CONCENTRADORES SOLARES TIPO CANAL PARABOLICA

JOSE ALBERTO VALDES PALACIOS

TESIS

Presentada a la División de Estudios de
Posgrado de la
FACULTAD DE INGENIERIA
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
como requisito para obtener
el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA
(MECANICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA Septiembre de 1986

INDICE

1. INTRODUCCION

El desarrollo que ha tenido en los últimos años la tecnología de conversión de la energía radiante del sol a energía mecánica o eléctrica ofrece posibilidades para la generación solar de potencia. Existe además un interés muy particular en pequeñas plantas generadoras de potencia (del orden de 10 a 20 KW) para utilizarlas en regiones áridas y marginadas, donde la energía solar representa un recurso energético potencialmente útil y donde la energía convencional no tiene acceso.

Los sistemas térmicos que operan con energía solar tienen como componente fundamental al colector solar, el cual capta la radiación solar y la transforma en calor útil para la generación. El colector puede diseñarse para entregar energía al sistema dentro de un amplio rango de temperatura.

Los captadores planos son los más sencillos, pudiéndose obtener temperaturas que van de algunos grados arriba de la temperatura ambiente hasta otras del orden de 100°C. En esta clase se encuentran los colectores planos para calentamiento de agua o aire, los lagos solares y los destiladores solares de agua.

Los dispositivos que aumentan la intensidad solar sobre una superficie absorbente, la cual recibiría solamente el flujo solar debido a su apertura, se llaman concentradores. La concentración de la radiaicón solar se logra mediante dispositivos ópticos que reflejan o refractan la radiación solar de manera que concentran el flujo incidente sobre un absorbedor de área menor que la de apertura; obteniéndose así temperaturas que van de 200 a 300°C para concentradores tipo canal parabólico, hasta otras del orden de 1000°C para los sistemas de torre central.

Entre los concentradores con seguimiento del sol, el más común es el llamado de tipo canal parabólica, este dispositivo ocupa un solo eje para seguir al sol. Dado que el tamaño del sol es finíto, el límite máximo para la razón de concentración de estos colectores es de aproximadamente 200, aunque en la práctica se emplean razones de concentración no mayores de 35 dada la dificultad de mejorar la calidad óptico-geométrica del concentrador durante el proceso de fabricación del mismo.

Existen varias plantas en el mundo a nivel prototipo que emplean colectores tipo canal parabólica para generar calor para procesos de potencia. Entre los paises que más han desarrollado estos sistemas se pueden citar a los Estados Unidos, Francia , Kuwait, Japon e Israel.

En el panorama nacional, uno de los proyectos de mayor envergadura que se han realizado en este campo , es la Planta Solar Experimental , Construida por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Naciónal Autónoma de México. Esta se abastece de energía por medio de un campo de 16 módulos de concentradores tipo canal parabólica, con un área total de captación de 552 m^2 y fúe diseñada para generar de 10 a 15 KW eléctricos.

Una de las principales características de esta planta es que su construcción fue realizada con alta integración de materiales y tecnología nacionales. Esto dió origen a la creación y formación de grupos de investigación que atacaron diferentes aspectos específicos del sistema. Se puede decir que a la fecha se cuenta con amplia experiencia en el campo.

Los concentradores tipo canal parabólica operan únicamente con la componente directa de la radiación solar, y por tal motivo es necesario conocer la disponibilidad de dicha componente; para el efecto se cuenta a la fecha con técnicas muy sofisticadas en países desarrollados {18}, sin embargo, en un país como México es necesario emplear modelos semiempíricos desarrollados por varios autores para diferentes latitudes {1,11,14 ,19,27,28,35}, y adaptarlos para la localidad requerida. En los capítulos 2 y 3 de este trabajo se dan una serie de relaciones geométricas útiles para la radiación solar y se analizan los métodos más comunmente empleados para su evaluación. Se discute también sobre la interpretación de las relaciónes básicas para estimar la radiación extraterrestre enfatizando los conceptos de irradiación e irradiancia.

