo el receptor y el concentrador. El receptor es aquel elemento del sistema donde la radiación es absorbida y convertida en otra forma de energía e incluye el receptor. El concentrador o también llamado sistema óptico es la parte del colector que refleja la radiación directamente sobre el receptor. Para todos estos sistemas existen diversos tipos de seguimiento según el tipo de configuración del colector, generalmente lo ideal es tener una orientación lo más continua hacia el sol, es decir, los rayos solares deben ser paralelos al eje de los espejos parabólicos y normal al plano en el cual

están contenidos. Algunos sistemas requieren de gran precisión por ejemplo para bajas concentraciones es posible hacer ajustes cada semana, mes o estación según el diseño. En los diseños en los que se espera una alta concentración se necesita un sistema de seguimiento continuo de tal forma que el desalineamiento sea mínimo con respecto a los rayos solares.

En general se puede afirmar que la potencia de salida de los sistemas de concentración de platos parabólicos bajo altos niveles de insolación, es directamente proporcional al área del colector solar y a la eficiencia en el poder de conversión, por ejemplo, un sistema de plato parabólico de 5 kW eléctricos requiere discos de aproximadamente 5.5 metros de diámetro y a 25 kW eléctricos de 10 metros de diámetro, como se justifica a continuación:

Si la eficiencia de conversión es  $\eta_t = P_e / A_c G_b$  entonces  $P_e = \eta_t A_c G_b$ . Así para  $P_e = 5 \text{ kW}$ ,  $\eta_t = 25 \%$  y  $G_b = 1000 \text{ W/m}^2$ , entonces  $A_c = 5 \text{ kW} / .25 (1000 \text{ W/m}^2) = 5 \text{ kW} / .25 \text{ kW/m}^2 = 20 \text{ m}^2$ . Como  $A_c = \pi r^2$  entonces  $r = (20 \text{ m}^2 / \pi)^{1/2} = 2.523 \text{ m}$ , esto es, el diámetro del espejo es de 5.05 m. Si  $P_e = 25 \text{ kW}$  entonces  $A_c = 100 \text{ m}^2$  y  $r = 5.64 \text{ m}$  por lo que su diámetro es de 11.283 m.

En los sistemas de concentración, el receptor tiene dos funciones principales: 1) Absorber la mayor cantidad posible de radiación solar reflejada por el concentrador y, 2) Transferir esta energía calorífica al fluido de trabajo de la máquina.

La reflexión del sistema concentrador requiere que los rayos solares sean paralelos al eje de la parábola y dirigirlo a un punto que sería en una área más reducida, pero dado que los rayos solares nos llegan con un ángulo sólido se forma una imagen solar en el plano focal del sistema, y el tamaño de ésta se ve afectada por la distancia focal del sistema. Los recibidores para platos/Stirling tienen cavidades de aberturas pequeñas para concentrar los rayos solares.

### 1.3. DESARROLLOS RECIENTES

El mejor desempeño de los sistemas de concentración de Plato/Stirling lo tuvo en 1984 el sistema Vanguard-I, utilizando (25Kw<sub>e</sub>) una máquina Stirling de 25 kw<sub>e</sub> y con una eficiencia neta de conversión de energía luminosa a energía eléctrica de 29.4%, lo cual representó un récord para todos los tipos de sistemas solares eléctricos.

Los sistemas de platos parabólicos para concentración están por encima de la tecnología de canal parabólico ya que con los primeros se logran mayores concentraciones y por lo tanto mayores temperaturas.

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

Mc Donnell Douglas Corp., en Hontington Beach, California, en 1984 desarrolló un sistema de plato Stirling de 25 kW, utilizando una unidad Stirling 4-95 Mark II como la utilizada en el Vanguard. Fueron producidas 6 unidades, consistentes en 82 facetas de cristal con curvatura y c/u mide 91 x 122 cms., las curvaturas de las facetas varían hasta 5 veces dependiendo de su posición dentro del sistema.

La máquina de Stirling Modelo 4-95 Mark II utiliza hidrógeno como fluido de trabajo a una temperatura de 720 °C y una presión máxima de gas de 20 Mpa. El sistema tiene una eficiencia en la conversión solar a eléctrica de 29% a 30%.

De 1984-1988 en Alemania se desarrolló el primer sistema de concentración de gran escala con un sistema de 50 kW, con una unidad Stirling 4-275 construida en Stuttgart, Alemania, con una eficiencia del 23% a una insolación de 1000 W/m<sup>2</sup>.

El concentrador consiste de una sola membrana estirada circular de 17 metros de diámetro. El espesor de la membrana es de 0.5mm y es de acero inoxidable, lleva una segunda membrana trasera, se forma un vacío entre las dos deformando la primera membrana a su forma final y cercana a un paraboloide. La forma se conserva con un vacío parcial y constante.

En 1991 también en Stuttgart, Alemania se desarrolló un sistema de plato Stirling con membrana estirada de una sola faceta de 7.5 metros de diámetro y con una potencia de 9 kW.

La membrana es muy delgada (0.23mm) y también se deforma formando un vacío parcial en la parte inferior.

La máquina de Stirling utilizada es el modelo V-160, utiliza helio como gas de trabajo a 630°C variando la presión de 4 a 15 Mpa. controlando de esta forma la potencia de salida. La máquina tiene una eficiencia del 30%. 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.[2]

La Cummins Power Generation, Inc. de Columbus Indiana, desarrolló en 1992 un sistema que tuvo nuevas innovaciones. La salida de potencia eléctrica es de 7.5 Kw, con una eficiencia total del 19%. Consta de 24 facetas de membranas estiradas montadas en la estructura, las membranas son polímeros aluminizados y la curvatura se obtiene también formando vacío.

Como se observa ha habido una gran actividad de investigación y desarrollo en diferentes países sobre la tecnología de plato/Stirling. En México en el Laboratorio de Energía Solar del IIM-UNAM desde hace poco tiempo se vienen realizando estudios con colectores de concentración solar. En particular para contribuir al desarrollo de la tecnología de plato-Stirling, se ha diseñado y construido el Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados denominado DEFRAC que es el tema de ésta tesis.

### 1.4. OBJETIVOS

El objetivo del trabajo de tesis ha sido el construir y poner en operación al Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados (DEFRAC) . Durante este proceso se ha tenido que diseñar una serie de elementos originalmente no contemplados, en este escrito se presenta una descripción del DEFRAC , así como las características más importantes del dispositivo, tanto los del diseño como los de operación del mismo.

## CAPITULO 2

### DISEÑO DEL DEFRAC

#### 2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El DEFRAC es un sistema de concentración solar de foco puntual con montura ecuatorial, la figura 2.1 muestra un esquema general del mismo.

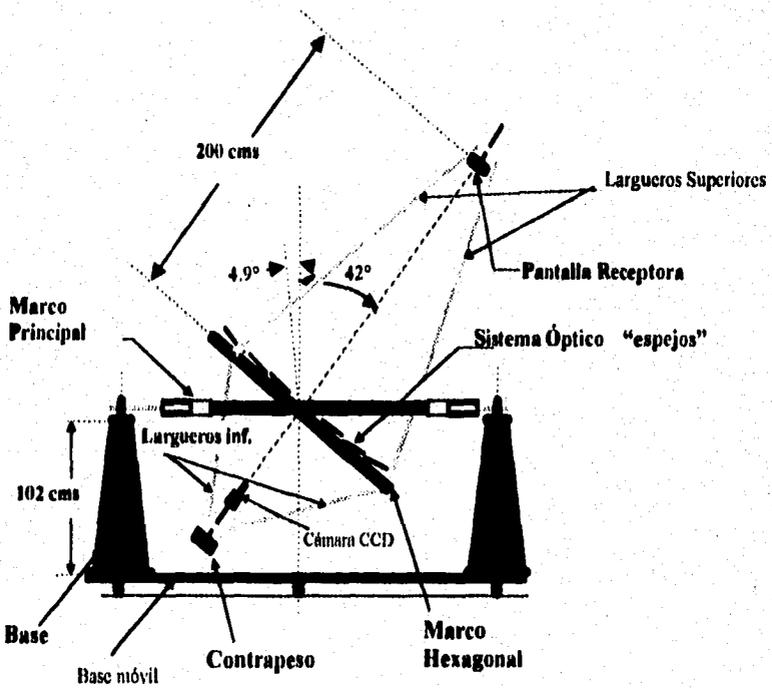


Figura 2.1. Esquema general del concentrador

El dispositivo consiste básicamente de dos marcos; uno principal y otro hexagonal. El marco hexagonal es un elemento estructural sobre el cual se montan 18 espejos paraboloidales que sirven como superficies reflexivas concentradoras. Hay tres grupos de espejos que varían dependiendo de sus distancias focales, a saber, 201, 202 y 202.5 centímetros. La distancia focal equivalente del sistema es de 200 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 cada lado del hexágono van conectados 3 largueros que corresponde, uno al sistema del receptor que se encuentra a una distancia focal de 2 metros, y el otro lado al sistema de contrapesos para equilibrar el sistema completo. En la figura 2.2 se observa una vista superior del marco hexagonal. (Nota: En esta sección se presentan dibujos parciales, para detalles ver el apéndice "E"; planos.)

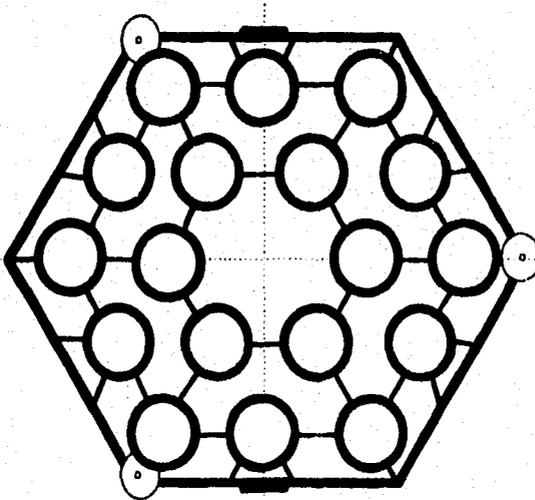


Figura 2.2. Marco Hexágono

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 que se consiga mantener normales los rayos solares a este plano de acuerdo a la hora del día (ángulo de incidencia =  $0^\circ$ ). 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 2.3 se presenta el marco principal y los pedestales.

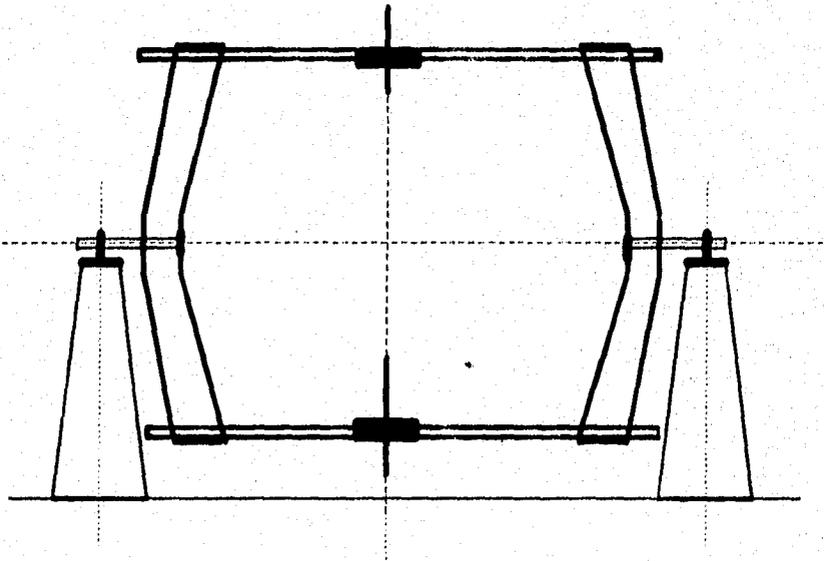


Figura 2.3 Marco Principal y Pedestales.

El marco principal es un elemento de suma importancia debido a que cargará todo el peso del marco hexagonal, ya armado con todos los elementos reflexivos y el sistema receptor se estima un peso promedio de 155 kilogramos y que se repartirán entre las dos chumaceras y ejes que llevan tanto el marco principal como el hexágono respectivamente.

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. También se ha tomado en cuenta que funcione dentro de un rango de latitud de entre 14 y 34 grados de latitud norte que abarca la República Mexicana. Los pedestales de forma piramidal son la base soporte de todo el sistema, son huecas y están hechas de lámina de acero de 3 mm de espesor, en su base llevan unas salientes para su sujeción al piso y en la parte superior está acabada con una placa de 1.27 cm de espesor con dos orificios roscados que sujetaran las chumaceras para los ejes del marco principal la altura de estos soportes es de 102 centímetros de la superficie a la base.

El Dispositivo para el Estudio de Flujos Radiativos Concentrados (DEFRAC) se ha dividido en secciones que se describen con más detalle en los siguientes puntos.

## 2.2. MARCO PRINCIPAL

Este marco está diseñado de forma irregular, los extremos de forma parecida a unas alas están hechos de lámina de acero Cold-Rolled de 3 mm de espesor y armados de tal forma que resulta una estructura hueca. Las alas están unidas por medio de dos travesaños hechos de perfil de acero 144 de forma "T" hueco lo cual le da ligereza y a la vez es resistente, cada travesaño se hizo uniendo dos perfiles de este tipo dando como resultado un travesaño de forma "I". En una parte de la "I" está acoplada una caja de acero en donde se insertarán los ejes del marco hexagonal, estos soportes no están exactamente al centro por razones de funcionamiento que se explican más adelante. Las alas en su parte central llevan soldado el eje que entrará en las chumaceras de las bases piramidales, este eje tiene un diámetro de 38.1mm (1 1/2") y es barra de acero Cold-Rolled de 38.1 mm de diámetro. Los detalles se observan en la figura 2.4.

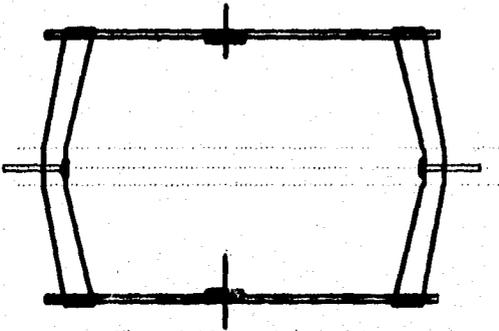


Figura 2.4 Marco Principal.

### 2.3. MARCO HEXAGONAL

El marco hexagonal se ha diseñado de manera que cumpla con dos condiciones ; que sea ligero y que se puedan acomodar 18 espejos de 30 centímetros de diámetro de forma simétrica en la menor área posible.

En la construcción de este marco, en lo que corresponde a su perímetro se ha utilizado perfil tubular rectangular de acero al carbón. Los elementos espaciales de la estructura son del mismo material pero con cortes especiales con el objeto de aligerar la estructura. En esta misma estructura se encuentran los 18 elementos circulares planos que sirven de base para los soportes de los elementos reflexivos y están hechos de placa de acero de 3 mm de espesor. En tres aristas intercaladas del hexágono van soldados unos cilindros hechos de tubo de acero con 2 tornillos para hacer la función de prisioneros de los largueros superiores e inferiores, los superiores en su otro extremo se unen a un cilindro hueco que contiene tres orificios hechos de tubo de acero con sus respectivos prisioneros y los cuales están a 120 grados uno del otro, aquí es donde se alojara el sistema receptor de flujos radiativos. Los largueros inferiores que son mucho más cortos en su otro extremo se unen de la misma forma que los superiores solo que en este se montaran una serie de contrapesos según se requiera para equilibrar el sistema, Ver figura 2.5.

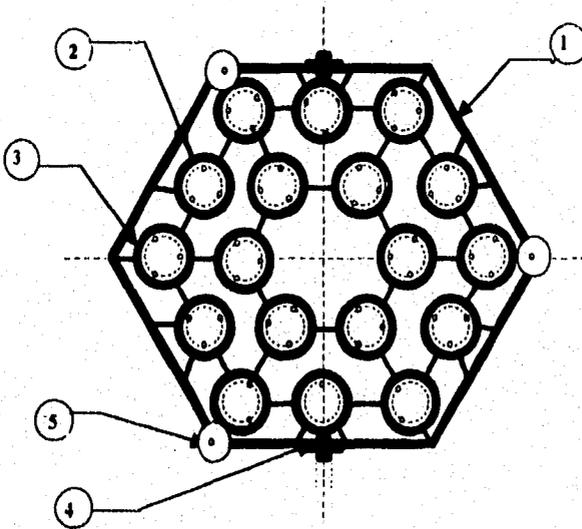


Figura 2.5. Marco Hexagonal, partes principales.

Lista de partes correspondiente a la figura 2.5.

- 1 - Perfil R-225 (acero al carbón) (58mm x 20mm)
- 2 - Interconectores . Perfil R-175 (acero al carbón) (45mm x 20mm)
- 3 - Platos soporte . Diámetro 20 cm. Placa de acero 3mm.
- 4 - Caja cilindro para flecha de ¼ pulgada.
- 5 - Soporte de largueros inferiores y superiores.

#### 2.4. LARGUEROS SUPERIORES Y SOPORTE RECEPTOR

Los largueros superiores son el puente de unión y soporte entre el hexágono y el cilindro que soportara el sistema receptor. Estos tienen una longitud de 232 centímetros y son de tubo de acero cuadrado PTR de 25.4 mm x 25.4 mm, calibre 22, en cuyos extremos llevan soldadas los pernos de sujeción que entran tanto en el hexágono como en el cilindro receptor, ver figura 2.6. En la figura 2.7. se presenta el esquema sobre el cual se calcula los ángulos entre el larguero y sus patas.

El cilindro del receptor está hecho de lámina de acero de 3 mm con un diámetro de 25 centímetros por 5.5 centímetros de altura. En su parte central tiene integrado de lado a lado un cilindro de acero con un diámetro interior de 19.05 mm ( $\frac{3}{4}$ " ) para contener la barra que sujetara el receptor. En la figura 2.8. se presenta más detallada ésta sección.

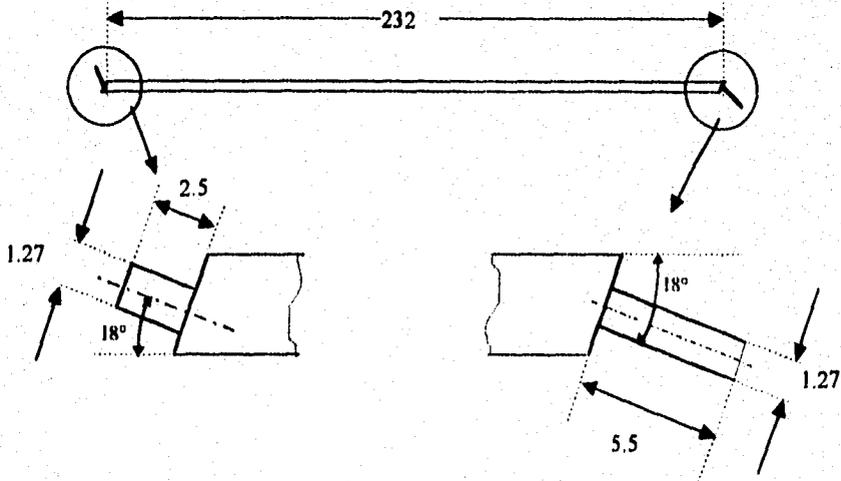


Figura 2.6. Largueros Superiores con pernos de sujeción.