En el capítulo 4 se presentan las componentes fundamentales de un concentrador tipo canal parabólica, se describen los principios ópticos relacionados con su funcionamiento y se evalúan las propiedades ópticas físicas de los materiales más comunmente empleados para su fabricación.

El problema de establecer una correlación cuantitativa entre los defectos de curvatura del concentrador y la radiacíon interceptada por el receptor, se ataca en el capítulo 5; en este capítulo se desarrolla la teoría de la concentración y se presentan resultados de concentradores evaluados, siendo estos los construidos en el Instituto de Ingeniería.

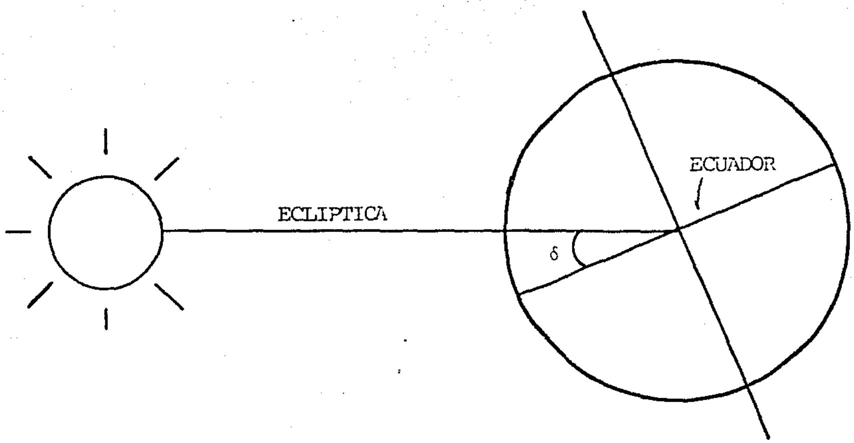
En el capítulo 6 se presenta el desarrollo de un modelo matemático de un receptor sin envolvente de vidrio y se analiza la sensibilidad que tiene el concentrador con respecto a la variación de ciertos parámetros ambientales y de diseño. También se presenta un modelo matemático tradicional {33} de un receptor con envolvente de vidrio y se presentan los resultados con el fin de conceptualizar el funcionamiento térmico de estos concentradores.

Finalmente, en el capítulo 7 se describe la forma de fabricar un molde que sirva para fabricar concentradores, y se detallan las técnicas empleadas para obtener superficies reflejantes sobre las estructuras de los concentradores.

2 RELACIONES GEOMETRICAS UTILES EN LA ENERGIA SOLAR

Para un observador situado en un punto sobre la superficie terrestre el sol se mueve sobre una superficie esférica imaginaria llamada la bóveda celeste, esta bóveda por definición deberá tener su centro en el punto de observación. Este movimiento virtual del sol es producto de la combinación de dos movimientos, el de rotación y el de traslación de la tierra, el primero tiene un período de 24 horas y es el causante de los fenómenos del día y la noche, mientras el segundo, con un período de 365.25 días, es el causante de la presencia de las diferentes estaciones del año.

Como se sabe, la tierra gira en torno a su eje geográfico, el cual tiene una inclinación de 23.5° con respecto a la normal del plano de la eclíptica; si se toma como referencia el plano del ecuador se observará que el sol, a lo largo del año, se mueve del hemisferio norte hacia el hemisferio sur alternativamente; alcanza una altura angular máxima de 23.5 para el hemisferio norte y una mínima de -23.5° para el hemisferio sur. A esta altura angular, (ángulo entre los rayos solares y el plano del ecuador) se le denomina declinación. En la figura2.1 se muestra ésta.



Fig,2.1.Definición geométrica de la declinación, comprendida en el intervalo[-23.5 , 23.5]

Como se puede observar en la figura anterior, el valor de la declinación depende de la posición que tenga la tierra con respecto al sol, es decir, depende del día del año. Cooper [20]desarrolló una fórmula semiempírica para calcular el valor de la declinación δ.

$$\delta = 23.45 \text{ sen } [360 \frac{284 + n}{365}]$$

donde n = día del año.