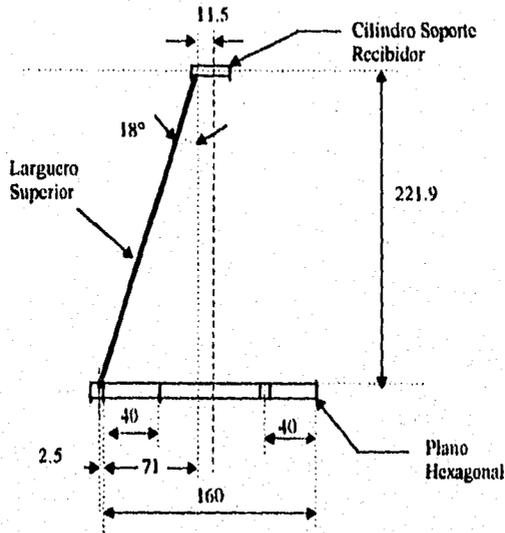


Figura 2.7. Ángulo de ajuste entre el larguero superior y el marco hexagonal ( cotas en cms. )

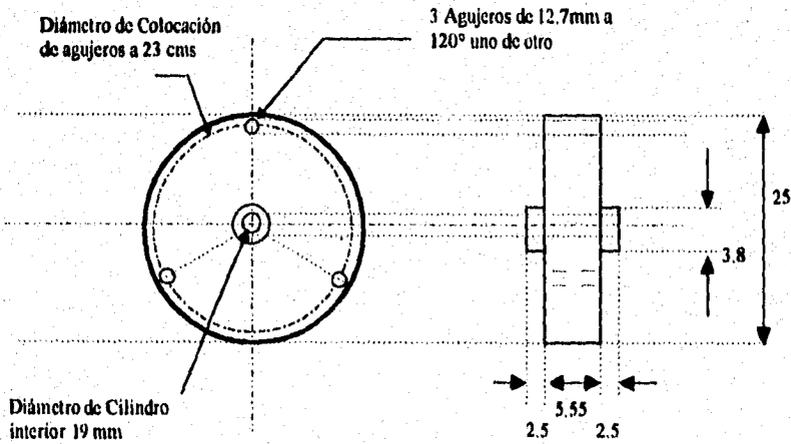


Figura 2.8. Cilindro soporte receptor.

## 2.5. LARGUEROS INFERIORES, SOPORTE DE CONTRAPESOS Y CÁMARA CCD.

Los largueros inferiores son el soporte del sistema de contrapesos que van montados a su vez en la barra que atraviesa el cilindro, el cual tiene todas las características del cilindro receptor. Los contrapesos no son otra cosa que cilindros sólidos de plomo, estos equilibran el sistema únicamente variando su posición según se requiera a lo largo de la barra del cilindro por equilibrio de momentos. Los largueros inferiores tienen una longitud total de 97 centímetros y en sus extremos también llevan patas de sujeción tanto en un extremo para unirse al hexágono como al cilindro. Ver figuras 2.9 , 2.10. y 2.11.

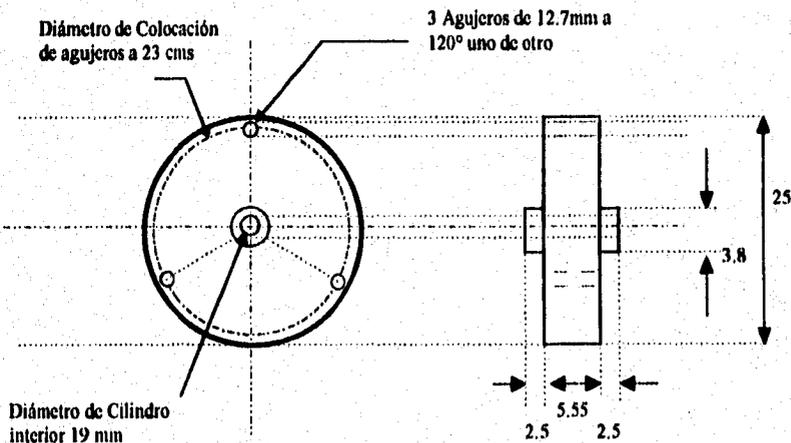


Figura 2.8. Cilindro soporte receptor.

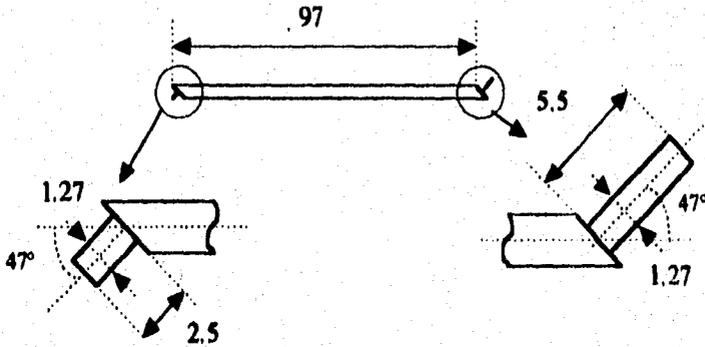


Figura 2.10. Larguero inferior (cotas en cm.)

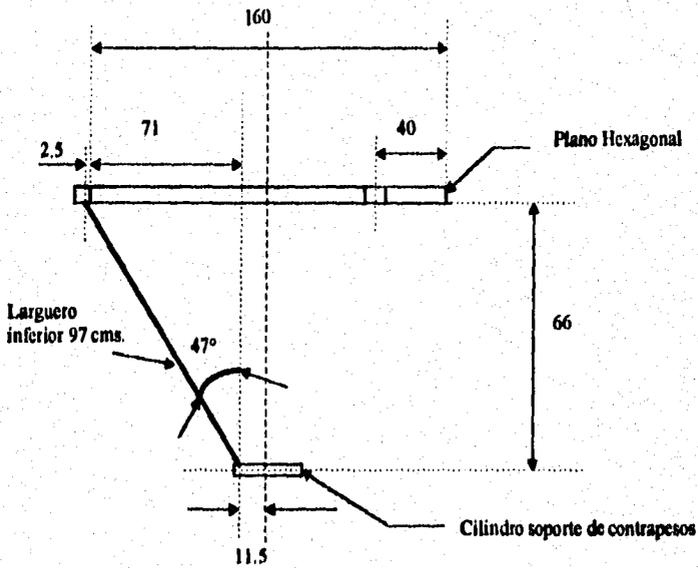


Figura 2.11. Ángulo de ajuste entre el larguero inferior y el marco hexagonal (cotas en cm.)

## 2.6. PEDESTALES Y SOPORTE MÓVIL

Son dos Bases de forma piramidal hechas de acero cold-rolled de 3 mm de espesor y rematadas en la parte superior por una placa de acero de 12 mm de espesor que lleva dos orificios roscados para sujetar las chumaceras. En la parte superior van atornilladas (una en cada base) las chumaceras con graseira para flecha de 38 mm (1 ½"). En la parte inferior (base) llevan un doblés con dos perforaciones para poder fijarlos a la base móvil. Las dimensiones generales se observan en la figura 2.12.

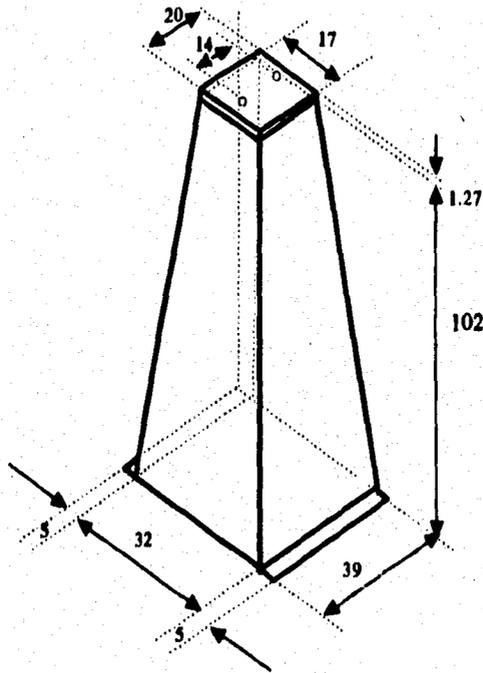


Figura 2.12. Pedestal (cotas en cm.)

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 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 ya 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.

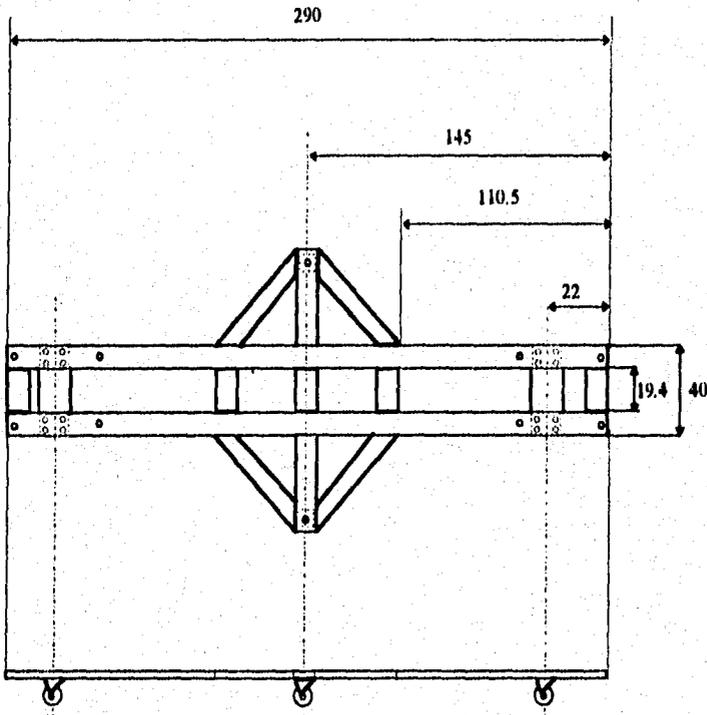


Figura 2.13. Base móvil ( Dimensiones generales en cm. )

## 2.7. CONTRAPESOS Y CENTRO DE GRAVEDAD DEL SISTEMA.

Los contrapesos se hicieron de lingotes de 800 gramos cada uno de plomo fundidos en un molde de acero de forma cilíndrica, cada contrapeso tiene un peso aproximado de 8 kilogramos.

Para calcular el peso aproximado para equilibrar el sistema tomando en cuenta que cada pieza como los largueros y cilindros soporte son piezas simétricas, por lo que su centro de gravedad coincide con su centroide de área [3]. Es decir, la intersección de los ejes de simetría nos define el centroide de área y al ser piezas de material que consideramos homogéneo, tenemos en este punto el centro de gravedad, ver figura 2.14.

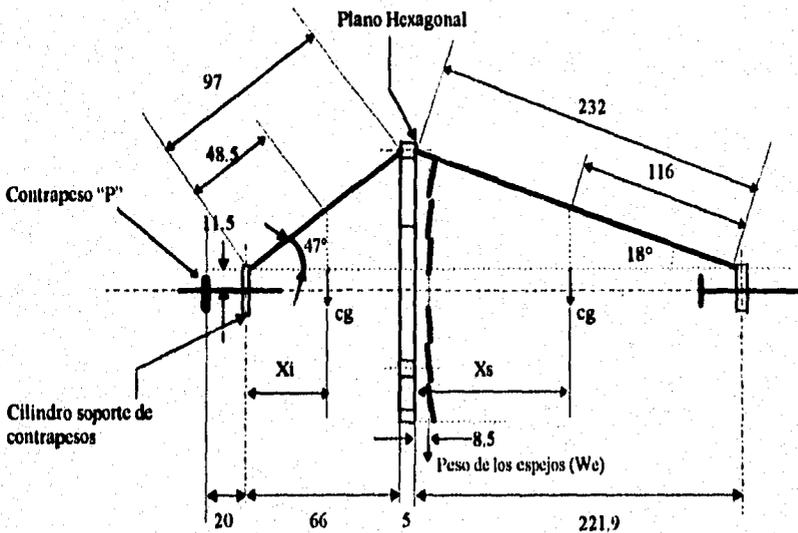


Figura 2.14. Equilibrio del Sistema

Para obtener las distancias  $X_i$  y  $X_s$  de la figura 2.14 nos apoyamos en la figura 2.15.

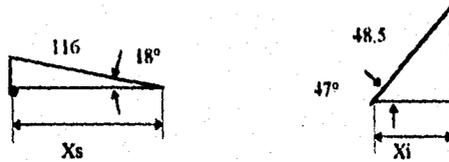


Figura 2.15. Relaciones trigonométricas para calcular Xi y Xs.

$$X_s = 116 (\cos 18^\circ) = 110.32 \text{ cms.}$$

$$X_i = 48.5 (\cos 47^\circ) = 33.076 \text{ cms.}$$

En la parte posterior del sistema, el contrapeso será colocado en la posición que se indica en la figura 2.14. Para el cálculo del peso del contrapeso P se procede como sigue:

Haciendo una relación de proporciones con el peso total entre los largueros superiores e inferiores tenemos:

Longitud total de largueros superiores 696 cms. ( Ls )

Longitud total de largueros inferiores 291 cms. ( Li )

$L_s/L_i = 2.39$  Tomándolos como materiales homogéneos podemos considerar el peso como  $2.39 W_{li} = W_{ls}$ , relación de pesos entre los largueros.

Para equilibrar el sistema sacamos un balance de momentos desde los centros de gravedad de los largueros (cg.) a cada lado del plano hexagonal, con respecto al eje que atraviesa el plano hexagonal y tenemos:

$$P(86+2.5) + W_{li} ( 35.424 ) + W_c ( 66+2.5 ) = W_{ls} ( 110.32+2.5 ) + (W_c)( 221.9+2.5 ) + W_e(8.5)$$

En donde :  $W_c$  = peso cilindro soporte de contrapesos y receptor que son iguales, simétricos y del mismo peso,  $W_c = 3$  Kgs.

$$W_{ls} = 12 \text{ Kgs}; W_{li} = W_{ls} / 2.39. W_{li} = 5.02 \text{ Kgs.}$$

$W_e$  = peso de los espejos que es igual a 70 Kilogramos.

Sustituyendo se obtiene:

$$P(86+2.5) + 5.02 ( 35.424 ) + 3 ( 66+2.5 ) = 12 ( 110.32+2.5 ) + 3( 221.9+2.5 ) + 70 (8.5)$$

y despejando P se obtiene el valor de 25.295 Kg. Que es el peso que debe colocarse a 20 centímetros detrás del cilindro de contrapesos para equilibrar el sistema..

Nota: El cálculo del peso del espejo parabólico se hizo como se muestra a continuación:

#### **Cálculo del peso del espejo parabólico.**

**Diámetro = 30 cms.**

**Espesor = 19 mm**

$$V = \pi (0.15)^2 (0.019)$$

$$= 1.3430 (10)^{-3} \text{ m}^3$$

**Densidad del vidrio =  $\rho_v = 2515 \text{ Kg / m}^3$**

$$M = \rho_v V = 3.3777 \text{ Kg.}$$

**Peso unitario por espejo = 3.3777 Kg.**

**Peso total del sistema de espejos**

$$18 \times 3.3777 = 60.79 \text{ Kg.}$$

El peso se redondeó finalmente a 70 kilogramos, es decir, aumentando poco más de 9 kilogramos para compensar el peso total de sus propios soporte.

## CAPITULO 3

### CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

#### 3.1. LIMITES EN EL MOVIMIENTO DE OPERACIÓN

El seguimiento de la trayectoria solar en el DEFRAC requiere de dos ejes de movimiento uno que seguirá la posición del sol de acuerdo a la hora solar del día, este movimiento le corresponde al 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 3.1.

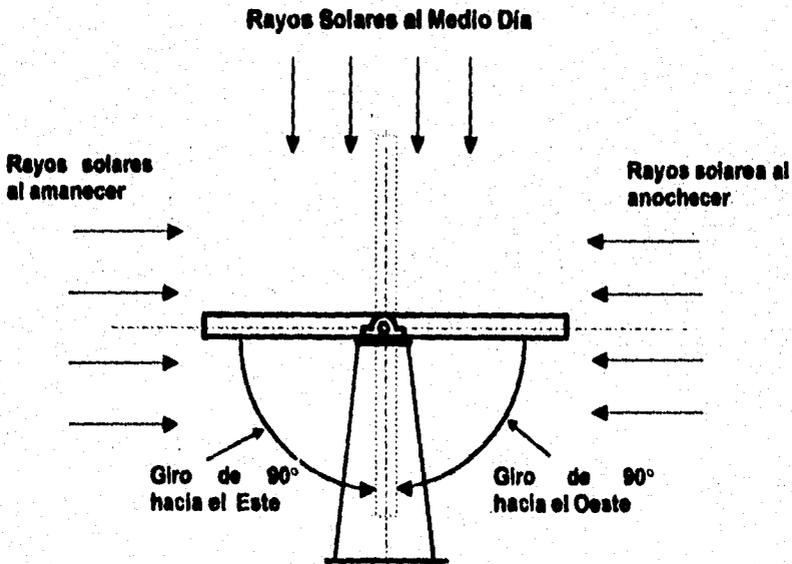


Figura 3.1 Movimiento del Marco Principal.

El segundo movimiento 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 3.2.

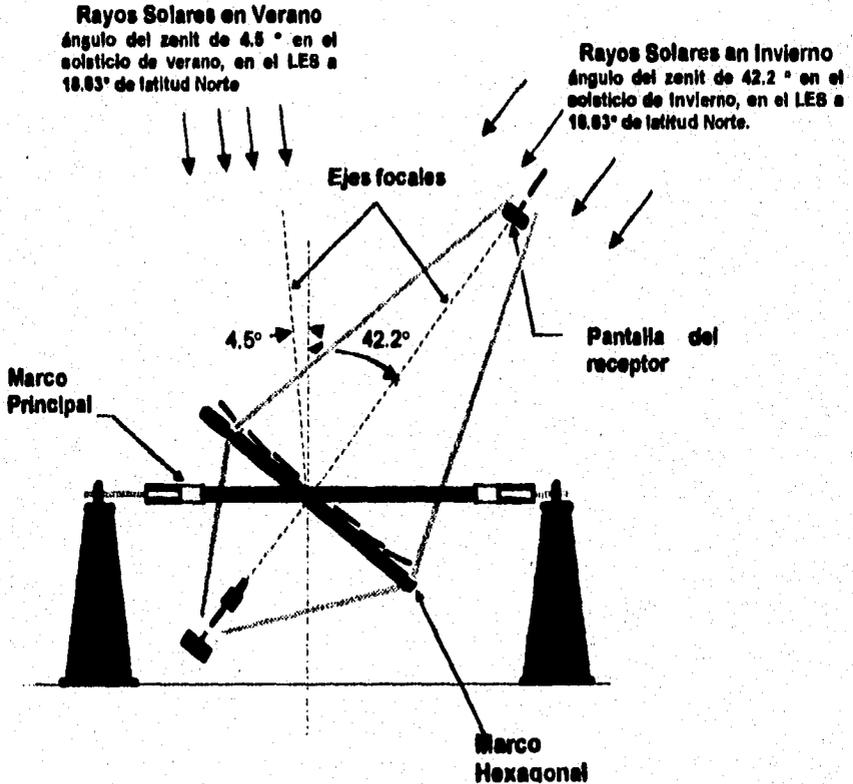


Figura 3.2. Movimiento del Marco Hexagonal

### 3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

En la tabla 3.1. se ve como varia el ángulo del zenit al medio día solar en los límites extremos de la declinación solar de  $+23.45^\circ$  a  $-23.45^\circ$  y  $0^\circ$  que corresponde respectivamente al solsticio de verano e invierno y a los equinoccios de primavera y otoño. Los días se toman en numeración ascendente corridos del primero de Enero como número 1 al 31 de Diciembre como número 365. (Ver apéndice "A")

Tabla 3.1. Variación del ángulo del zenit en el LES en el transcurso del año.

Fecha	No. del día N	Declinación Solar $\delta$	Latitud del LES $\phi$	Ángulo del Zenit $\theta_z$	Ángulo horario w
DECIEMBRE 21	355	-23.449	18.85	42.299	0
MARZO 22	81	0	18.85	18.85	0
JUNIO 21	172	23.449	18.85	4.598	0
SEPTIEMBRE 21	264	-0.201	18.85	19.05	0

Una vez especificados los límites de movimiento se debe orientar de tal forma que el eje del marco principal exterior coincida con la dirección norte-sur geográfico.

### 3.2. PUNTOS CRÍTICOS DE LA ESTRUCTURA

Dada la configuración del sistema, en la estructura del DEFRAC existen puntos críticos bien definidos en donde se concentran cargas y que deben tomarse en consideración para su diseño. En funcionamiento las cargas pueden considerarse estáticas ya que el movimiento es imperceptible. Estos puntos, son los puntos críticos de la estructura y son los que requieren de cálculos de diseño para evitar un colapso de la estructura, ver figura 3.3.

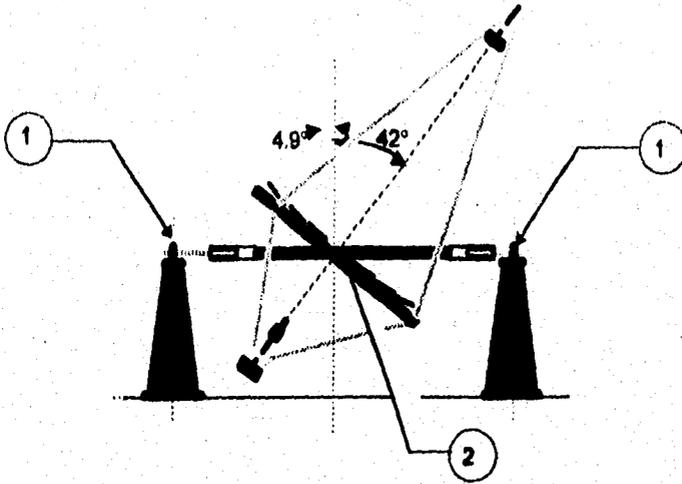


Figura 3.3. Los números 1 y 2 indican la posición de los puntos críticos de la estructura.