Cuando el plano del ecuador coincide con el plano de la eclíptica, o sea cuando $\delta=0$, se produce el fenómeno conocido como equinoccio, esta palabra significa que la noche dura el mismo tiempo que el día en cualquier parte del mundo. Cuando alcanza un valor extremo (-23.5, 23.5) se produce un solsticio. En la fig.2.2se ilustran estas definiciones.

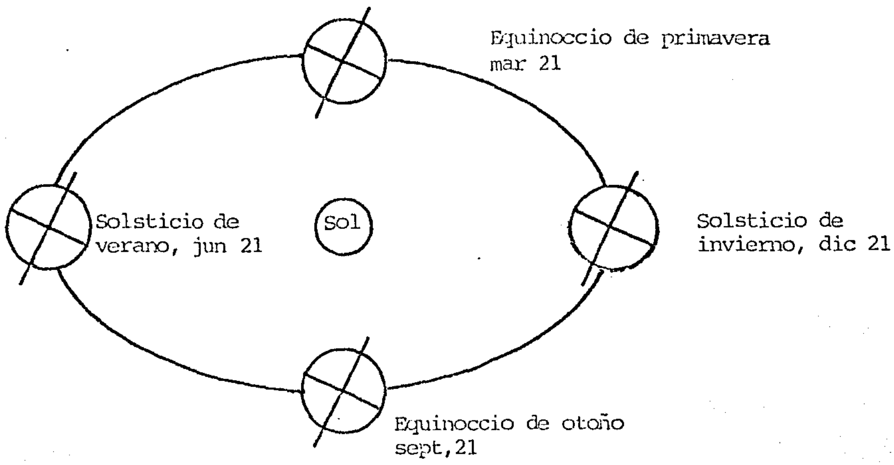


Fig 2.2 Posición de la tierra con respecto al sol para cuatro fechas características

Frecuentemente es más conveniente referir la altura angular del sol a un plano horizontal local. El ángulo formado por la línea que une a los centros de la tierra y el sol, y el plano horizontal local se le denomina altura solar α_s.

Otro ángulo de interés es el azimuth solar γ_s, este ángulo se forma por la proyección de la línea tierra-sol sobre el plano horizontal local y el eje geográfico norte sur. En la Fig 2.3 se ilustran la altura solar y el azimuth solar.

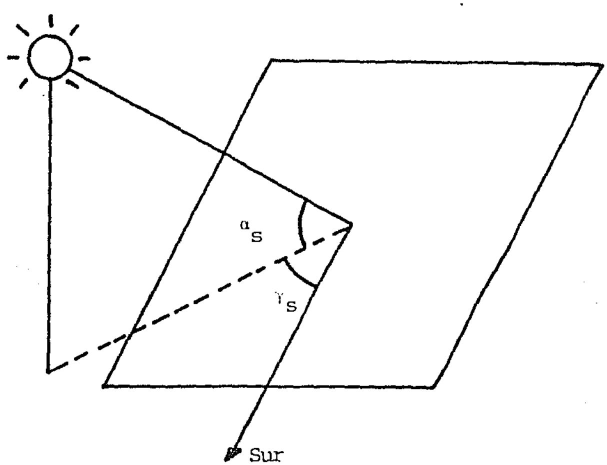


Fig 2.3 Altura y azimuth solares. La altura solar será positiva si el sol se encuentra sobre el plano horizontal. El azimuth solar, positivo al este y negativo al oeste

Para definir la posición del plano horizontal local sobre un punto de la superficie terrestre basta con conocer la latitud y longitud de dicho punto. La latitud ϕ es el ángulo que forman la línea que une al centro de la tierra con el punto de interés y el plano del ecuador.

La longitud ó meridiano local está referida al meridiano de Greenwich (0° de longitud). Existe la convención de que la tierra se encuentra dividida en 24 meridianos, los cuales están separados cada uno de ellos por un ángu lo de 15°. Positivo hacia el oeste a partir del meridiano de Greenwich. En la Fig.2.4se ilustran la latitud y la longitud.