En esta figura 3.3 el número 1 representa el lugar de la carga concentrada del conjunto sobre cada una de las flechas que descansan en las bases, debe considerarse el diseño por esfuerzo cortante y momento flexionante, ver figura 3.4.

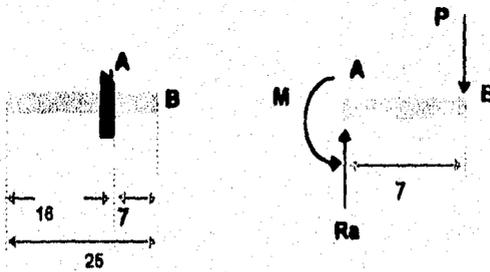


Figura 3.4. Esfuerzo en la flecha del marco principal.  
[Acotaciones en centímetros]

### 3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

En el punto No. 2 de la figura 3.3 se tiene la aplicación de una carga sobre la viga compuesta "I" que es hueca, la cual en un momento dado soportará prácticamente todo el peso del marco hexagonal con espejos, largucros inferiores y superiores con soportes y contrapesos. En conjunto se estima un peso total de ésta carga en 155 kilogramos que en un momento dado como ya se mencionó soportará la viga "I". El criterio aplicado para diseño es su resistencia a la flexión. Para conocer el valor de todas las fuerzas que intervienen en esta sección analizamos el D.C.L. (diagrama de cuerpo libre) del sistema, ver figura. 3.5.

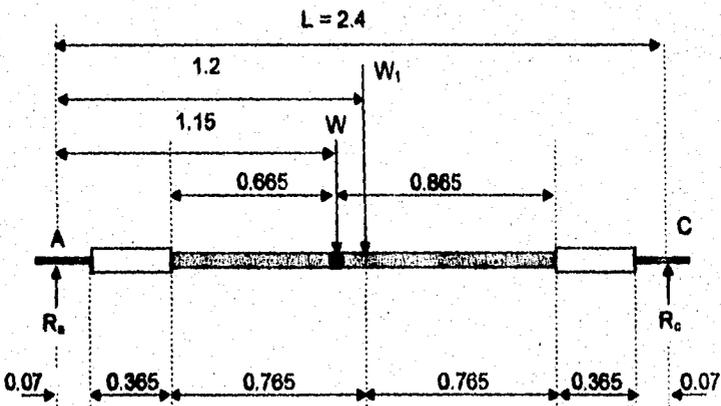


Figura 3.5. D.C.L. para el cálculo de las reacciones en los apoyos A y C. [Acotaciones en metros].

En donde  $W_1$  es una carga uniformemente distribuida y se está representando como  $W_1$  en el punto medio del sistema y que vendría siendo el peso total del marco principal,  $W$  es el peso debido al marco hexagonal con los soportes del receptor y contrapesos que como ya se menciono son de 3 kilogramos cada uno, espejos ( 70 kilogramos ) y contrapesos ( 25.3

kilogramos), los largueros con un peso total de 17 kilogramos y finalmente el marco hexagonal de 35 kilogramos, lo que nos da un total de 153.3 kilogramos que redondearemos a 155.

Para conocer el valor de las reacciones  $R_a$  y  $R_c$  tenemos que hacer dos análisis de la figura 3.5, el primero nos da un valor de  $R_a$  y  $R_c$  debido a la carga intermedia  $W$  y el segundo nos da otro valor de  $R_a$  y  $R_c$  debido a la carga uniformemente distribuida de  $W_1$ , (designados por  $R_{a1}$  y  $R_{c1}$ ) y aplicando superposición nos da un valor total de  $R_a$  y  $R_c$  que llamaremos en este caso  $R_{a1}$  y  $R_{c1}$ . [4]

Primer caso: Cálculo de  $R_a$  y  $R_c$  para una carga intermedia con doble empotramiento, ver figura 3.6. en donde;

$$R_a = W \frac{1.25^2 (3 \cdot 1.15 + 1.25)}{2.4^3} = 806.94 \text{ N}$$

$$R_c = W \frac{1.15^2 (3 \cdot 1.25 + 1.15)}{2.4^3} = 712.06 \text{ N}$$

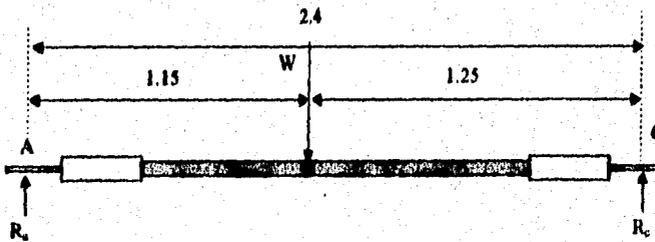


Figura 3.6. D.C.L. para el cálculo de las reacciones en los apoyos A y C. Primer caso. [Acotación en metros]

Segundo caso: Valores de  $R_{a1}$  y  $R_{c1}$  para el análisis de la carga  $W_1$  uniformemente distribuida, ver figura 3.7.

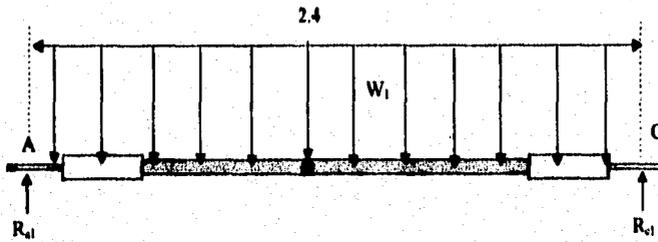


Figura 3.7. D.C.L. para el cálculo de las reacciones en los apoyos A y C. segundo caso. [Acotación en metros]

En donde  $W_1 = 70 \text{ Kg} (686 \text{ N})$

$$R_{A1} \text{ y } R_{C1} = W_1 \cdot 2.4 / 2$$

$$R_{A1} = R_{C1} = 84 \text{ Kgs. } (823.2 \text{ N})$$

Aplicando superposición sumamos los valores obtenidos de  $R_A$ ,  $R_C$  y  $R_{A1}$ ,  $R_{C1}$  tenemos:

$$R_A = 806.94 \text{ N}, R_C = 712.06 \text{ N}$$

$$R_{A1} = R_{C1} = 823.2 \text{ N}$$

$$\text{Valores totales: } R_{At} = 1630.14 \text{ N}$$

$$R_{Ct} = 1535.26 \text{ N}$$

Que son los valores totales de las reacciones en los apoyos "A" y "C" los cuales nos sirven para conocer como está repartida la carga en los extremos del sistema, y el valor de los esfuerzos cortantes en los puntos de apoyo que en este caso corresponden a los valores totales de las reacciones en esos puntos. Para conocer el valor de la deflexión en la barra de acero de los extremos del marco principal desde su apoyo en las chumaceras hasta su longitud extrema a 7 centímetros se calcula la deflexión  $Y_A$  y  $Y_C$  para la carga intermedia  $W$  y  $Y_{A1}$  y  $Y_{C1}$  para la carga distribuida  $W_1$ , ver figura 3.8.

### 3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

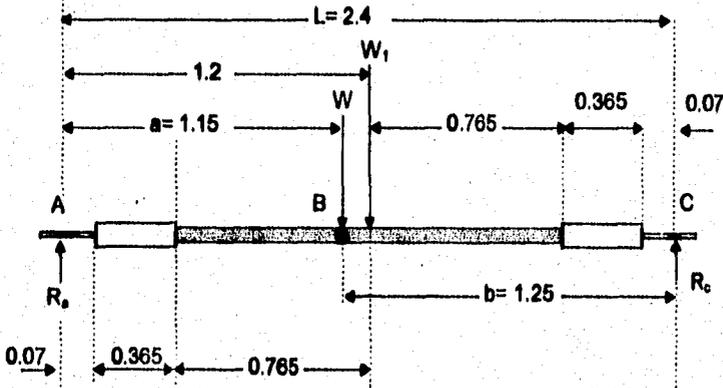


Figura 3.8. D.C.L. para el cálculo de la deflexión máxima en los apoyos A y C. [Acot. metros].

El valor total de las deflexiones  $Y_a$  y  $Y_c$  que se obtienen después de sumar las deflexiones ocasionadas por la carga intermedia  $W$  con los debidos a la carga distribuida  $W_1$ , suponiendo empotramiento en ambos casos. [4]

Primer caso. Carga intermedia  $W = 155 \text{ Kgs. (1519 N)}$ .

$$Y_a = Y_{ab} = \frac{Wb^2x^2}{6EI L^3} [(x)(3a + b) - 3aL]$$

$$Y_c = Y_{bc} = \frac{Wa^2(L-x)^2}{6EI L^3} [(L-x)(3b + a) - 3bL]$$

En donde  $x$  sería la distancia desde el punto en donde queremos conocer la deflexión;

$I$  es el módulo de inercia de la sección circular de la barra que sería:

$$I = \frac{\pi D^4}{64}, \text{ en donde } D = 38.1 \text{ mm, y nos queda; } I = 1.034355 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$E$  es el módulo de elasticidad que para el acero común es de  $207 \times 10^9 \text{ Pa}$

$L$  es la longitud total de un extremo del apoyo al otro extremo, en donde  $L = 2.4 \text{ m}$ .

a es la distancia del punto de apoyo de A hasta B y,

b es la distancia del punto de apoyo de A hacia C

W es la carga intermedia de 155 kg. 1519 N.

Sustituyendo valores:

$$Y_A = \frac{(1519)(125^2)(0.07^2)}{6(207 \times 10^9)(1.034355 \times 10^{-7})(2.4)^3} [0.07(3(115) + 125) - 3(115)2.4]$$

$$Y_A = -5.206 \times 10^{-5} \text{ m} = 0.052 \text{ mm}$$

que sería la deflexión máxima que tendríamos a 7 centímetros del apoyo A yendo hacia B.

$$Y_c = \frac{1519(115^2)(2.4 - 2.33)^2}{6EI L^3} [(2.4 - 2.33)(3(125) + 115) - 3(125)2.4]$$

$$Y_c = -0.047 \text{ mm}$$

El valor negativo indica que la deflexión es hacia abajo.

Segundo caso. Carga uniformemente distribuida  $W_1 = 70 \text{ Kgs. (686 N)}$

$$\text{Cálculo de la deflexión: } Y = -\frac{Wx^2}{24EI} (L - x)^2$$

$$Y = -\frac{686(0.07)^2}{24EI} (2.4 - 0.07)^2$$

$$Y = Y_{a1} \text{ y } Y_{c1} = -0.0355 \text{ mm}$$

Sumando las deflexiones de ambos casos tenemos un valor máximo de la deflexión:

$$Y_{a1} = .052 + .0355 = .0875 \text{ mm}$$

$$Y_{c1} = .047 + .0355 = .0825 \text{ mm}$$

Para calcular la deflexión máxima que podría presentarse en la viga "I" debido a los 155 Kgs. de peso del marco hexagonal se analizará la siguiente figura 3.9.

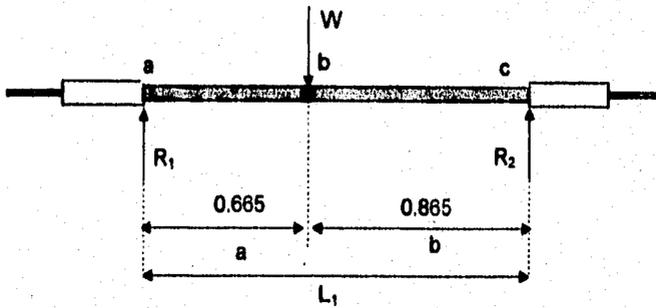


Figura 3.9. Carga sobre la viga "I" del marco principal [Acot. metros].

El análisis se tomará como doble empotramiento con carga intermedia, en donde;

$$R_1 = \frac{Wb^2(3a+b)}{L_1^3}, \text{ y } R_2 = \frac{Wa^2(3b+a)}{L_1^3}$$

$$R_1 = 1470 (0.865)^2(3 \cdot 0.665 + 0.865) / 1.53^3 = 938.44 \text{ N}$$

$$R_2 = 1470 (0.665)^2(3 \cdot 0.865 + 0.665) / 1.53^3 = 632.45 \text{ N.}$$

Las fuerzas cortantes serían:

$$V_{ab} = R_1 = 938.44 \text{ N}, \quad V_{cb} = -R_2 = -632.45 \text{ N}$$

La deflexión máxima en la viga "I".

$$Y_{ab} = \frac{Wb^2x^2}{6EIL_1^3}(x(3a+b) - 3aL_1)$$

$$Y_{bc} = \frac{Wa^2(L_1-x)^2}{6EIL_1^3}((L_1-x)(3b+a) - 3bL_1)$$

En donde \$I\$ es el momento de Inercia del área de la sección transversal de la viga "I".

En primer lugar para calcular el momento de inercia tenemos: área de la sección "I" compuesta es : ( ver figura 3.10.)

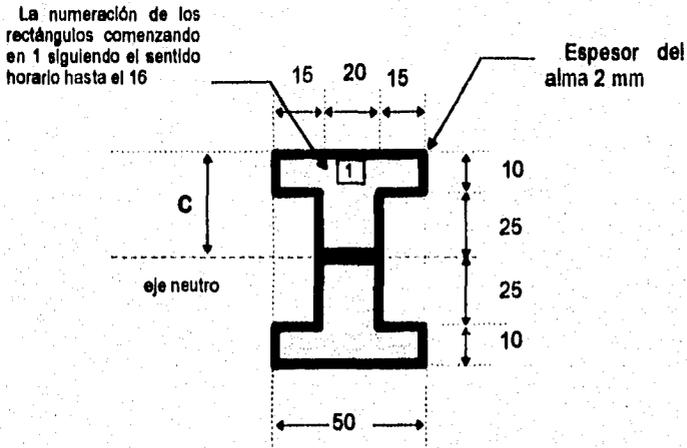


Figura 3.10. Sección transversal de la viga compuesta "I". [ cotas en milímetros ]

$$A = [ ( 50 \times 2 ) + ( 6 \times 2 ) + 15 ( 2 \times 2 ) + 25 ( 2 \times 2 ) + 20 \times 2 ] 2$$

$$A = 648 \text{ mm}^2$$

Ahora dividimos la sección "I" en rectángulos numerados y al suma de los momentos de éstas áreas alrededor del borde superior , para localizar el eje neutro, se tiene;

$$648 C = [ ( 50 \times 2 ) + ( 6 \times 2 ) ( 5 ) ( 2 ) + 15 ( 2 \times 2 ) ( 9 ) + 25 ( 2 \times 2 ) ( 20.5 ) + 20 \times 2 \times 34 + 20 \times 2 \times 36 + 25 ( 2 \times 2 ) ( 49.5 ) + 15 ( 2 \times 2 ) ( 61 ) + ( 6 \times 2 ) \times 2 \times 65 + ( 50 \times 2 ) 69 ]$$

$C = 35 \text{ mm}$ , lo cual era lógico de esperar ya que la sección tiene simetría por lo que su eje neutro está a la mitad del perfil compuesto.

A continuación calculamos el momento de inercia para cada rectángulo:

$$I_1 = I_{10} = bh^3 / 12 = 50 \times 2^3 / 12 = 33.33 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = I_{11} = I_9 = I_{16} = 2 \times 6^3 / 12 = 36 \text{ mm}^4$$

$$I_3 = I_8 = I_{12} = I_{15} = 15 \times 2^3 / 12 = 10 \text{ mm}^4$$

$$I_4 = I_7 = I_{13} = I_{14} = 2 \times 25^3 / 12 = 2604.166 \text{ mm}^4$$

$$I_5 = I_6 = 20 \times 2^3 / 12 = 13.33 \text{ mm}^4$$

Ahora empleando el teorema de los ejes paralelos para obtener el segundo momento del área de la sección compuesta "I" con respecto a su eje centroidal, este teorema señala que:

$$I_x = I_{c_g} + A d^2$$

En donde  $I_{c_g}$  es el segundo momento del área con respecto a cualquier eje paralelo alejado una distancia  $d$ .

La distancia para los rectángulos respecto a la ubicación del eje neutro es la siguiente:

$$d_1 = d_{10} = 34 \text{ mm}$$

$$d_2 = d_9 = d_{11} = d_{16} = 30 \text{ mm}$$

$$d_3 = d_8 = d_{12} = d_{15} = 26 \text{ mm}$$

$$d_4 = d_7 = d_{13} = d_{14} = 14.5 \text{ mm}$$

$$d_5 = d_6 = 1 \text{ mm}$$

Aplicando el teorema de los ejes paralelos, se tiene que:

$$I = 2 [ 33.33 \text{ mm}^4 + 100 \text{ mm}^2 ( 34 )^2 \text{ mm}^2 ] + 4 [ 36 \text{ mm}^4 + 12 \text{ mm}^2 ( 30 )^2 \text{ mm}^2 ] +$$

$$+ 4 [ 10 \text{ mm}^4 + 30 \text{ mm}^2 ( 26 )^2 \text{ mm}^2 ] + 4 [ 2604.16 \text{ mm}^4 + 50 \text{ mm}^2 ( 14.5 )^2 \text{ mm}^2 ] +$$

$$+ 2 [ 13.33 \text{ mm}^4 + 40 \text{ mm}^2 ( 1 )^2 \text{ mm}^2 ]$$

$$I = 408 \ 343 \ . \ 984 \ \text{mm}^4 = 4.08343984 \times 10^{-7} \ \text{m}^4$$

Recordando que;

$$Y_{ab} = \frac{Wb^2x^2}{6EIL_1^3} (x(3a+b) - 3aL_1)$$

$$Y_{bc} = \frac{Wa^2(L_1-x)^2}{6EIL_1^3} ((L_1-x)(3b+a) - 3bL_1)$$

sustituyendo se tiene:

$$Y_{ab} = [ (1520.55 \text{ N} (0.865)^2 \text{ m} (0.665)^2 \text{ m}) / (6 \times E \times I \times 1.53^3) ] (0.665(3 \times 0.665 + 0.865) - 3 \times 0.665 \times 1.53)$$

$$Y_{ab} = -3.186 \times 10^{-4} \text{ m} = -0.318 \text{ mm}$$

y

$$Y_{bc} = [ (1520.55 \text{ N} (0.665)^2 \text{ m} (1.53 - 0.865)^2 \text{ m}) / (6 \times E \times I \times 1.53^3) ] ((1.53 - 0.865)(3 \times 0.865 + 0.665) - 3 \times 0.865 \times 1.53) = -2.9506 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$Y_{bc} = -0.295 \text{ mm}$$

En donde, E es el módulo de elasticidad para el acero común :  $E = 207 \times 10^9 \text{ Pa}$  ,  $eI = 408$

$$343.984 \text{ mm}^4 = 4.08343984 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

### 3.3. 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 hexágono) y se ajusta cada uno por medio de tornillos y resortes en tres posiciones con lo cual se logra dirigir la superficie del espejo según se requiera. 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 espejos se concentre sobre un mismo plano y región focales.

Este sistema óptico es el punto de enlace en la transferencia de energía radiativa entre el sol y el sistema receptor. En resumen, el sistema óptico ó concentrador es la parte del colector que refleja la radiación directamente sobre el receptor.

Existen dos tipos de concentradores de foco puntual; los de curvatura simple como los casquetes esféricos ó paraboloides, y los de curvatura compuesta que consisten de varios espejos paraboloidales ó varios casquetes esféricos. Nuestro estudio radica en un concentrador de curvatura compuesta, éste funciona durante las horas de insolación con una incidencia de la radiación normal a la abertura del sistema pero no a cada espejo ya que cada uno de ellos se orienta de tal forma que la imagen del conjunto se produce en una misma región en el plano focal equivalente del sistema.

Los espejos son circulares 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 construcción consiste en la evaporación al alto vacío de aluminio, con protección de monóxido de silicio, la cara posterior está esmerilada y biceles 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  $\mu\text{m}$ , sin embargo en la región del espectro terrestre ( 0.3 a 2.5  $\mu\text{m}$  ) la absorción mencionada no afecta. La película de SiO tiene una buena afinidad con el aluminio, por lo tanto es una excelente película protectora para el mismo. En la evaporación del aluminio sobre el sustrato de vidrio se utilizan filamentos de tungsteno, pero el inconveniente que se observa después de la evaporación es la formación de microagujeros que favorecen la corrosión.[5]

#### 3.4. Espejos A,B y C.

Cada uno de los 18 espejos es un paraboloides, como se encuentran todos sobre un mismo plano ( marco hexagonal ), se requiere que existan tres grupos de seis espejos cada uno con diferentes distancias focales tales que las sumas de los tamaños de las imágenes solares de cada uno de ellos sea mínima en el plano focal equivalente del sistema (  $f = 2m$  ). Se denota como A, B y C a cada uno de estos tres grupos de espejos, y la figura 3.11 muestra su posición en el marco hexagonal.

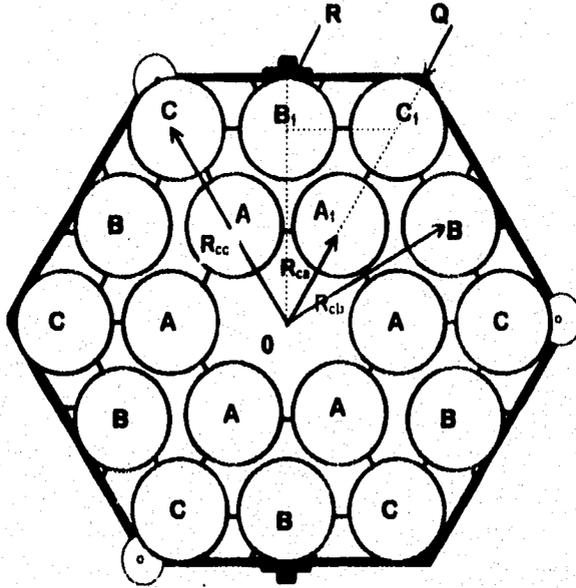
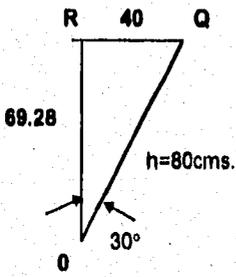


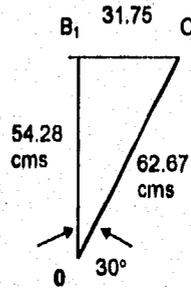
Figura 3.11. Distribución de los Espejos

De la figura 3.11 se obtienen los triángulos  $\Delta ORQ$  y  $\Delta OB_1C_1$  y considerando las dimensiones de los catetos, se calculan las hipotenusas.

### 3. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA



$$\begin{aligned}\text{Sen } 30^\circ &= 40/h; \\ \therefore h &= 80 \text{ cms.}\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\text{Cos } 30^\circ &= 54.28/h \\ h &= 62.67 \text{ cms.}\end{aligned}$$

Así, Deducimos lo siguiente:

$$R_{cc} = 62.67 \text{ cms.}$$

$$R_{cb} = 54.28 \text{ cms.}$$

$$R_{ca} = 31 \text{ cms.}$$

Al calcular la distancia que hay del centro del plano hexagonal al centro de cada uno de los espejos A, B y C se puede deducir el ángulo de inclinación que deberá tener cada espejo hacia el centro del sistema, ya que el rayo solar que incide en el centro de los paraboloides debe reflejarse en el centro del plano focal ubicado a 2 metros de distancia del marco hexagonal, ver figura 3.12.

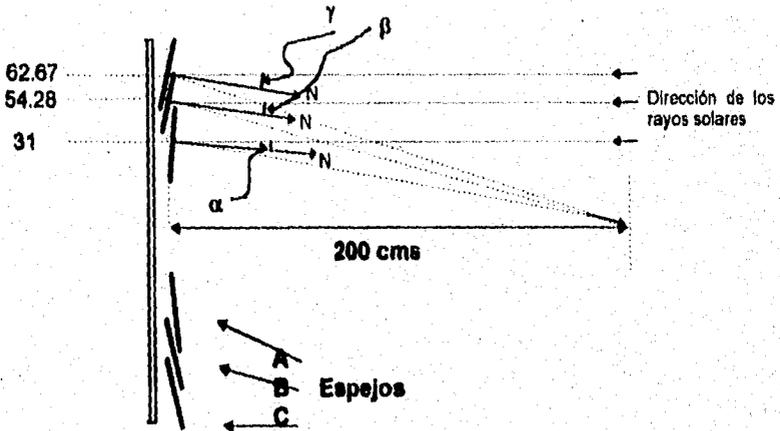


Figura 3.12. Angulo de posición de los espejos respecto al marco hexagonal.

Los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  corresponden respectivamente a la inclinación ya mencionada y la distancia focal para cada uno de los tres grupos de espejos se obtiene sacando la distancia del vértice de los paraboloides al plano focal del sistema.

$$\text{Tg } 2\alpha = 31 / 200 \quad ; \quad \alpha = 4.41^\circ$$

$$\text{Tg } 2\beta = 54.28 / 200 \quad ; \quad \beta = 7.59^\circ$$

$$\text{Tg } 2\gamma = 62.67 / 200 \quad ; \quad \gamma = 8.69^\circ$$

Calculando las distancias focales para cada tipo de espejo tenemos:

$$\text{Sen } 2\alpha = 31 / f_a \quad ; \quad f_a = 202.17 \text{ cms.}$$

$$\text{Sen } 2\beta = 54.28 / f_b \quad ; \quad f_b = 207.29 \text{ cms.}$$

$$\text{Sen } 2\gamma = 62.67 / f_c \quad ; \quad f_c = 209.80 \text{ cms.}$$

En donde :  $f$  es la distancia focal. Se mandaron hacer los tres grupos de espejos con las distancias focales anteriores. Los espejos fabricados, su posición, su ángulo de inclinación y su distancia focal se resume en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Características de los espejos.

Espejo	Distancia del centro del plano hexagonal al centro del espejo	Inclinación del espejo con respecto al plano hexagonal	Distancia focal del espejo
A	31 cms	$\alpha=4.40^\circ$	202.17 cms
B	54.28 cms	$\beta=7.59^\circ$	207.29 cms
C	62.67 cms	$\gamma=8.69^\circ$	209.80 cms

La figura 3.13 presenta la posición en el marco hexagonal del número asignado a cada espejo, y la tabla 3.3 es un resumen de la numeración de espejos, el tipo y su distancia focal.

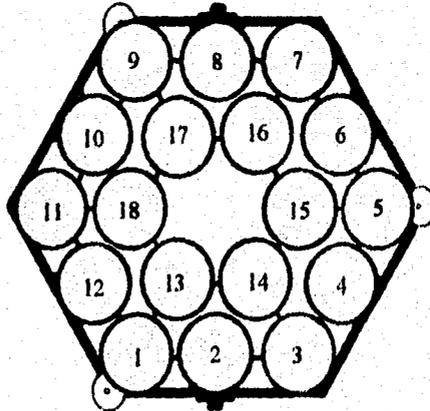


Figura 3.13. Numeración de los espejos en el marco hexagonal

Tabla 3.3. Resumen de la numeración de espejos, su tipo y su distancia focal real.

No. espejo	Tipo de espejo	$f$ (distancia focal en cm.)	$2R$
1	C	203	406
2	B	201.5	403
3	C	202.5	405
4	B	202	404
5	C	203	406
6	B	202	404
7	C	202.5	405
8	B	201.5	403
9	C	203	406
10	B	202	404
11	C	202.5	405
12	B	202	404
13	A	200	400
14	A	200.75	401.5
15	A	200.5	401
16	A	201	402
17	A	200.5	401
18	A	201	402

### 3.5. TAMAÑO DE IMÁGENES

Para entender la naturaleza del tamaño de las imágenes es necesario el estudio de algunos aspectos de geometría solar. La figura 3.14 muestra la relación en distancias de la tierra y el sol.

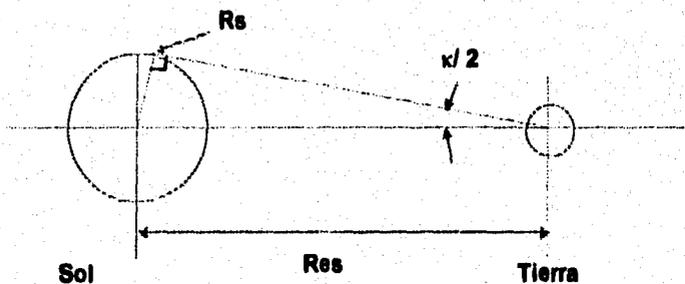


Figura 3.14. Relaciones de distancia de la Tierra y el Sol.

De la figura anterior podemos calcular el ángulo aparente que forma el sol visto desde la tierra, y se sabe que;

En donde :

$R_s \Rightarrow$  Radio del Sol es de 695,416.2 Km y

$R_{es} \Rightarrow$  Radio de la órbita terrestre es de  $149.568 \times 10^6$  Km.

Así,  $\text{Sen } \kappa/2 = R_s / R_{es} = 0.0046495$ ,

$\kappa / 2 = \text{sen}^{-1} [ 0.0046495 ] = 0.26639^\circ$

ó  $\kappa/2 = 15.98 \text{ min. ; } \kappa = 31.94 \text{ min} \approx 32 \text{ min.}$

Para obtener el tamaño de las imágenes de forma general hay que hacer ciertas deducciones. La figura 3.15 muestra la geometría de una parábola, donde  $f$ ,  $a$ ,  $r_r$  y  $\phi_r$  son la distancia focal, el diámetro del espejo, el radio de orilla y el ángulo de orilla respectivamente. [6]

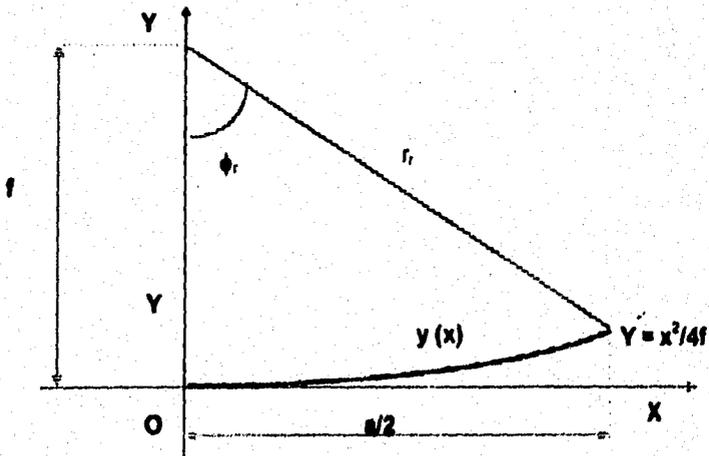


Figura 3.15. Geometría de una parábola.

La ecuación de la parábola es,

$y(x) = x^2/4f$  así, para  $x=a/2$  se tiene;  $y(a/2) = (a/2)^2/4f = a^2/16f$

y por lo tanto,

$$\tan \phi_r = \frac{a/2}{f - \frac{a^2}{16f}} = \frac{8(f/a)}{16(f/a)^2 - 1}$$

de donde

$$\phi_r = \tan^{-1} \left( \frac{8(f/a)}{16(f/a)^2 - 1} \right)$$

También

$\sin \phi_r = (a/2) / r_r$ , y por lo tanto  $r_r = (a/2) / \sin \phi_r$ ,

La figura 3.16 muestra la formación de la imagen solar de un espejo parabólico debida a un sólo cono de luz en el extremo del espejo. El tamaño de la imagen dada en el plano focal es  $2r_m$ .

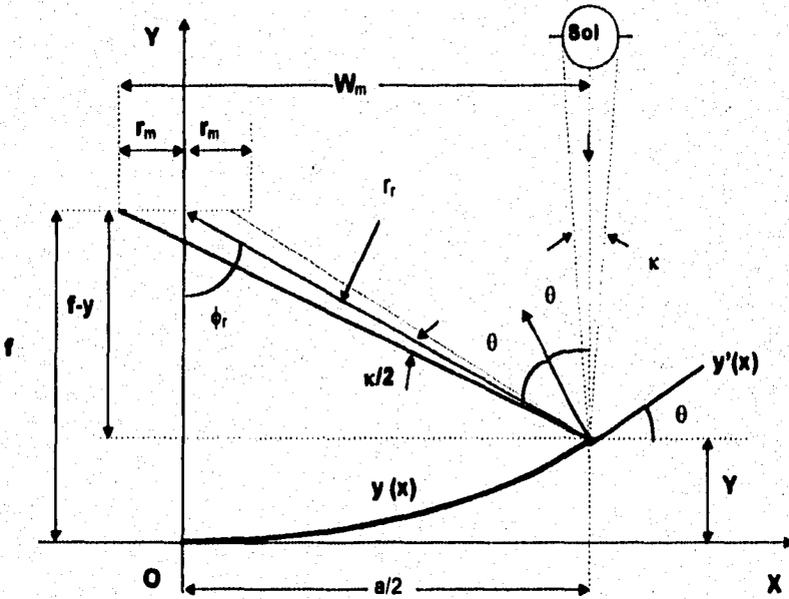


Figura 3.16. Formación de la imagen solar para un espejo parabólico con radiación directa paralela a su eje.



De la figura anterior tenemos lo siguiente para el espejo tipo A:

el desplazamiento en la figura 3.17 del punto R al S (RS) es;

$$\text{sen } \alpha = \frac{RS}{f}; \quad RS = 15.34 \text{ cms.} \quad (\alpha = 4.4^\circ)$$

de donde tenemos:

$$\tan \phi_{rA} = R_{ca} + x_A + \frac{RS}{f}; \quad \tan \phi_r = 31 + 15 + 15.34 / 200$$

$$\phi_{rA} = 17.05^\circ$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{RS}{SO}; \quad SO = 199.95 \text{ cm.}$$

$$\cos (\phi_{rA} + \kappa/2) = \frac{SO}{r''} = 199.95 / r''$$

$$r'' = 209.44 \text{ cms.}$$

$$\text{sen} (\phi_{rA} + \kappa/2) = R_{ca} + x_A + \frac{RS}{f} + r_{m\Lambda} / r'' = 31 + 15 + 15.34 + r_{m\Lambda} / 209.44$$

$r_{m\Lambda} = 0.998 \text{ cms.}$  y el diámetro de ésta imagen sería  $2r_{m\Lambda}$ , es decir,

$$2r_{m\Lambda} = 1.99 \text{ cms.}$$

Para el caso del espejo tipo B y C tan solo se sustituyen los valores correspondientes a cada caso, lo cual se resume en la siguiente tabla.

Tabla 3.4. Tamaño del diámetro de la imagen formada por los espejos del DEFRAC.

Tipo de espejo	Diámetro de la imagen formada (cms.)
<b>A</b>	<b>1.99</b>
<b>B</b>	<b>2.16</b>
<b>C</b>	<b>2.39</b>

### 3.6. RAZÓN DE CONCENTRACIÓN

Las dos definiciones que se pueden dar de razón de concentración son la de área o geométrica y la de flujo, ésta última se define como la razón de flujo de energía promedio sobre el receptor y sobre el área de apertura. Para las aplicaciones térmicas de la energía solar, la definición geométrica de concentración es la más usada, para el ámbito fotovoltaico la definición de concentración de flujo es la apropiada. ( $C_f = I_r / I_a$ ).[2]

La razón de concentración de área (geométrica) en forma de ecuación queda:

$$C_g = A_a / A_r \quad (1)$$

En donde:

$C_g$  = razón de concentración geométrica

$A_a$  = área de apertura del concentrador

$A_r$  = área del receptor

Para el concentrador de este estudio tenemos la siguiente concentración geométrica, tomando como referencia el espejo C que daría el máximo tamaño de imagen;

Diámetro por espejo: 30 cm

Diámetro máximo de la imagen solar 2.24 cm

$$A_a \text{ de un solo espejo} = \pi r^2$$

$$= \pi (15\text{cm})^2$$

$$= 706.85 \text{ cm}^2$$

$$A_a \text{ del sistema} = 706.858 \text{ cm} (18)$$

$$= 12723.45 \text{ cm}^2$$

$$A_r \text{ del receptor} = \pi r^2$$

$$= \pi (1.195 \text{ cm})^2$$

$$= 4.48 \text{ cm}^2$$

$$\text{Cg espejo} = A_a / A_r$$

$$= 706.85 / 4.48$$

$$= 157.77$$

$$\text{Cg sistema} = A_a / A_r$$

$$= 12723.45 / 4.48$$

$$= 2840.05$$

### Densidad de flujo en el receptor del DEFRAAC.

Por la relación geométrica entre tierra-sol se tiene que, si  $G_s$  es la densidad de flujo radiativo en la superficie del sol y  $G_{sc}$  ( $1367 \text{ w/m}^2$ ) la correspondiente en la órbita de la tierra, entonces por conservación de energía debe suceder que;

$G_s A_s = G_{sc} A_t$ ; donde  $A_s$  y  $A_t$  son las áreas de las esferas de radios  $R_s$  y  $R_t$  con  $R_t$  Distancia media tierra-sol que es  $1.495 \times 10^{11}$  (m) y  $R_s$  Radio del sol que es  $0.7 \times 10^9$  (m), ver figura 3.18

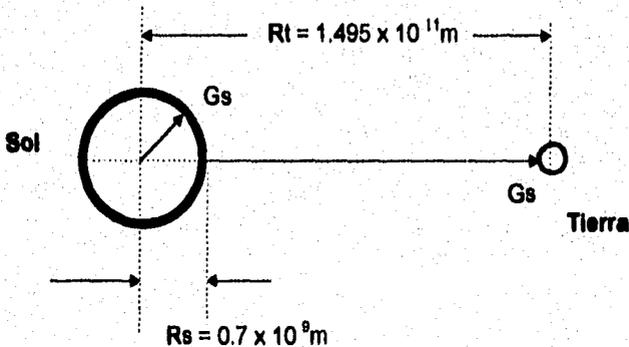


Figura 3.18. Densidad de radiación solar en la superficie del sol.

Así;

$$G_s = G_{sc} = \frac{A_t}{A_s} = G_{sc} \left[ \frac{R_t}{R_s} \right]^2$$

como  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ , entonces

$$G_s = G_{sc} (1.495 \times 10^{11} / 0.7 \times 10^9)^2 \text{ m}$$

Por lo tanto;  $G_s = 62,352,636 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  ó

$$G_s = 6,235.26 \text{ W/cm}^2$$

En el caso del DEFRAC se tiene que

$G_r = G_b$  Cg sistema, si suponemos  $G_b = 1000 \text{ W/m}^2$  en un día claro, entonces

$$G_r = 1000 \text{ W/m}^2 (2840.05)$$

$$= 284.005 \text{ W/cm}^2$$

Es decir, 22 veces menor que la densidad de concentración en la superficie del sol.

### 3.7. Temperaturas Alcanzables

Para calcular teóricamente la temperatura aproximada que puede obtenerse en el receptor del sistema se debe tomar en consideración diversos factores, los valores principales son los siguientes:

Haciendo un balance de energía en el receptor, se obtiene que

$$Q_u = Q_b - Q_c - Q_r$$

donde  $Q_u$  es la energía útil que puede ser sustraída,  $Q_b$  es la energía que llega al receptor,  $Q_c$  es la energía que se pierde por convección y  $Q_r$  es la que se pierde por radiación [2]. Así,

$$Q_u = G_b A_p \alpha \rho \phi - h A_r [T_r - T_{amb}] - A_r \sigma \epsilon [T_r^4 - T_{amb}^4] \quad (1)$$

en donde;

<b>Radiación directa normal</b>	<b>G<sub>b</sub></b>
<b>Reflectividad de las superficies</b>	<b>Rho</b>
<b>Absortancia</b>	<b>Alpha</b>
<b>Área de abertura del concentrador</b>	<b>A<sub>ap</sub></b>
<b>Emisividad</b>	<b>Epsilon</b>
<b>Constante de Stefan-Boltzman</b>	<b>Sigma</b>
<b>Coefficiente convectivo de transferencia de calor</b>	<b>h</b>
<b>Temperatura ambiente (K)</b>	<b>T<sub>amb</sub></b>
<b>Fracción de energía que incidiendo en A<sub>ap</sub></b>	
<b>llega a A<sub>r</sub></b>	<b>Phi</b>

Si no se extrae calor del receptor entonces  $Q_u$  es cero y la temperatura  $T_r$  es la temperatura de estancamiento. Utilizando los datos de la tabla 3.5 donde se presentan valores razonables de los parámetros que aparecen en la ecuación 1 y utilizando esta ecuación se obtienen los resultados de la tabla 3.6.