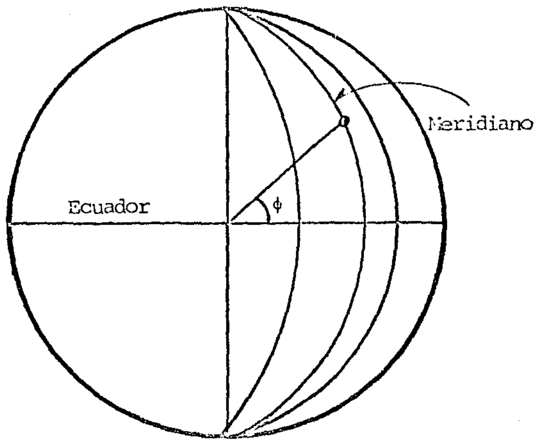


Fig2.4 Latitud y meridiano local. Latitud positiva al norte y negativa al sur

La tierra tiene un período de rotación de 24 horas, es decir al girar 360 grados en este tiempo, se explica fácilmente el porque de la separación de 15 grados de los meridianos. Este hecho da origen a otro ángulo de interés, el ángulo horario w; este ángulo vale cero si el sol se encuentra en el meri diano local y se incrementa 15° de longitud para cada hora, siendo positivo para las mañanas y negativo para las tardes.

En base a los parámetros definidos anteriormente se puede calcular la posi ción del sol sobre el plano horizontal local mediante las siguientes relaciones {35}

$$\text{sen}\,\alpha = \text{sen}\,\phi\ \text{sen}\,\delta + \cos\phi\ \cos\delta\ \cos\omega \qquad (2.1)$$

$$\text{sen}\,\gamma_s = \frac{\cos\delta}{\cos\alpha}\ \text{sen}\,\omega \qquad (2.2)$$

Estas relaciones permiten conocer con precisión la posición del sol con respecto al plano horizontal; este hecho constituye una herramienta muy útil para la operación de los concentradores solares, ya que estos dispositivos trabajan en su gran mayoría con la componente directa de la radiación solar por lo que es necesario que sigan el movimiento aparente del sol.

El ángulo de incidencia es el ángulo formado entre la normal de la superficie irradiada y una línea colinear con los rayos solares. La figura 2.5 muestra el ángulo de incidencia para una superficie arbitrariamente orientada con respecto al plano horizontal local.

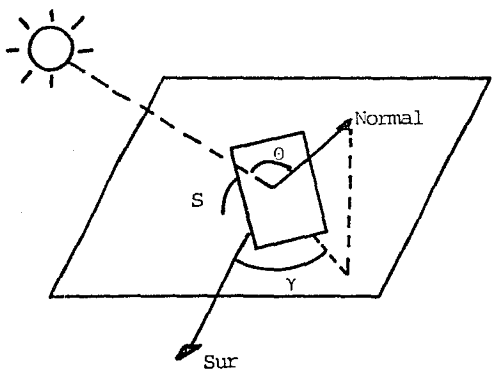


Fig 2.5 Angulo de incidencia de la radiación solar directa con respecto a la normal de la superficie captadora.

Como se puede apreciar en la figura anterior la orientación de la superficie queda totalmente determinada si se conocen su inclinación S, y su azimuth γ donde:

S = ángulo formado por la superficie y el plano horizontal local, positivo hacia el sur, negativo al norte.

γ = ángulo formado entre la proyección de la normal a la superficie sobre el plano horizontal y el sur geográfico se considera positivo al Este.

Conviene hacer un resumen acerca de los ángulos definidos hasta este momento.

declinación	define la posición del sol con respecto al plano del ecuador.
altura solar azimuth solar	definen la posición del sol sobre el horizonte para un punto dado sobre la superficie terrestre.
latitud longitud	definen la posición de una superficie captadora sobre la tierra.
inclinación azimuth	definen la orientación de la superficie captadora
ángulo de incidencia	define la dirección de la radiación solar directa con respecto a la normal de la superficie captadora.