Tabla 3.5. Valores razonables de los parámetros de la ecuación 1.

<b>Radiación directa normal</b>	$G_b = 650 \text{ W/m}^2$
<b>Reflectividad de las superficies</b>	$\text{Rho} = 0.9$
<b>Absortancia</b>	$\text{Alpha} = 0.5$
<b>Área de abertura del concentrador</b>	$A_{ap} = 1.272345 \text{ m}^2$
<b>Radio del área del receptor como se midió</b>	$r = 0.014 \text{ m}$
<b>Área del receptor</b>	$A_r = 0.0006157 \text{ m}^2$
<b>Emisividad</b>	$\text{Epsilon} = 0.6$
<b>Constante de Stefan-Boltzman</b>	$\text{Sigma} = 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
<b>Velocidad del viento</b>	$V_v = 1.5 \text{ m/s}$
<b>Coefficiente convectivo de transferencia de calor</b>	$h = 11.4 \text{ W/m}^2\text{C}$
<b>Temperatura ambiente (K)</b>	$T_{amb} = 303.15 \text{ K (30}^\circ\text{C)}$
<b>Fración de energía que incidiendo en <math>A_{ap}</math> llega a <math>A_r</math></b>	$\text{Phi} = 0.80$

Tabla 3.6. Cálculo de la temperatura en el receptor sin extracción de calor ( $Q_u = 0$ ).

Tr (c)	Tr (k)	Qc (w)	Qr (w)	Qc + Qr (w)	Qb (w)	Qu (w)
1632,85	1906	11,25037209	277,7210728	288,9714447	292,5	3,52855347
1633,85	1907	11,25739107	278,3047403	289,5621314	292,5	2,937868601
1634,85	1908	11,26441005	278,889327	290,1537371	292,5	2,346262034
1635,85	1909	11,27142903	279,4748336	290,7462626	292,5	1,753737383
1636,85	1910	11,27844801	280,061261	291,339709	292,5	1,160290982
1637,85	1911	11,28546699	280,6488102	291,9340772	292,5	0,565922788
1638,85	1912	11,29248597	281,2368823	292,5293682	292,5	-0,02936823
1639,85	1913	11,29950495	281,826078	293,125583	292,5	-0,62558298
1640,85	1914	11,30652393	282,4161985	293,7227224	292,5	-1,22272242

En la tabla se ve que para  $Q_u = 0$  la temperatura de estancamiento obtenida es de 1637.85 °C, ésta es una temperatura alta. Nótese que se está usando una potencia baja  $G_b = 650 \text{ W/m}^2$ . Si se aumenta la potencia a  $1000 \text{ W/m}^2$ , con las mismas condiciones se obtiene una temperatura de estancamiento de 1860°C. La figura 3.19 muestra una gráfica de T de estancamiento contra  $G_b$  para los parámetros de la tabla 3.6.

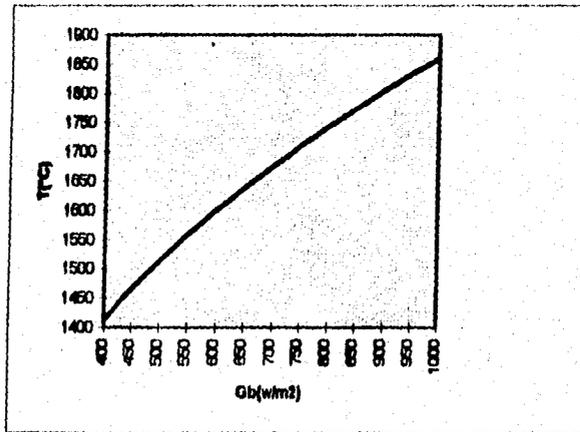


Figura 3.19. Gráfica de la temperatura de estancamiento en el receptor contra la radiación directa ( $G_b$ ).

### 3.8. Movimiento de la imagen solar en el plano focal

El cálculo de errores se enfoca sobre el sistema óptico, ya que el sistema de seguimiento tanto del marco principal como del marco hexagonal debe tener un movimiento con una continuidad lo suficientemente aceptable para evitar que la imagen solar en el plano focal se desplace y se pierda concentración.

A continuación, refiriéndonos primero al marco principal sabemos que el sol en su movimiento horario recorre aproximadamente 1 grado en 4 minutos, haciendo un cálculo del desplazamiento que tendría la imagen del sol en el plano focal si no se orientara el marco principal en 4 minutos, es decir, que permaneciera estático este tiempo tenemos, figura 3.20.

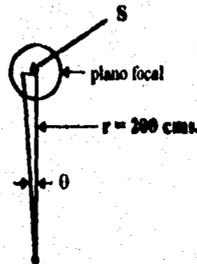


figura 3.20. Desplazamiento de la imagen solar en el plano focal debido a un grado de error.

De la figura anterior para el primer grupo de espejos:

$$\text{Sen } \theta = S/r$$

$$S = r \text{ Sen } \theta$$

$$S = 202.17 \text{ sen } 1^\circ \text{ cms.}$$

$$S = 3.52 \text{ cm.}$$

para el segundo grupo sería:  $S = 3.61 \text{ cm.}$  y para el tercero  $S = 3.66 \text{ cm.}$

"S" es el desplazamiento de la imagen solar en el plano focal si el marco principal se ajustara cada 4 minutos, en donde podemos ver que la imagen sale totalmente del área central de concentración. A continuación se presenta una tabla que resume este desplazamiento para diferentes intervalos de tiempo. (tabla 3.7)

Tabla 3.7. Desplazamiento de la imagen solar para el marco principal.

desplazamiento (cm.)	tiempo ( minutos)	grados
3,49045129	4	1
1,7452271	2	0,5
0,8726136	1	0,25
0,34904547	0.4	0,1
0,1745228	0.2	0,05

El movimiento del marco hexagonal está condicionado a la variación de la altitud solar a lo largo del año, teniendo un movimiento angular total de aproximadamente 46.8 grados, dada la latitud del LES ésta altitud nos da un ángulo del zenit máximo de 42.2 grados en el solsticio de invierno ( hacia el sur del punto zenital ) y de 4.5 grados en el solsticio de verano (hacia el norte del zenit).

En la figura 3.21 S es el desplazamiento de la imagen solar debida a la variación del ángulo del zenit, para el marco hexagonal y en donde a  $\theta$  se le dan como máximo los grados que varía el ángulo zenital durante un día. Este ángulo sería de  $18.85^\circ$  que coincide con la latitud del LES, es decir, al amanecer en el equinoccio de primavera por ejemplo, el Marco hexagonal estaría viendo hacia el este es decir,  $\gamma_z = 90^\circ$ , paralelo al Marco principal, pero al medio día se inclinaría  $18.85^\circ$  respecto al marco principal, o sea que  $\theta_z = 18.85^\circ$ .

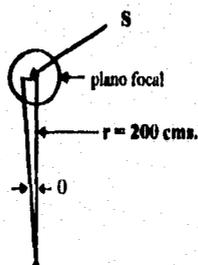


figura 3.21. Desplazamiento de la imagen solar en el plano focal para el marco hexagonal.

En donde el sol recorre en variación de altitud 46.8 grados en el transcurso de 182.5 días, lo cual nos da una variación angular de 0.256 grados por día en el ángulo zenital al medio día. Esto nos indica que un desplazamiento en el plano focal debido a la altitud solar también debe considerarse para no perder concentración, lo cual se conseguiría con hacer un ajuste de este ángulo en el marco hexagonal de una vez al día, tomando en cuenta tan solo el efecto debido a la variación de la declinación, pero en realidad y debido al diseño del DEFRAC, para

Tabla 3.8. Desplazamiento de la imagen solar para el marco hexagonal.

Desplazamiento (cm.)	tiempo ( horas)	grados
0,07299190	24	0,25
0,05815928	19,2	0,2
0,04332666	14,4	0,15
0,02849404	9,6	0,1
0,1745329	0,8	0,05

que el marco hexagonal sea siempre normal a los rayos solares debe considerarse que para seguir al sol hay que variar casi continuamente dos ángulos, uno que correspondería al marco principal (horario) y otro que sería su ángulo de altitud, que corresponde al marco hexagonal y que varía aproximadamente 18.85 grados alrededor del ángulo zenital en el medio día y el amanecer, y entre el ángulo zenital al medio día y el ocaso.

## CAPITULO 4

### ARMADO Y ALINEACION DEL SISTEMA

Para albergar al DEFRAC se ha construido una caseta expreso localizada en la plataforma de concentradores del Laboratorio de Energía Solar . Esta plataforma se localiza en la parte sur de dicho laboratorio. El armado del DEFRAC se realiza dentro de la caseta en tanto que la alineación del sistema óptico debe hacerse en la plataforma a cielo descubierto.

#### 4.1. Secuencia de Armado

Para montar el DEFRAC debe seguirse un orden por seguridad y protección de sus partes mecánicas y ópticas para facilitar su armado. Se requiere de cuatro personas que auxilien en el armado debido al peso de algunos de sus componentes. A continuación se presenta la secuencia de armado.

##### 1°. Sujeción de los pedestales a la base móvil.

Se arma la base móvil sujetando los pedestales a la misma por medio de los cuatro tornillos que tiene la base para cada pedestal. Los pedestales deben quedar perfectamente atornillados para formar una sola pieza rígida, ver figura 4.1.

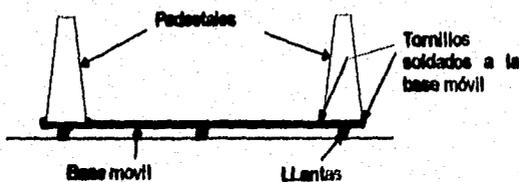


Figura 4.1. Colocación de los pedestales a la base móvil.

### 2°. Preparación de los pedestales para montar el Marco Principal.

Se coloca en un pedestal la placa en forma de "L" para el freno mecánico. En el otro pedestal se coloca la placa compensadora de altura. Los orificios de ambas placas se alinean con los orificios ubicados en la parte superior de los pedestales. Se incertan las chumaceras de 1 1/2" en las flechas del marco principal.

### 3°. Montaje del Marco Principal.

Con el auxilio de cuatro personas se levanta el Marco Principal y se coloca sobre los pedestales haciendo coincidir los orificios de las chumaceras con los orificios de las placas y los pedestales. Introducir los tornillos con sus rondanas y fijar las chumaceras a los pedestales. Se debe tener cuidado de ajustar el Marco Principal con respecto a las chumaceras de tal manera que éste al girar no pegue con los pedestales. Una vez hecho esto se deben atornillar los prisioneros de las chumaceras para evitar el deslizamiento de los ejes. Ver figura 4.2. y plano No. 7.

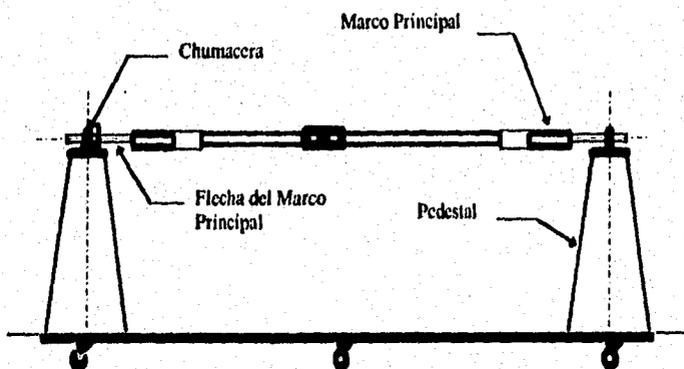


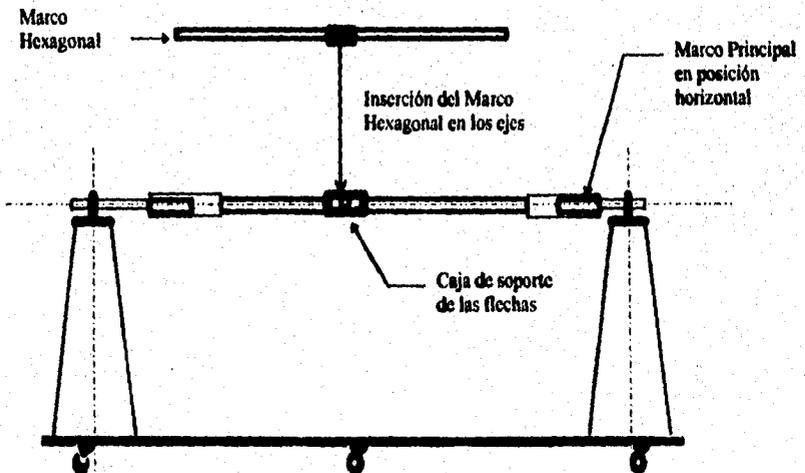
Figura 4.2. Colocación del Marco Principal sobre los pedestales.

**4º Sujeción de las Chumaceras de 3/4" en el Marco Principal.**

Las chumaceras de 3/4" se colocan y se fijan con tornillos en las placas soldadas en la parte intermedia del marco principal. Estas chumaceras alojarán las flechas del marco hexagonal por lo que deberán quedar alineadas.

**5º Montaje del Marco Hexagonal.**

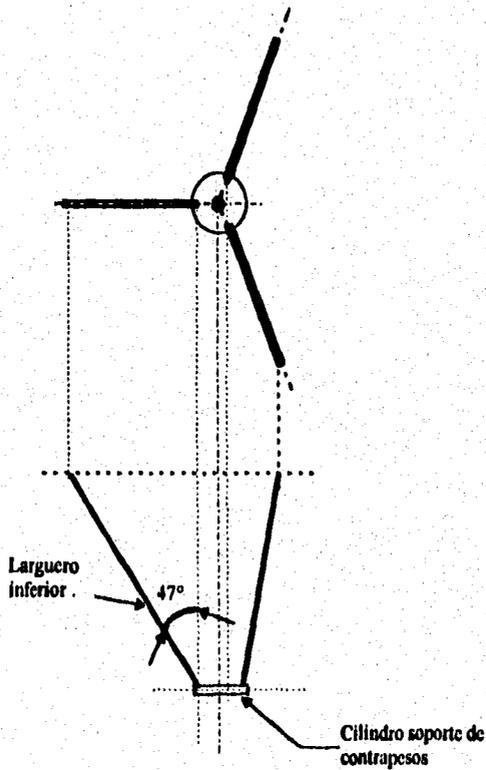
Con el auxilio de tres personas se levanta el marco hexagonal y se coloca dentro del marco principal, posicionado este en forma horizontal, de tal manera que coincidan las cajas de soporte de las flechas del marco hexagonal con las entradas de las chumaceras. En seguida se insertan las flechas y se fijan con los prisioneros del marco hexagonal. A continuación se centra el marco hexagonal de tal suerte que al girar no golpee con el marco principal. Finalmente se fijan las flechas con los prisioneros de las chumaceras para evitar cualquier deslizamiento posterior. Ver figura 4.3.



**Figura 4.3. Colocación del Marco Hexagonal en el Marco Principal**

**6° Sujeción de Largueros y Cilindros de Contrapesos y Receptor.**

Primero, se sujetan los tres largueros inferiores al cilindro de soporte de contrapesos (que es exactamente igual que el cilindro del receptor) introduciendo los pernos de los largueros en los tres orificios del cilindro fijándolos con sus respectivos prisioneros. Se debe tener cuidado de que los largueros queden alineados radialmente alejándose del centro, ver figura 4.4



**Figura 4.4. Posición de los Largueros Inferiores**

#### 4. ARMADO Y ALINEACIÓN DEL SISTEMA

Segundo, se incertan los pernos del otro extremo de los largueros en los orificios de la parte inferior de los cilindros de los soportes que están fijos al marco hexagonal, ver planos 3 y 3b. Estos pernos quedan fijos por medio de los prisioneros al marco hexagonal.

Tercero, se fijan los largueros superiores al cilindro de soporte del receptor de forma análoga a lo que se hizo con los largueros inferiores.

Cuarto, con el auxilio de cuatro personas se fijan los largueros superiores al marco hexagonal. Para ello, una persona sujetando el cilindro del soporte de contrapesos inferior hace girar los marcos principal y hexagonal posicionándolos en el mismo plano y de forma vertical. Las otras tres personas, cada una tomando un larguero incertan los pernos del otro extremo en los orificios de la parte superior de los cilindros del marco hexagonal. Estos pernos también quedan fijos por medio de prisioneros. ver figura 4.5.

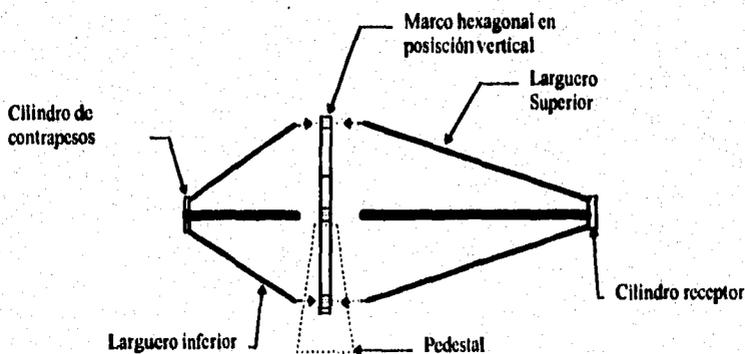


Figura 4.5. Colocación de los largueros

**7° Montaje de la pantalla receptora y contrapesos.**

La pantalla receptora tiene fija una flecha, ésta se incerta orificio central del cilindro de soporte del receptor y se fija con auxilio de los prisioneros sujetos al cilindro. Debe tenerse cuidado de dejar la pantalla receptora a 210 centímetros de distancia del plano hexagonal. El ajuste fino del plano focal se hace posteriormente. Para la colocación de los contrapesos se incerta la flecha que los soportará en el orificio central del cilindro de soporte del mismo y se fija con auxilio de los prisioneros. Se tendrá cuidado de que ésta flecha, estando el marco hexagonal en posición horizontal, no roce con la base móvil. Fija esta flecha, se introducen los contrapesos, que serán fijados con prisioneros después de haber balanceado el sistema. El sistema quedará armado como se ilustra en la figura 4.6.

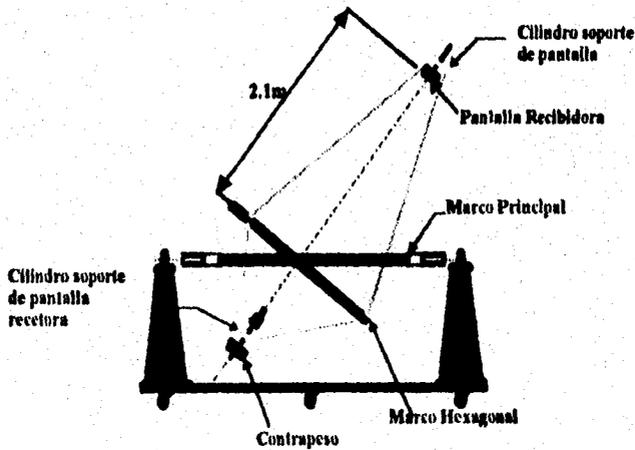


Figura 4.6. Sistema armado con contrapesos y pantalla receptora

#### **8° Montaje de los soportes de los espejos.**

El marco hexagonal tiene 18 platos numerados del 1 al 18, cada uno tiene tres perforaciones, ver planos 3 y 3a. Se tienen 18 soportes de espejos en forma de Y, cada soporte está numerado y lleva tres tornillos con sus respectivos resortes y tuercas. Se instala cada soporte en cada uno de los platos haciendo coincidir los tornillos con los orificios de los platos.

#### **4.2 Montaje y Alineación de Espejos.**

Dadas las características de los espejos, estos deben manejarse con suma precaución y ser manipulados con una tela ó guantes de algodón. Los espejos están numerados del 1 al 18 y corresponden a la numeración de los soportes. Cada soporte tiene tres placas de aluminio en su extremo con forma de "L" que permiten sujetar al espejo. Se deben montar los espejos estando el marco hexagonal en posición horizontal. Los primeros espejos en colocarse son los centrales, es decir, los numerados del 13 al 18 después le siguen los extremos del 1 al 12. Una vez puesto cada espejo este debe ser cubierto con su tapa. Con todos los espejos montados se vuelve a balancear el sistema ajustando el contrapeso. El balanceo se efectúa poniendo los marcos principal y hexagonal en un mismo plano y en posición vertical, haciendo que el eje óptico del sistema quede perpendicular al marco principal, y deslizando el contrapeso sobre la flecha hasta equilibrar el sistema sujetándolo con el prisionero respectivo.

Todo este montaje de espejos se realiza dentro de la caseta del DEFRAC. Para alinear los espejos se requiere que el DEFRAC sea desplazado a la plataforma de concentradores y el eje de giro del marco principal sea orientado en la dirección norte-sur geográfico. En esta posición y habiendo radiación solar directa se giran los marcos principal y hexagonal de tal suerte que la sombra del cilindro de soporte de la pantalla receptora coincida con el cilindro de soporte de contrapesos. En estas condiciones se fija el eje del marco hexagonal con los prisioneros para tal propósito, después es fácil seguir al girando al marco principal.

La tabla 3.2 resume el cálculo teórico de las distancias focales de cada uno de los tres grupos de espejos que se diseñarán para el DEFRAC. En realidad hay una variación de las distancias focales en los espejos reales. La tabla 4.1 presenta las distancias focales reales de cada uno de los 18 espejos.

Tabla 4.1 Distancias focales reales de los 18 espejos en centímetros.

Primer grupo

Espejo	No.	1	3	5	7	9	11
Distancia focal		203	202.5	203	202.5	203	202.5

Segundo grupo

Espejo	No.	2	4	6	8	10	12
Distancia focal		201.5	202	201	201.5	202	202

Tercer grupo

Espejo	No.	13	14	15	16	17	18
Distancia focal		200	200.7	200.5	201	200.5	201

El ajuste de la posición de la pantalla receptora en el plano focal real del sistema se consigue de la siguiente manera:

Destapando el espejo 13; el que tiene la distancia focal más próxima a la teórica, y estando el sistema orientado perpendicular a los rayos solares, se ajustará la posición del espejo moviendo los tornillos en la parte posterior del soporte hasta que la imagen solar coincida con el centro de la pantalla receptora. En esas condiciones se desplazará la pantalla receptora alejándola o acercándola del centro del marco hexagonal hasta conseguir que el diámetro de la

#### 4. ARMADO Y ALINEACIÓN DEL SISTEMA

imagen solar sea el menor posible. Ahí se fija la pantalla receptora y esa posición será considerada como el plano focal del sistema. De nueva cuenta se vuelve a ajustar la posición del espejo 13 hasta que la imagen solar quede posicionada en el centro de la pantalla. Todos los demás espejos se orientan de la misma forma que el espejo 13 ajustando sus imágenes al centro de la pantalla, ya sin mover la pantalla receptora y haciendo de forma individual descubriendo un espejo a la vez y manteniendo tapados todos los demás. Figura 4.7.

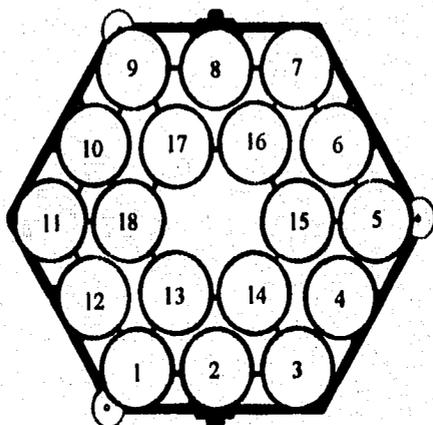


Figura 4.7. ubicación de los espejos

La figura 4.8 muestra dos fotografías del armado, alineado y orientación al sol.

#### 4. ARMADO Y ALINEACION DEL SISTEMA

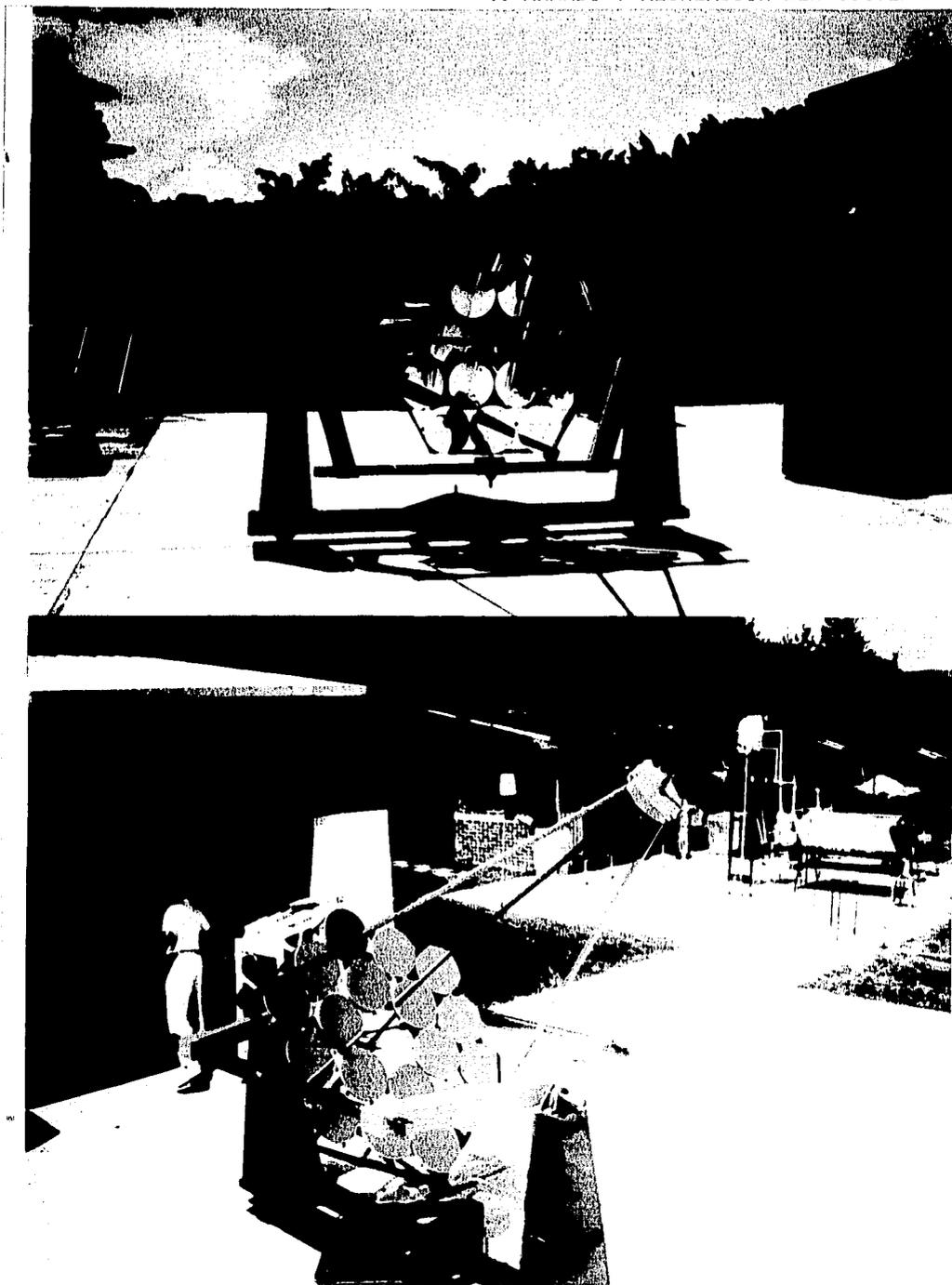


Figura 4.8. Fotografías del DEFRAC

## CAPITULO 5

### PUESTA EN OPERACIÓN

#### 5.1. Descripción del Experimento

Se alineó el sistema en una plataforma a cielo abierto con la línea que une las bases paralela al eje Norte-Sur, haciendo uso de una brújula magnética y haciendo la corrección entre el Norte magnético y el Norte geográfico, para esto según la lectura de la brújula se desvía alrededor de 5 grados hacia el Oeste para obtener la dirección del Norte geográfico.

Una vez fijo el DEFRAC en esta posición se alinea el sistema óptico como se describió en el capítulo anterior. Durante todo el experimento el seguimiento del sol se hizo manualmente.

El experimento consistió básicamente en, 1) comprobar dados los cálculos teóricos el tamaño de la imagen solar en el plano receptor y 2) dados los factores que afectan la intensidad de la radiación solar medir la temperatura en cierto tiempo de concentración.

El sistema se instrumentó colocando un termopar para medir una temperatura máxima de 1400 grados centígrados, éste se colocó en una cavidad cilíndrica de acero inoxidable colocada en el plano del receptor, con un diámetro de 3 centímetros aproximadamente.

Se tomaron mediciones en cada prueba de la intensidad de la radiación solar, con un piranómetro así como también de la velocidad del viento para posteriores cálculos teóricos. Se hicieron cinco mediciones y los resultados se exponen a continuación.

**5.2 Resultados.****Tabla 5.1. Primera prueba del DEFRAC**

<b>Experimento</b>	<b>Hora Solar</b>	<b>Insolación</b>	<b>Temperatura alcanzada</b>	<b>Tiempo</b>
<b>1</b>	<b>13:00</b>	<b>650 W/m<sup>2</sup></b>	<b>930°</b>	<b>4 minutos</b>
<b>2</b>	<b>13:35</b>	<b>620 W/m<sup>2</sup></b>	<b>734°</b>	<b>5 minutos</b>
<b>3</b>	<b>13:50</b>	<b>650 W/m<sup>2</sup></b>	<b>800°</b>	<b>5.5 minutos</b>
<b>4</b>	<b>14:05</b>	<b>630 W/m<sup>2</sup></b>	<b>770°</b>	<b>5.05 minutos</b>
<b>5</b>	<b>14:15</b>	<b>450 W/m<sup>2</sup></b>	<b>450°</b>	<b>4.26 minutos</b>

En la tabla 5.2 se resumen los datos generales del DEFRAC.

Tabla 5.2. Características Generales del DEFRAC

## DISEÑO

Area total de reflexión	1.2 m <sup>2</sup>
Distancia focal del Sistema	2 m
Diámetro del área proyectada en el plano focal ( receptor )	22.4 mm
Razón de concentración geométrica	3229.3

## FACETAS

No. de facetas	18
Diseño de facetas	Espejos parabólicos de vidrio ventana de primera superficie y 18mm de espesor
Diámetro de facetas	30 cm
Superficie reflectiva	Película de "Al" evaporado
Reflectividad	0.95

## ESTRUCTURA

Soporte general del Sistema Óptico	Perfil tubular rectangular de acero al carbón
Seguimiento	Montura Ecuatorial

## CARACTERÍSTICAS

Captación externa	1.2 Kw, a 1000 W/m <sup>2</sup> de insolación
Eficiencia óptica	90 %
Año y Fabricación	1994-1995. Talleres del LES-IIM UNAM. Temixco, Mor.

### 5.3 Conclusiones y sugerencias para estados futuros.

Se ha presentado el diseño del DEFRAC en lo general. Se hizo el cálculo de cargas y flexiones de los puntos críticos del sistema mecánico, se presentaron los criterios de diseño para definir los movimientos del sistema. Se describió en detalle cada componente del DEFRAC. Se realizó la construcción del aparato en los talleres del LES con ayuda de varias personas, todos los técnicos del taller mecánico, como estudiantes de servicio social, así como académicos del LES y el autor de esta tesis, todos bajo la dirección del Dr. Claudio Estrada G.

Se definió el procedimiento de ensamblaje y alineación del sistema. Se armó, alinee y se puso en operación al sistema. Se hizo el cálculo del tamaño de imágenes y de temperaturas máximas alcanzables. Al poner en operación el sistema se lograron temperaturas de estancamiento de 1200 grados centígrados, con insolaciones de  $800 \text{ W/m}^2$ .

El sistema mecánico del DEFRAC mostró tener un balanceo correcto. Actualmente se está terminando el sistema de control automático del DEFRAC que permitirá seguir el movimiento aparente del sol, manteniendo la energía solar concentrada en la zona focal del receptor. Esto está a cargo de otro tesista. Con la puesta en operación del DEFRAC se concluye la primera parte del proyecto que le dio origen. Con los resultados obtenidos este sistema promete ser un instrumento de investigación valioso para los estudios de concentración solar en México. Se sugiere hacer mayores correcciones al diseño para un seguimiento óptimo del sol ya sea colocando además de un control del marco principal otro para el marco hexagonal ó añadiendo altura a la base norte del sistema para poner paralelo el eje del marco principal con el eje polar.

## APÉNDICE A

### Conceptos Básicos Sobre Geometría Solar

La naturaleza de la radiación solar en el espacio está determinada por las características y estructura del sol. Para el presente estudio el rango de longitudes de onda que nos interesa va de 0.3 a 3  $\mu\text{m}$  que incluye el rango en el cual el sol emite la mayor parte de la energía.

El sol es una esfera de gran intensidad gaseosa con un diámetro aproximado de  $1.39 \times 10^9$  m y dista en promedio  $1.5 \times 10^{11}$  m de la tierra. Como es visto desde la tierra el sol gira sobre su propio eje una vez cada 4 semanas; es peculiar ya que no gira como un cuerpo sólido ya que su ecuador lo hace aparentemente en 27 días y las regiones polares en aproximadamente 30 días por cada rotación. La temperatura en su interior va aproximadamente de  $8 \times 10^6$  a  $40 \times 10^6$  K y la densidad como de 100 veces la del agua. Para aplicaciones de ingeniería se puede considerar que el sol se comporta como un cuerpo negro a una temperatura de 5762 K.

La energía es producida en el interior de la esfera solar a millones de grados centígrados, para ser transferida a la superficie y radiada al espacio. A grandes rasgos se expone la naturaleza de la energía solar. Lo que nos interesa saber es de qué manera se genera esta energía y cómo llega a la tierra en forma de ondas electromagnéticas; cada rayo llega a la superficie de la tierra en un ángulo sólido de aproximadamente  $32'$  ó 0.533. La constante solar (Gsc) es la energía que viene del sol medida en la unidad de tiempo y por unidad de área perpendicular a la dirección de la propagación de la radiación. Los primeros estudios para estimar el valor de la constante solar fueron hechos por C.G. Abbot y sus colegas tomando como punto de referencia lo alto de las montañas, estos estudios dieron un valor de  $1322 \text{ W/m}^2$  y más tarde Johnson (1954) lo fijó en  $1395 \text{ W/m}^2$ . Hoy en día se dispone de mejores medios para medirla a grandes altitudes y fuera de la atmósfera, sus resultados dan  $1353 \text{ W/m}^2$  ( $1.940 \text{ cal/cm}^2 \times \text{min}$ ), (428

Btu/ft<sup>2</sup> x hr.) ó ( 4.871 mj/m<sup>2</sup> x hr. ) el error estimado es de  $\pm 5\%$ . El último valor recomendado y que está basado en la nueva escala radiométrica mundial es:  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ .

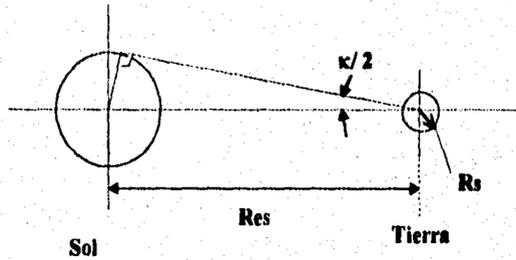


Figura 1. Relaciones Tierra-Sol.

En la distribución espectral de la radiación solar hay un rango dentro de las diferentes longitudes de onda en donde se concentra la mayor cantidad de energía aprovechable como recurso, este rango va de las longitudes de onda que se aprecian en la siguiente tabla.

Tabla 1. Radiación solar extraterrestre en incrementos de longitud de onda. [1]

$\lambda$ μm	$G_{s,\lambda}$ w/m <sup>2</sup> μm	$f_{0-\lambda}$	$\lambda$ μm	$G_{s,\lambda}$ w/m <sup>2</sup> μm	$f_{0-\lambda}$	$\lambda$ μm	$G_{s,\lambda}$ w/m <sup>2</sup> μm	$f_{0-\lambda}$
0.250	13.8	0.002	0.520	1820.9	0.243	0.880	965.7	0.621
0.275	224.5	0.005	0.530	1873.4	0.257	0.900	911.9	0.635
0.300	542.3	0.012	0.540	1873.3	0.271	0.920	846.8	0.648
0.325	778.4	0.023	0.550	1875.0	0.284	0.940	803.8	0.660
0.340	912.0	0.033	0.560	1841.1	0.298	0.960	768.5	0.671
0.350	983.0	0.040	0.570	1843.2	0.311	0.980	763.5	0.683
0.360	967.0	0.047	0.580	1844.6	0.325	1.000	756.5	0.694
0.370	1130.8	0.056	0.590	1782.2	0.338	1.050	668.6	0.720
0.380	1070.3	0.064	0.600	1765.4	0.351	1.100	591.1	0.743
0.390	1029.5	0.071	0.620	1716.4	0.377	1.200	505.6	0.783
0.400	1476.9	0.079	0.640	1693.6	0.401	1.300	429.5	0.817
0.410	1698.0	0.092	0.660	1545.7	0.424	1.400	354.7	0.846
0.420	1726.2	0.104	0.680	1492.7	0.447	1.500	296.6	0.870
0.430	1591.1	0.117	0.700	1416.6	0.468	1.600	241.7	0.890
0.440	1837.6	0.129	0.720	1351.3	0.488	1.800	169.0	0.921
0.450	1995.2	0.143	0.740	1292.4	0.507	2.000	100.7	0.941
0.460	2042.6	0.158	0.760	1236.1	0.526	2.500	49.5	0.968
0.470	1996.0	0.173	0.780	1188.7	0.544	3.000	25.5	0.981
0.480	2028.8	0.187	0.800	1133.3	0.561	3.500	14.3	0.988
0.490	1892.4	0.201	0.820	1089.0	0.577	4.000	7.8	0.992
0.500	1918.3	0.216	0.840	1035.2	0.593	5.000	2.7	0.996
0.510	1926.1	0.230	0.860	967.1	0.607	8.000	0.8	0.999

En donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $G_{s,\lambda}$  es el promedio de la radiación solar en el intervalo medio entre las longitudes de onda y  $f_{0-\lambda}$  es una fracción de la energía total en el espectro que está entre longitudes de onda 0 y  $\lambda$ .

La intensidad de la radiación solar extraterrestre varía de acuerdo al mes del año como se aprecia en la siguiente gráfica, Fig. 2.

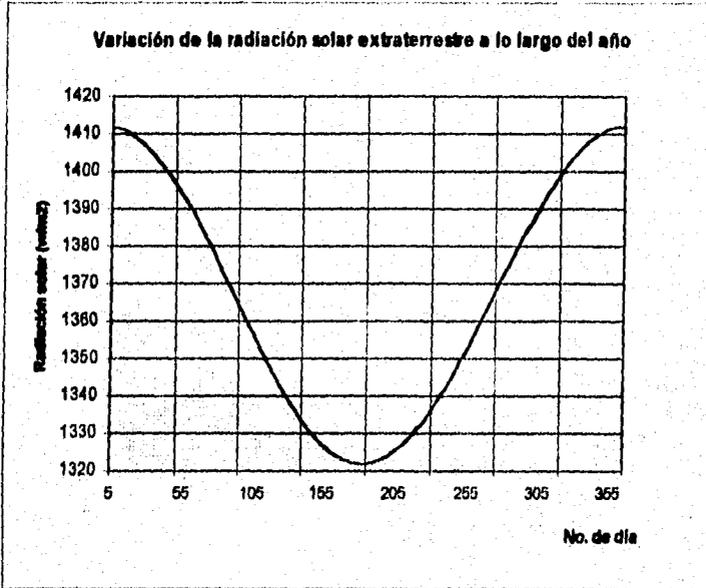


Figura 2. Variación de la radiación solar extraterrestre con el mes del año.[1]

Una forma de medir la dependencia de la radiación solar extraterrestre de acuerdo al transcurso del año para un día dado se calcula con la siguiente ecuación, que corresponde a la gráfica anterior.

$$G_{on} = G_{sc} (1 + 0.033 * \cos 360n/365) \tag{1}$$

Donde  $G_{sc}$  = constante solar =  $1367 \text{ W/m}^2$

$G_{on}$  = la radiación solar extraterrestre medido en un plano normal al rayo incidente en cualquier enésimo (n) día del año ( al medio día ).