Benford y Bock {7} desarrollaron en base a relaciones trigonométricas para triángulos esféricos, una ecuación para calcular el ángulo de incidencia en función de δ, ϕ, ω; γ y S.

$$\cos \Theta = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi \cos s - \operatorname{sen} \delta \cos \phi \operatorname{sen} s \cos \gamma$$
$$+ \cos \delta \cos \phi \cos s \cos \omega$$
$$+ \cos \delta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} s \cos \gamma \cos \omega \tag{2.3}$$
$$+ \cos \delta \operatorname{sen} s \operatorname{sen} \gamma \operatorname{sen} \omega.$$

Existen casos especiales para las que la ecuación (2.3) se puede simplificar. A continuación se mencionan algunos de ellos:

i) Para una superficie captadora horizontal, $s=0$ y $\gamma=0$

$$\cos \Theta = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \tag{2.4}$$

en este caso se puede definir un parámetro adicional, el ángulo zenital, formado por los rayos solares y la vertical local, en este caso colinear con la normal a la superficie.

ii) Para una superficie inclinada hacia el sur, $\gamma=0$

$$\cos \Theta = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi \cos s - \operatorname{sen} \delta \cos \phi \operatorname{sen} s + \cos \delta \cos \phi$$
$$\cos s \cos \omega + \cos \delta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} s \cos \omega \tag{2.5}$$

iii) Para la hora del amanecer, $s=0$, $\gamma=0$ y $\Theta=90$

$$\cos \omega_s = - \tan \phi \tan \delta \tag{2.6}$$

iv) Para la longitud del día

$$Ld = 2 \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \text{ en grados}$$
$$Ld = \frac{2}{15} \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \text{ en horas} \tag{2.7}$$

De particular importancia en este trabajo son las orientaciones que deben tener los sistemas de concentración, que como se sabe, operan fundamentalmente con la componente directa de la radiación solar, y la mayoría de ellos requieren del seguimiento contínuo del sol.

En los sistemas de enfoque puntual (paraboloides de revolución) se requiere que el rayo solar sea perpendicular a su plano de apertura, de tal forma que el seguimiento para un paraboloide se necesitan dos grados de libertad. En este caso el azimuth de la superficie debe coincidir con el azimuth solar (2.2) y la altura solar se calcula mediante (2.1).

Otra forma de calcular la orientación de un paraboloide es mediante la ecuación (2.3). Dadas la declinación, la latitud y la hora, la ecuación (2.3) se puede expresar como:

$$\cos \Theta = A \cos s - B \operatorname{sen} s \cos \gamma + C \cos s + D \operatorname{sen} s \cos \gamma + E \operatorname{sen} s \operatorname{sen} \gamma \qquad (2.8)$$

donde $A = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi$

$B = \operatorname{sen} \delta \cos \phi$

$C = \cos \delta \cos \phi \cos \omega$

$D = \cos \delta \operatorname{sen} \phi \cos \omega$

$E = \cos \delta \operatorname{sen} \omega$

La ecuación (2.8) se puede expresar como $\cos \Theta = \Gamma(S,\gamma)$; para que el seguimiento sea preciso se requiere que la radiación incida normalmente al plano de captación, es decir $\cos \Theta = 1$, nótese que 1 es el máximo valor que puede alcanzar $\Gamma(S,\gamma)$. Los valores de S y γ para los que Γ es máxima se encuentran mediante:

$$\frac{\delta \Gamma}{\delta S} = 0 \qquad ; \qquad \frac{\delta \Gamma}{\delta \gamma} = 0 \tag{2.9}$$

efectuando la derivación:

$$\frac{\delta \Gamma}{\delta S} = -A \operatorname{sen} S - B \cos S \cos \gamma - C \operatorname{sen} S + D \cos S \cos \gamma + E \cos S \operatorname{sen} \gamma = 0 \tag{2.10}$$

$$\frac{\delta \Gamma}{\delta \gamma} = B \operatorname{sen} S \operatorname{sen} \gamma - D \operatorname{sen} S \operatorname{sen} \gamma + E \operatorname{sen} S \cos \gamma = 0 \tag{2.11}$$

de (2.11) para $\operatorname{sen} S \neq 0$ se tiene

$$B \operatorname{sen} \gamma - D \operatorname{sen} \gamma + E \cos \gamma = 0$$

$$(B-D) \operatorname{sen} \gamma = -E \cos \gamma$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{E}{D-B}\right) \tag{2.12}$$

Sustituyendo (2.12) en (2.10) se encuentra finalmente S.