Esto está relacionado con el movimiento de la tierra alrededor del sol y su rotación, los cuales son de suma importancia en aplicaciones de energía solar. La tierra describe una órbita elíptica alrededor del sol con éste en uno de sus focos ( casi una circunferencia ), con una excentricidad de  $e = 0.0167$ . El período de traslación se define como un año, el perihelio es el punto en el que la tierra está más cerca del sol y se da aproximadamente el 2 de enero ( $1.47 \times 10^8$  m ) y el afelio ( mayor lejanía) el 2 de julio ( $1.522 \times 10^8$  m ).

El movimiento orbital y de rotación de la tierra son contrarios al sentido de las manecillas del reloj vistos desde el polo norte.

La órbita elíptica de la tierra alrededor del sol genera un plano, llamado plano de la eclíptica, la inclinación del eje de la tierra con respecto a la normal al plano de rotación es de  $23.45^\circ$ . A causa de su eje inclinado la superficie de la tierra se divide en las siguientes zonas:  
zona tórrida, en donde el sol está en el zenit ( perpendicular a la superficie de la tierra ).  
zona templada, en donde el sol aparece todos los días en el horizonte pero nunca en el zenit.  
zonas frías, en donde el sol permanece por debajo del horizonte o sobre él al menos un día completo cada año.

## Tiempo Solar

Es necesario conocer la hora solar en aplicaciones de energía solar y por medio del manejo de ángulos la posición del sol y su proyección en diferentes puntos sobre la tierra.

La hora solar está basada en el movimiento angular aparente del sol a través del cielo y no coincide generalmente con la hora local y para calcularla es necesario aplicar dos correcciones:

Primero hay que considerar la longitud entre el meridiano donde se encuentra el observador y el meridiano local en el cual está basado el tiempo, al sol le toma 4 minutos para recorrer 1° de longitud.

Segundo, esta corrección involucra la ecuación del tiempo (Ec. 3) que toma en consideración las perturbaciones en la tierra en su velocidad de rotación, lo cual afecta el punto de vista del observador respecto al paso del sol.

$$\text{Tiempo solar} = \text{Tiempo oficial} + 4 (Lst - Lloc) + E \quad (2)$$

Donde : E= ecuación del tiempo (minutos) [1]

Lst= es el meridiano local de acuerdo a la hora

Lloc= es la longitud del lugar en cuestión en grados oeste

n= día del año.  $1 < n < 365$

$$E = 9.87 * \text{sen } 2B - 7.53 * \text{cos} B - 1.5 * \text{sen } B \quad (3)$$

$$B = 360 (n-81)/364 \quad (4)$$

## **Factores que Afectan la Intensidad de la Radiación Solar**

La intensidad de la radiación solar que se recibe en la superficie de la tierra está condicionada a una serie de factores que se pueden clasificar como sigue:

### **Astronómicos**

- a) Variación de la distancia tierra-sol
- b) Declinación solar
- c) Espectro solar entre 0.3 y 4.0  $\mu\text{m}$
- d) Magnitud de la constante solar
- e) Variación con el ángulo horario

### **Geográficos**

- f) Latitud
- g) Longitud
- h) Altura sobre el nivel del mar
- i) Geografía de la localidad ( costa, montaña, ciudad, desierto, etc...)

### **Geométricos**

- j) Altura solar
- k) Azimut del sol
- l) Orientación del plano receptor
- m) Inclinación del plano receptor

**Atmosféricos**

- n) Masa óptica relativa
- o) Contenido de agua en la atmósfera
- p) Contenido de ozono en la atmósfera
- q) Turbiedad de la atmósfera
- r) Nubosidad del cielo
- s) Reflexiones múltiples entre la atmósfera y el suelo

**Ángulos Solares**

La posición relativa del sol con respecto a un plano u objeto en la tierra se puede determinar en términos de varios ángulos que son los siguientes:

Latitud (  $L$  ó  $\phi$  ). Es la distancia angular de un punto  $P$  sobre la tierra con respecto al ecuador; es decir, es el ángulo formado entre la línea  $op$  y la proyección de  $op$  sobre el plano ecuatorial, el punto "o" representa el centro de la tierra.

$$0 < \phi < 90 \text{ ( norte o sur )}$$

Declinación ( $\delta$ ). Es la distancia angular de los rayos del sol (norte ó sur) con respecto al ecuador. Sobre el ecuador + y bajo - .

$$- 23.45 < \delta < 23.45$$

$$\delta = 23.45^\circ \text{ sen } ( 360/365 * (284 + n)) \tag{5}$$

Ángulo horario (  $h$  ó  $\omega$  ). Es el ángulo medido sobre el plano ecuatorial de la tierra, entre la proyección de  $op$  y la proyección que une el centro del sol con el centro de la tierra. En el medio día solar el ángulo horario es de 0 , y expresa el tiempo del día con respecto al medio día solar.

1 hora =  $15^\circ$       360° = 24 horas

**Azimut( $\gamma_s$ )**. Ángulo medido en el plano horizontal entre el vector norte-sur y la proyección horizontal de los rayos solares.

-  $180 < \gamma_s < 180$  ( Oeste +, Este - )

$$\text{sen } \gamma_s = - \text{sen } \omega * \text{cos } \delta / \text{sen } \theta_z \quad (6)$$

**Inclinación ( $\beta$ )**. Es el ángulo entre la superficie plana en cuestión y la horizontal.

$$0 < \beta < 180$$

**Ángulo de incidencia ( $\theta$ )**. Es el ángulo entre el rayo solar sobre la superficie y la normal a ésta superficie en cuestión.

$$\text{cos } \theta = \text{sen } \delta * \text{sen } \phi * \text{cos } \beta - \text{sen } \delta * \text{cos } \phi * \text{sen } \beta * \text{cos } \gamma + \quad (7)$$

$$+ \text{cos } \delta * \text{cos } \phi * \text{cos } \beta * \text{cos } \omega$$

$$+ \text{cos } \delta * \text{sen } \phi * \text{sen } \beta * \text{cos } \gamma * \text{cos } \omega$$

$$+ \text{cos } \delta * \text{sen } \beta * \text{sen } \gamma * \text{sen } \omega$$

Para el caso particular de superficie horizontal  $\beta = 0$ ,  $\theta$  será  $\theta_z$  que es el ángulo de zenit:

$$\text{cos } \theta_z = \text{cos } \delta * \text{cos } \phi * \text{cos } \omega + \text{sen } \delta * \text{sen } \phi \quad (8)$$

Otra ecuación que nos da el número de horas que dura el día es:

$$N = 2/15 * \text{cos}^{-1} ( -\text{tan } \phi * \text{tan } \delta ) \quad (9)$$

que es un caso particular de;

$$\cos \omega = -\sin \phi * \sin \delta / \cos \phi * \cos \delta = -\tan \phi * \tan \delta \quad (10)$$

para el amanecer y anochecer  $\theta_z = 90^\circ$ .

Altitud solar ( $\alpha$ ). Es el complemento del ángulo del zenit  $\theta_z$ .

$$\sin \alpha = \sin \delta * \sin \phi + \cos \delta * \cos \phi * \cos \omega \quad (11)$$

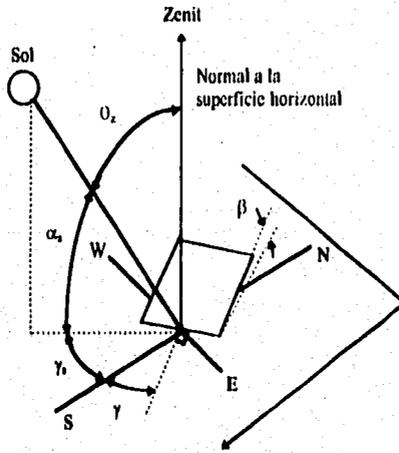


Fig.3. Ángulo del zenit, inclinación, ángulo de azimut de la superficie horizontal, ángulo de azimut para una superficie inclinada.

En el caso de colectores concentradores solares en el cual el sistema óptico (concentrador) está en un plano que debe tener un movimiento de seguimiento del sol, es decir, el rayo solar debe ser perpendicular a éste plano, y en el cual se debe variar el movimiento por grados se aplican las siguientes ecuaciones según el tipo de movimiento, ya sea sobre un solo eje ó sobre dos:

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

para un plano colocado sobre el eje horizontal este-oeste para un ajuste de tal forma que la superficie sea normal a los rayos solares al medio día:

$$\cos \theta = \sin \delta + \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (12)$$

para un plano orientado sobre el eje este-oeste con un ajuste continuo para minimizar el ángulo de incidencia:

$$\cos \theta = (1 - \cos \delta \cdot \sin \omega) \quad (13)$$

para un plano orientado sobre el eje norte-sur con ajuste continuo para minimizar el ángulo de incidencia:

$$\cos \theta = [(\sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) + \cos \delta \cdot \sin \omega] \quad (14)$$

para un plano orientado sobre el eje norte-sur paralelo al eje de la tierra con ajuste continuo:

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (15)$$

para un plano perpendicular a los rayos solares con dos ejes de seguimiento continuo:

$$\cos \theta = 1 \quad (16)$$

## APÉNDICE B

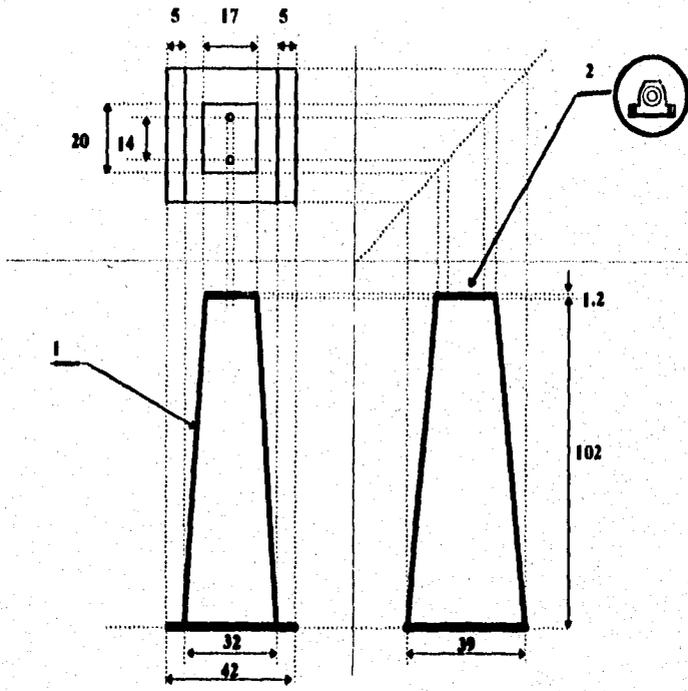
### PLANOS MECÁNICOS DEL DEFRAC

---

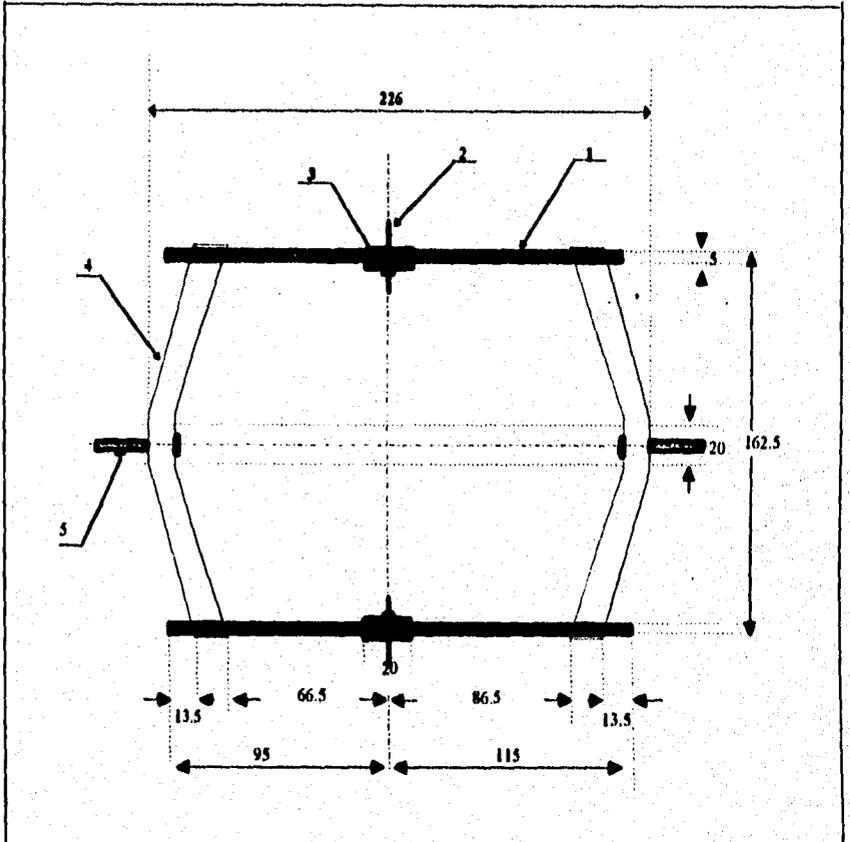
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Duffie, J.A. y W.A. Beckman  
"Solar Engineering of Thermal Process"  
John Wiley & Sons Inc. 1991.
  
- [2] Stine, W.B. y R.B. Diver  
"A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology"  
Sandia National Laboratories, USA, 1994.
  
- [3] Ferdinand P. Beer y E. Russell Johnston, Jr.  
"Mecánica Vectorial para Ingenieros, Estática", 3ª edición,  
editorial Mc Graw Hill. 1994.
  
- [4] Shigley J.E. y Mischke C.R.  
"Diseño en Ingeniería Mecánica"  
editorial Mc Graw Hill, 5ª edición, 1992.
  
- [5] Memorias de la XVIII Reunión Nacional de Energía Solar  
Hermosillo, Sonora. Octubre 1994.
  
- [6] Lehman C.H.  
"Geometría Analítica", editorial Limusa, 11ª reimpression. 1986.
  
- [7] Edward E. Anderson  
Fundamentals of Solar Energy Conversion  
Editorial Addison-Wesley Publishing Company. 1983.

- [8] **Notas del Curso de Actualización en Energía Solar. 1994**  
**Universidad Nacional Autónoma de México, IIM, LES.**  
**Responsable de la publicación; Issac Pilatowsky Figueroa**
- [9] **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<sup>er</sup> Simposio Nacional sobre Tecnologías de Concentración Solar.**  
**Fac. de Ingeniería, UAEM, Toluca, Edo. Mex.**  
**5-6 de julio de 1995.**



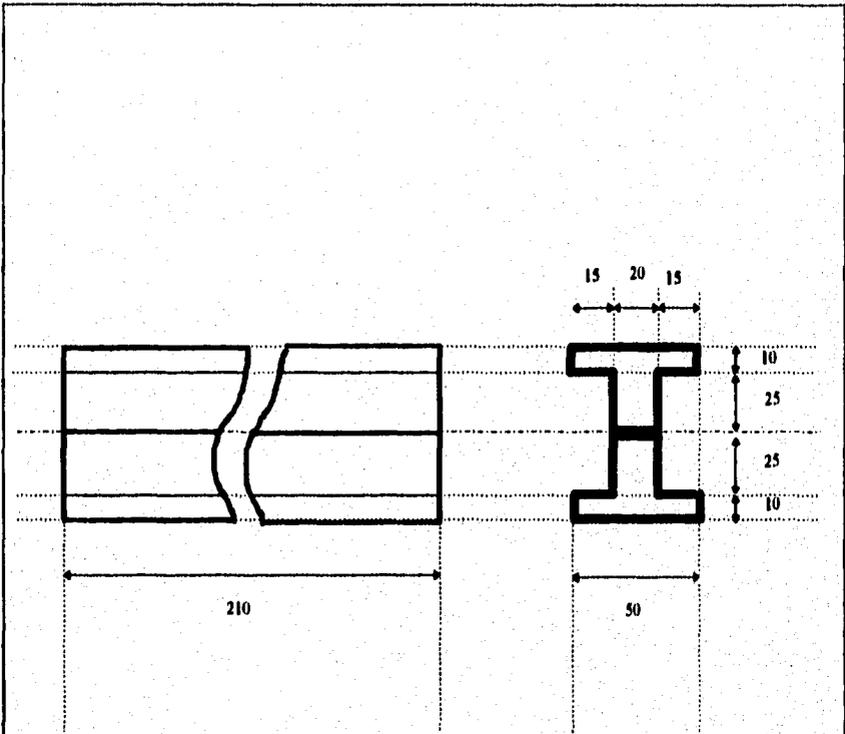
2	2	Chumacera p/eje	Chumacera con grasa marca Dodge de 1 1/2" diámetro	Comprada
1	2	Base "A"	Lamina de Acero Cold- Rolled 3mm de espesor	
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
<b>LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM</b>				
Acotación : cms.		Escala : 1:15	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
		BASE "A"		Disñó: A. Oskam V. C.A. Estrada Gasco S.E. Higuera Alva
				Piano No. 1



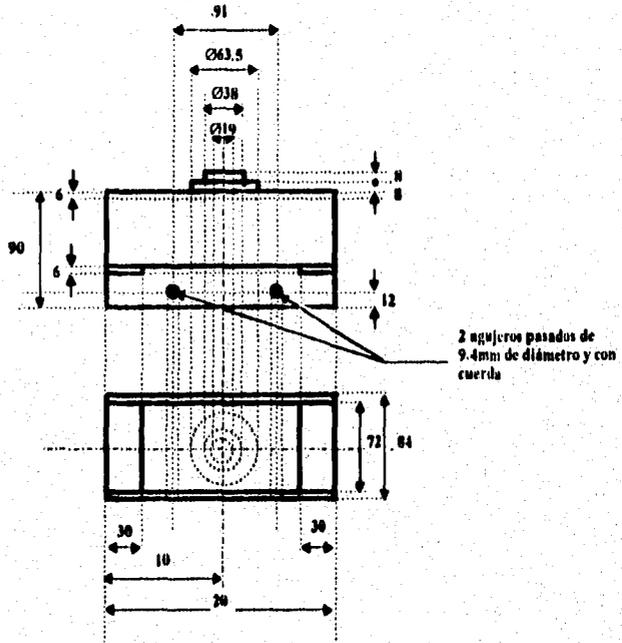
5	2	Flecha del ala del Marco Principal	Barra de acero	Ver detalles en plano 2-D
4	2	Ala del Marco Principal	Lámina de acero de 3 mm	Ver detalles en plano 2-C
3	2	Caja p/ soporte de flecha		Ver detalles en plano 2-B
2	2	Flecha	Barra de acero de 3/4" de diámetro	
1	2	Viga Compuesta		Ver detalles en plano 2-A
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones

**LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM**

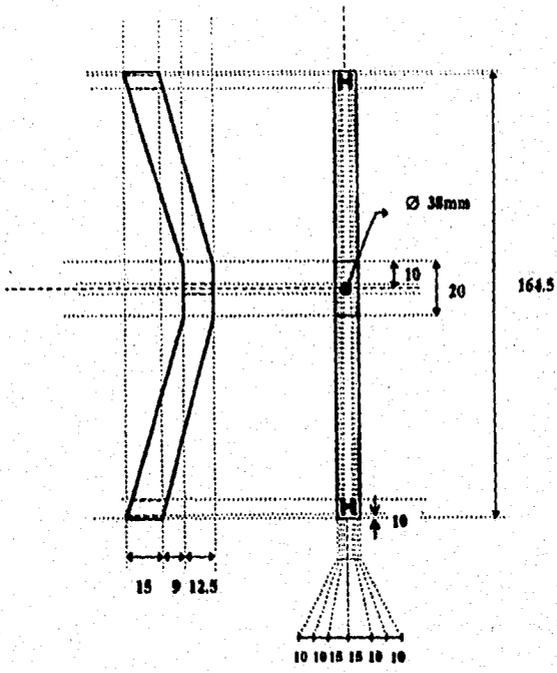
Acotación : cms.	Escala :	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Iliguera A. Diseño: A.H. Okam C.A. Estrada Gasca S.E. Iliguera Alva Plano No. 2
Marco Principal Exterior Sección "B"			



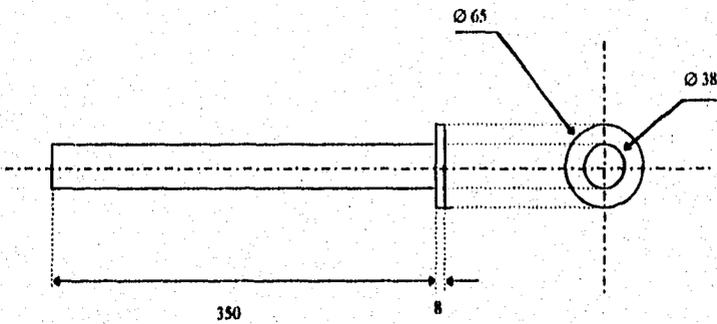
1	2	Viga "I" compuesta	Perfil de acero "I" hueco 144 cal. 18 de 1 Kg/m	
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
<b>LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM</b>				
Acotación : mm		Escala : 1:2	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
		<b>Viga "I" del Marco Principal</b>		Diseño: Adrian H. Oskam C.A. Estrada Gasca S.E. Higuera Alva
				<b>Plano No. 2-A</b>



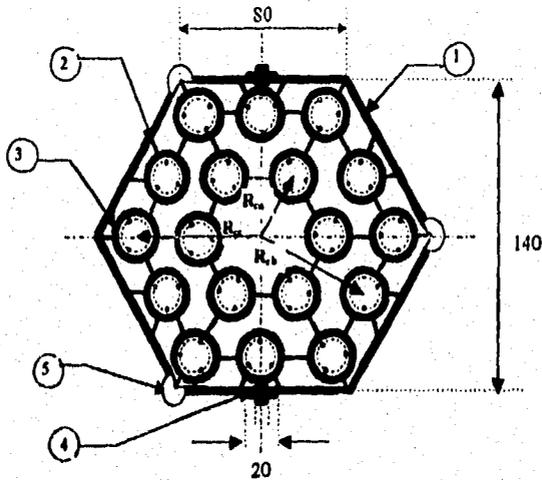
3	2	caja p/sopORTE de flecha	Lámina de acero de 3mm	
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
<b>LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM</b>				
Acotación : mm		Escala :	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
		<b>Caja para Soporte de Flecha</b>		Diseño: Adrian H. Oskam C.A. Estrada G. S. Enrique Higuera Alva
				Plano No. 2-B



4	2	Ala	Lámina de acero Cold-Rolled de 3mm de esp.	
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
<b>LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM</b>				
Acolación : cms. / mm		Escala :	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
		<b>Ala Del Marco Principal</b>		Diseño: A.H. Oskam C.A. Estrada Gasca S.E. Higuera Alva
				Plano No. 2-C



No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
5	2	Flecha del ala del Marco Principal	Barra de acero Cold-Rolled de 38 mm de diámetro exterior	
<b>LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM</b>				
Acotación : mm		Escala : 1:4	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
		<b>Flecha del Marco Principal</b>		Diseño: Adriañ H. Oskam C.A. Estrada G. S. Enrique Higuera Alva
				Piano No. 2-D



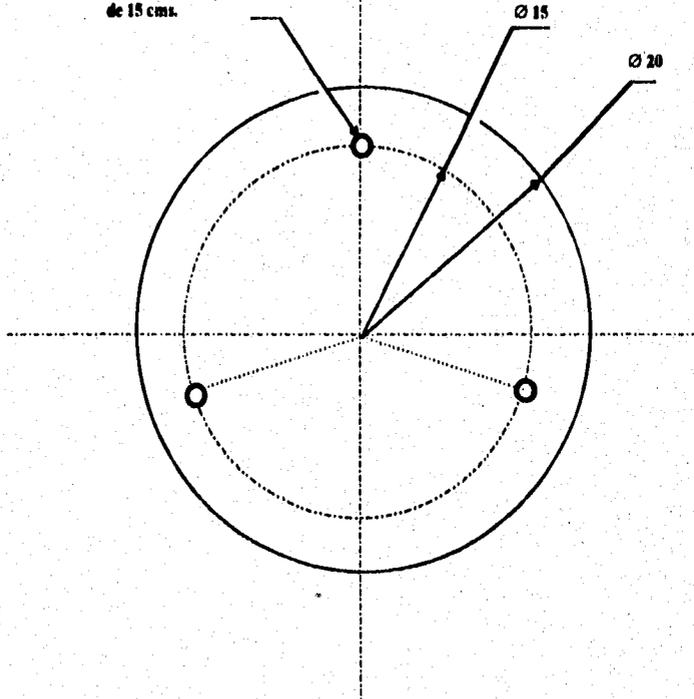
En donde:  
 $R_1 = 62.67$  cms.  
 $R_2 = 54.28$  cms.  
 $R_3 = 31$  cms.

No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
5	3	Cilindro soporte de largueros		Ver detalles en plano 3-C
4	2	Caja cilindro	Barra de acero	Ver detalles en plano 3-B
3	18	Plato Soporte	Placa de acero 3mm	Ver detalles en plano 3-A
2	42	Interconector	Perfil R-15 Acero al carbón (45x20) mm	
1	1	Marco Hexagonal	Acero al carbón, perfil R-225 (50x70) mm	

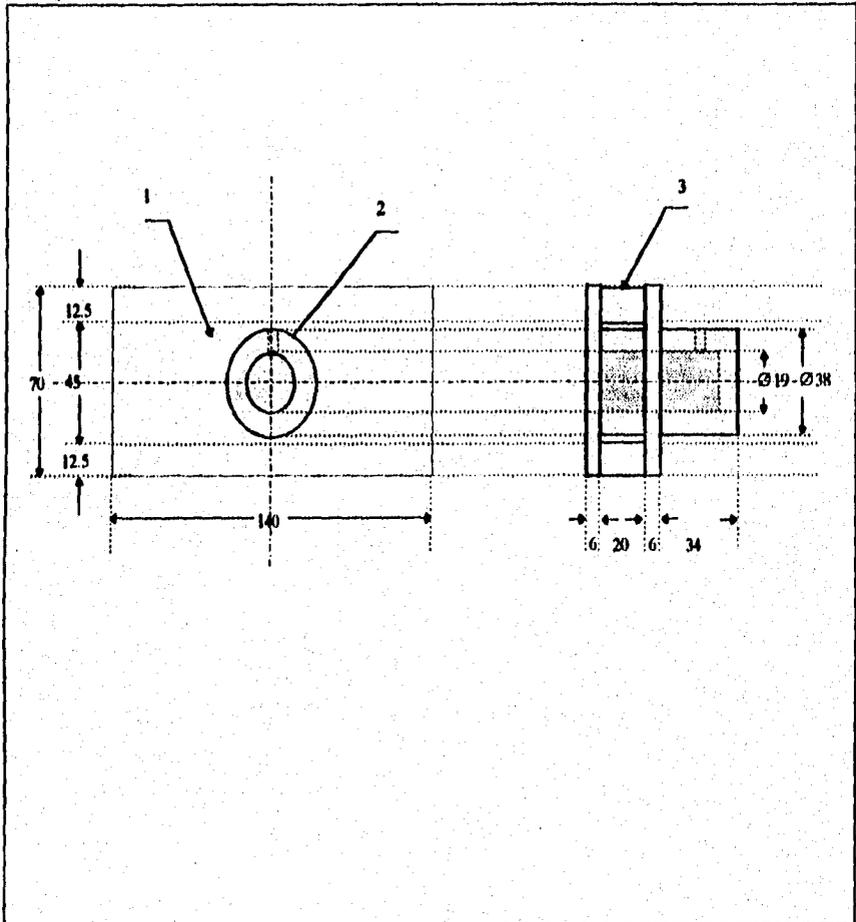
**LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM**

Acotación : cms.	Escala :	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
	<b>Sección "C" Marco Hexagonal</b>		Diseño: A.H. Oskam V. C.A. Estrada G. S. Enrique Higuera Alva
			Plano No. 3

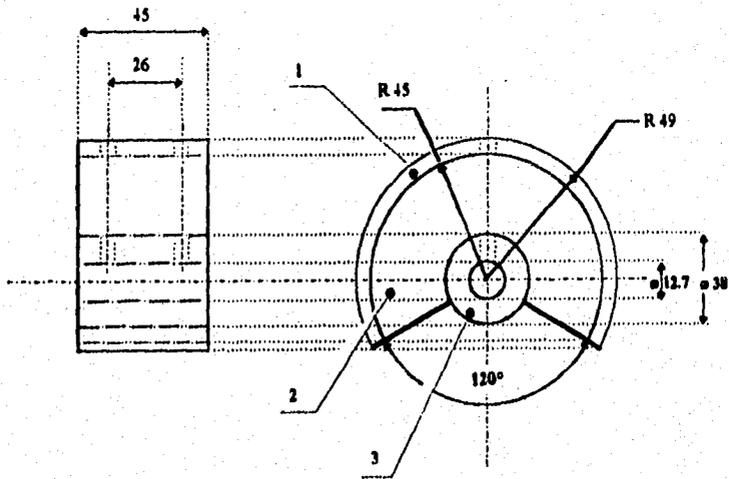
3 Agujeros pasados a 120°  
uno de otro, a un diámetro  
de 15 cms.



3	18	Plato Soporte	Placa de acero de 3mm de espesor	
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
<b>LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM</b>				
Acotación : cms.		Escala : 1:2	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
		Plato Soporte de Espejos		Diseño: Adrian Oskam C.A. Estrada G. S. Enrique Higuera A.
				Plano No. 3-A



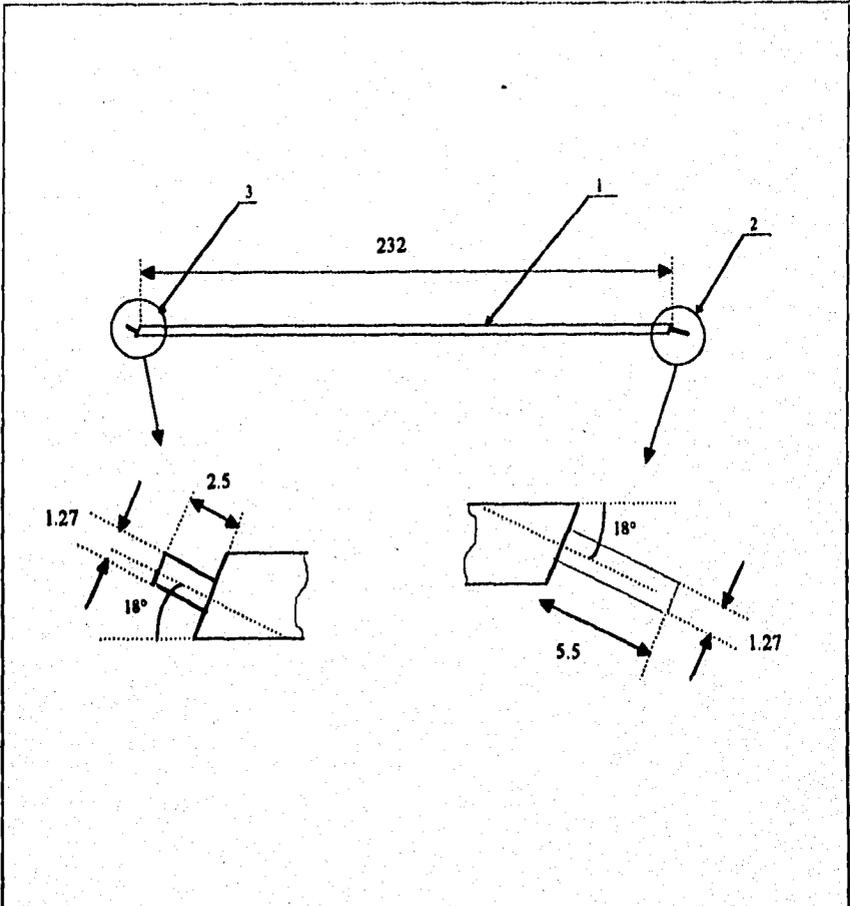
3	4	Placa superior e inferior	Placa de acero de 12 mm de espesor	
2	2	Cilindro para el eje		
1	4	Placa lateral		
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
<b>LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM</b>				
Acotación : mm		Escala : 1:2	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
		<b>Caja para Soporte de Flecha del Marco Hexagonal</b>		Diseño: Adrian H. Oskam C.A. Estrada G. S. Enrique Higuera Alva
				Plano No. 3-B



No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
3	3	Cilindro interno	Barra de Acero 38 mm de diámetro x 45 mm de largo	Perforar a 12.7 mm de diámetro interior
2	6	Tapa superior e inferior de la caja	Placa de acero de 4mm de espesor	Cortar al radio y angulo mostrados
1	3	Pared del soporte	Placa de acero de 4mm de espesor	Doblado en forma circular con el radio indicado

**LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM**

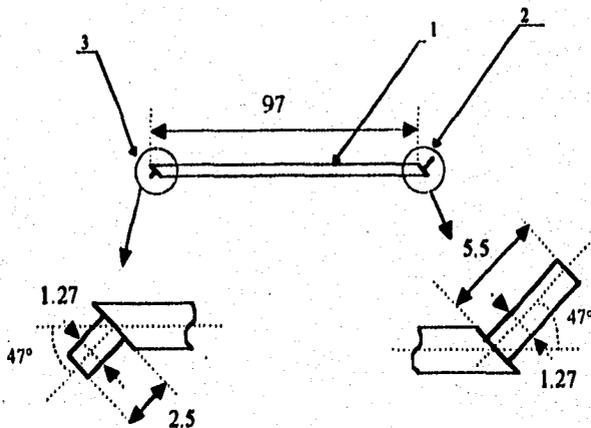
Acotación : 1:1	Escala :	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
		<b>Cilindro Soporte de Largueros del Marco Hexagonal</b>	Diseñó: Adrian H. Oskam C. A. Estrada G. <b>S.E. Higuera Aya</b> Plano No. 3-C



3	3	Barra Inferior	Barra de Acero 12.7mm de diámetro	Longitud 25mm
2	3	Barra Superior	Barra de Acero 12.7mm de diámetro	Longitud 55mm
1	3	Larguero Superior		
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones

**LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM**

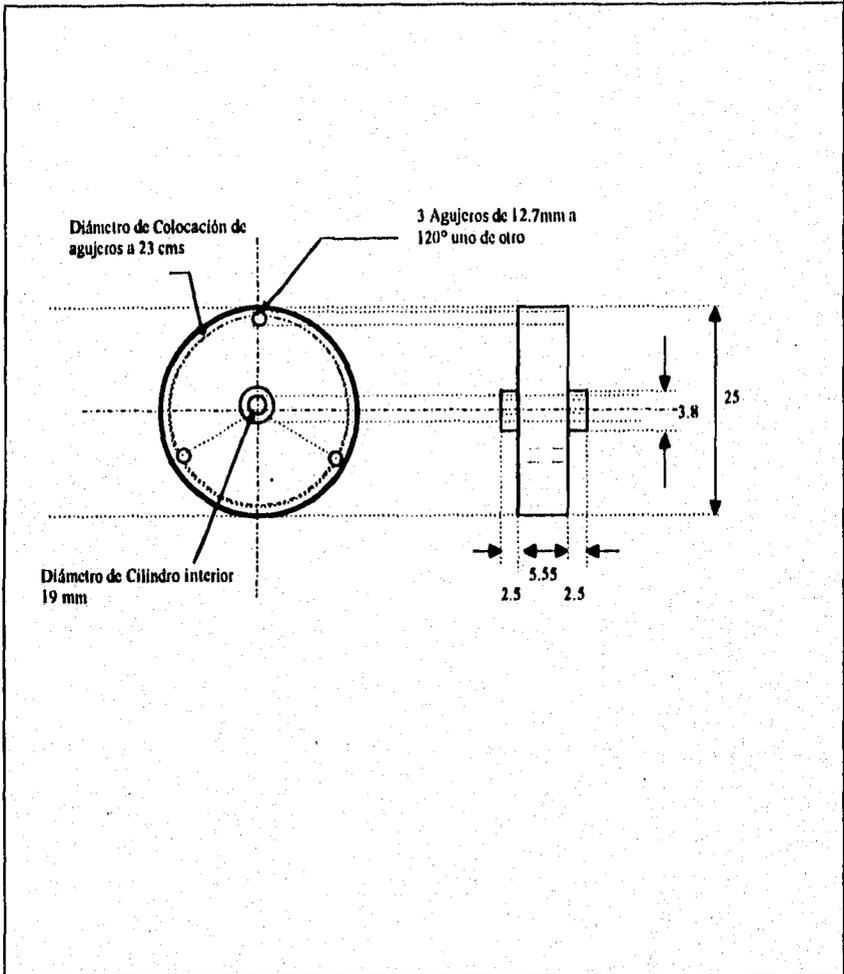
Acotación : cms.	Escala : 1:2	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A. Diseño: A.H. Oskant V. C.A. Estrada Gasca S.E. Higuera Alva Plano No.4
Largueros Superiores.			



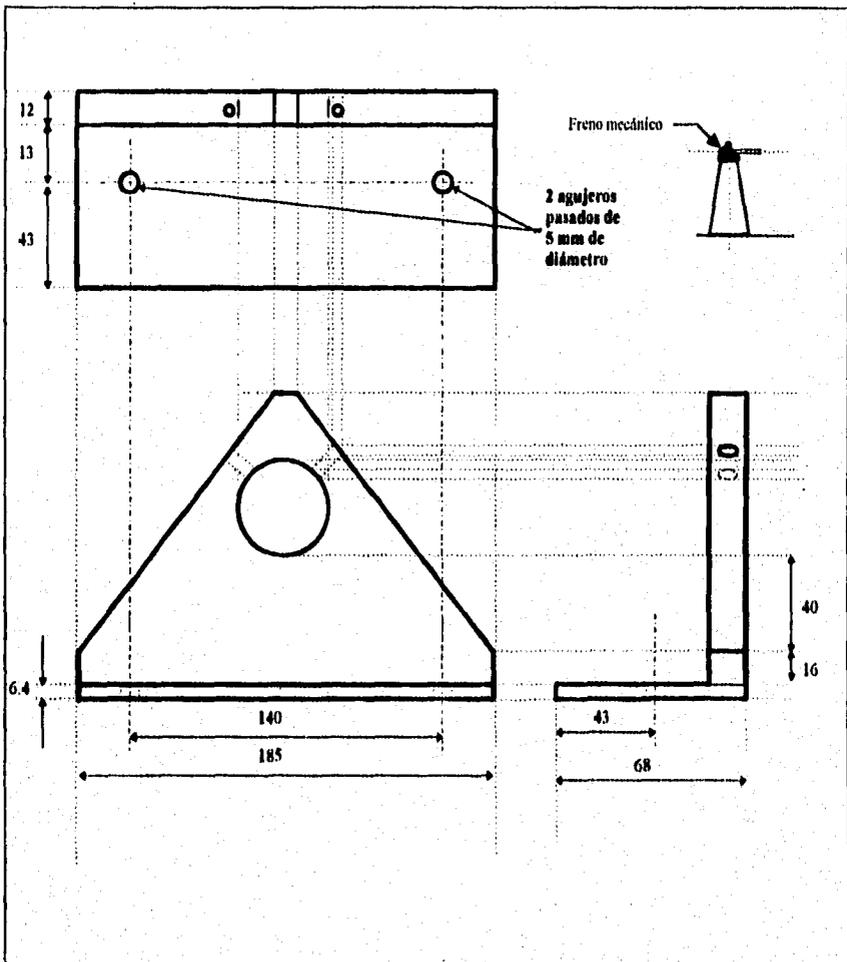
3	3	Barra Superior	Barra de Acero de 12.7mm de diámetro	Longitud 25mm
2	3	Barra Inferior	Barra de Acero de 12.7mm de diámetro	Longitud 55 mm
1	3	Larguero Inferior		
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones

**LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM**

Acotación : cms.	Escala :	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A. Diseño: A.H. Oskam V. C.A. Estrada Gasca S.E. Higuera Alva Plano No. 5
<b>Larguero Inferior</b>			



1	2	Cilindro Soporte	Lámina de acero Cold-Rolled y barra de acero	
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones
<b>LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM</b>				
Acotación : cms.		Escala :	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Iiguera A.
		<b>Cilindro Soporte del Recibidor y Contrapesos</b>		Diseño: A.H. Oskam V. C.A. Estrada Gasca S.E. Higuera Alva
				piano No. 6



3	1	Freno	Placa de acero de 1/2"	
No.	Cantidad	Designación	Material	Observaciones

**LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR - IIM - UNAM**

Acotación : mm.	Escala : 1:2	Fecha:	Dibujó: Sergio Enrique Higuera A.
-----------------	--------------	--------	-----------------------------------

	<b>Freno del eje del Marco Principal</b>	Diseño: A.H. Okam V C.A. Estrada Casas S.E. Higuera Alva
		Plano No. 7

**"IMPRENTA RANGEL"**  
**Portal Sto. Domingo 12.**  
**Tel. 521 67 98.**