El seguimiento sobre un solo grado de libertad (un solo eje) se emplea para los sistemas de concentración del tipo cilíndricos. El eje puede ser horizontal Este-Oeste, Norte-Sur. También, monturas polares que emplean un eje Norte Sur inclinado hacia el frente con un ángulo igual a la declinación.

i) Este-Oeste horizontal.

$$\cos \Theta = (1-\cos^2 \alpha \, \mathrm{sen}^2 \, \gamma s)^{1/2} \qquad (2.13)$$

ii) Norte-Sur Horizontal.

$$\cos \Theta = (1-\cos^2 \alpha \cos^2 \gamma s)^{1/2} \qquad (2.14)$$

iii) Polar o Ecuatorial

$$\cos \Theta = \cos \delta \qquad (2.15)$$

Estos tipos de seguimientos serán discutidos en secciones posteriores.

El ángulo horario que se ha definido está referido al meridiano local, o sea que cuando el sol está contenido en el plano del meridiano local $w=0$, equivalente al medio día solar. De hecho todas las relaciones desarrolladas hasta este momento están basadas en el tiempo solar, el cual no coincide con el tiempo estándar local. Es necesario convertir el tiempo estándar (el que se ve en un reloj) al tiempo solar para aplicar las relaciones obtenidas.

Para hacer la conversión se deben aplicar dos correcciones:

1) Corrección por la diferencia que hay entre la longitud del meridiano local y la del meridiano en el cual está basada la hora estándar

2) Corrección debida a la ecuación del tiempo, la cual considera perturbaciones en la órbita terrestre y en la rotación que afectan el tiempo que el sol parece cruzar el meridiano del observador

La conversión se realiza mediante la siguiente relación {23}

$$\text{tiempo solar} = \text{tiempo estándar} + E + 4\,(L_{estándar} - L_{loc}) \qquad (2.16)$$

siendo E = ecuación del tiempo en minutos, se obtiene de la figura 2.6

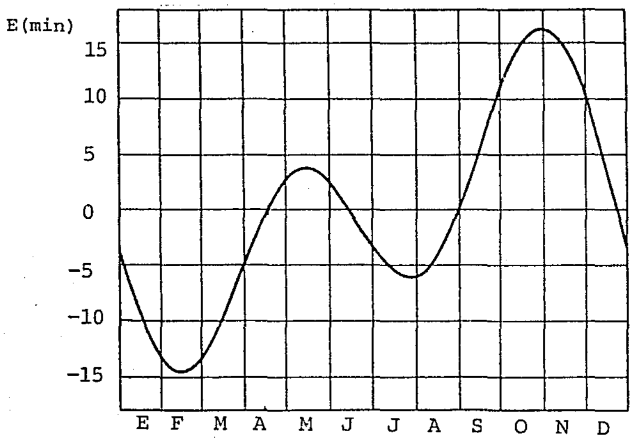


Fig 2.6 Ecuación del tiempo, aplicable para la Convesión de tiempo estándar a tiempo civil

Para la Ciudad de México donde el meridiano de referencia es 90° w y el local es de 99°w se tiene

$$\text{tiempo solar} = \text{tiempo estándar} + E - 36$$

3 DISPONIBILIDAD DE LA RADIACION DIRECTA

La necesidad de conocer la componente directa de la radiación solar sobre la superficie terrestre es de suma importancia ya que la mayoría de los sistemas de concentración operan con esta componente. Existen algunos métodos empíricos para estimar la cantidad de radiación solar total incidente sobre un plano horizontal sobre la superficie terrestre; esta cantidad es la más comunmente medida o estimada y de ella se pueden deducir las componentes directa y difusa. Ya que las cantidades directa y difusa de la radiación dependen directamente de la composición local de la atmósfera así como del microclima, es necesario contar con información meteorológica, o bien con registros estadísticos, para obtener una buena estimación de las componentes de la radiación.

Tradicionalmente se han empleado tres escalas de tiempo para estimar la radiación solar en diferentes lapsos, estas son la horaria, la diaria y la mensual. Desafortunadamente existen a la fecha algunas discrepancias entre diferentes autores {19,34,35,36} con respecto a la interpretación de las relaciones fundamentales para los cálculos, esto puede acarrear errores en la evaluación del recurso solar.

En este capítulo se deducirán las relaciones más comunmente empleadas para la estimación de la radiación solar extraterrestre y mediante sencillos análisis dimensionales se aclararán las discrepancias encontradas en la literatura. Se analizarán también los métodos más comunes para evaluar la radiación solar en la superficie terrestre.

3.1 La Constante Solar

Se denomina constante solar a la cantidad de radiación por unidad de tiempo que incide perpendicularmente en un metro cuadrado de atmósfera exterior. Esta cantidad se ve alterada a lo largo del año debido a la variación de la distancia tierra-sol ocasionado por la órbita elíptica terrestre.

La evaluación de la constante solar se puede realizar mediante la consideración de que el sol es un cuerpo negro emitiendo energía a una temperatura promedio de 5760°K. La potencia total emitida por la superficie solar será:

$$G_S = A_S \sigma T_S^4 \tag{3.1}$$

donde

A_S = área del sol = $4\pi R_S^2$

R_S = radio del sol = 6.95×10^8 M

Ts = temperatura media de emisión = 5760°K

σ = constante de Steffan-Boltzman = $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{M^2 \, °K^4}$

Para conocer el valor de la constante solar se considera que esta energía se distribuye homogéneamente en una esfera de radio igual a la distancia instantánea tierra-sol, y la cantidad de energía por metro cuadrado de esa esfera imaginaria es la constante solar para un día dado.

$$G_{sc} = \frac{Rs^2 \; \sigma \; Ts^4}{r^2} \qquad (3.2)$$

donde r = distancia instantánea tierra sol.

Como se sabe, la tierra en su movimiento de traslación alrededor del sol describe una elipse, el sol se encuentra en uno de los focos de la misma (Fig. 3.1).

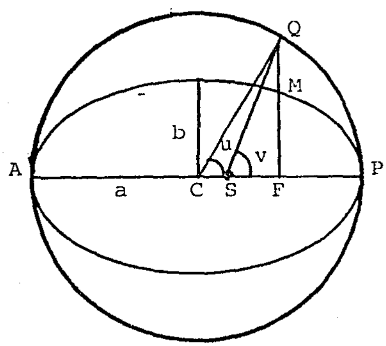


Fig 3.1 Geometría empleada para obtener la ecuación de la órbita terrestre.

La ecuación polar apra esta elípse puede deducirse fácilmente de la figura anterior {45}.

$$r = a \frac{(1 - e^2)}{(1+e \cos v)} \tag{3.3}$$

donde a = longitud del semieje mayor = 1.5×10^{11} M.

e = excentricidad de la elipse = 0.-17

v = 2 πN/365 con N = 1, - - - -, 365

r = distancia instantánea tierra-sol

tomando en cuenta que la excentricidad de la elipse es de 1.7%, ó sea e=0.017, entonces el término $(1-e^2) = 0.00071 \approx 1$. Así la distancia tierra-sol puede expresarse como:

$$r = \frac{a}{(1+e \cos v)} \tag{3.4}$$

sustituyendo (3.4) en (3.2) se obtiene:

$$G_{sc} = \frac{Rs^2 \ \sigma Ts^4 \ (1+e \cos v)^2}{a^2} \tag{3.5}$$

desarrollando el binomio cuadrado de (3.5)

$$(1+e \cos v)^2 = 1 + 2 e \cos v + e^2 \cos^2 v \tag{3.6}$$

considerando que el codominio de la función $\cos^2 v$ está en el intervalo [0,1], y mediante la observación anterior para e^2, (3.5) se transforma en:

$$G_{sc} = \frac{Rs^2\ Ts^4}{a^2}(1+2\ e\ \cos\ v) \qquad (3.7)$$

siendo

$$\frac{Rs^2\ Ts^2}{a^2} = 1367\ \frac{W}{M^2} = G_o$$

así:

$$Gsc = G_o\ \left[1+0.034\cos\ (\frac{2\ N}{365})\ \right] \qquad (3.8)$$

o bien

$$Gsc = G_o\ \left|1+0.034\cos\ (\frac{360N}{365})\right| \qquad (3.8')$$

La relación anterior dá la variación de la constante solar para cualquier día del año, con respecto a un valor calculado para una distancia media de 1.5×10^{11}m. Esta estimación es válida, según la naturaleza del cálculo, para una superficie que se encuentra perpendicular a la radiación solar y colocada fuera de la atmósfera. Cuando se desea estimar la radiación solar extraterrestre incidente en una superficie de la atmósfera exterior que se encuentra fuera del plano de la eclíptica, es necesario calcular en ángulo de incidencia de la radiación con respecto a la normal de la superficie deseada. En la figura 3.2 se muestra la geometría empleada para el cálculo.

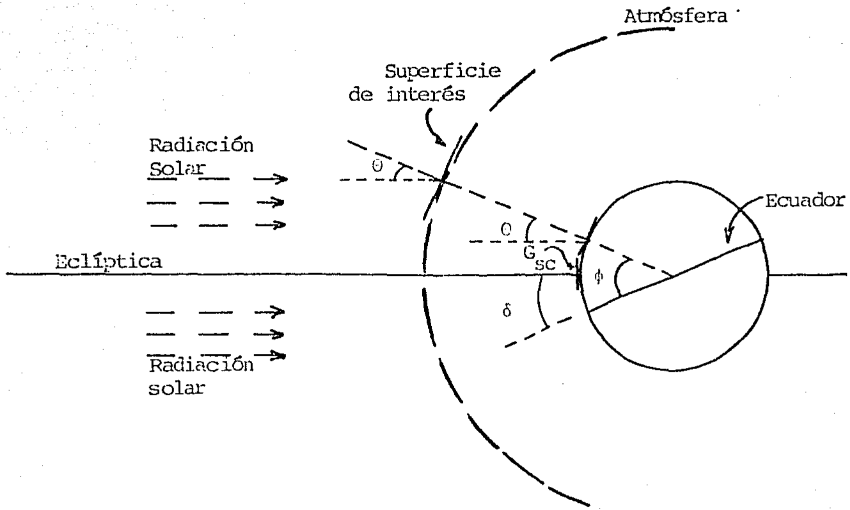


Fig 3.2 Geometría empleada para estimar la radiación extraterrestre. En este caso, dada la proporción geométrica tierra-sol, se supone que la radiación solar es paralela.

El ángulo de incidencia Θ de la radiación para una superficie situada en una región de la superficie terrestre se calcula mediante la relacion:

$$\begin{aligned}\cos\Theta = {} & \operatorname{sen}\delta \ \operatorname{sen}\phi \cos s - \operatorname{sen}\delta \cos\phi \ \operatorname{sen} s \cos\gamma \\ & + \cos\delta \ \cos\phi \cos s \cos\omega + \cos\delta \ \operatorname{sen}\phi \\ & \operatorname{sen} s \cos\gamma \cos\omega \\ & + \cos\delta \ \operatorname{sen} s \ \operatorname{sen}\gamma \ \operatorname{sen}\omega\end{aligned}$$

Evaluando esta ecuación para un plano horizontal local, $S=0$ y $\gamma=0$, se convierte en

$$\cos \Theta = \operatorname{sen}\delta \operatorname{sen}\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega$$

Nótese en la figura anterior la equivalencia de los ángulos de incidencia de los dos planos (el colocado en la tierra y el de la atmósfera exterior).

La componente de la radiación solar en la dirección perpendicular al plano de interés será:

$$G_h = G_{sc} \cos \Theta$$

$$= G_o \left[1+0.034 \cos\left(\frac{360N}{365}\right)\right]\left[\operatorname{sen}\delta \operatorname{sen}\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega\right] \qquad (3.9)$$

donde δ, ϕ y ω están en grados.

Es importante señalar que hasta este momento la constante solar en W/M^2 solamente se ha multiplicado por dos factores adimensionales y por lo tanto sus dimensiones permanecen inalteradas. A este término G_h se le puede llamar irradiancia ya que está en unidades de energía por unidad de tiempo por unidad de área, (W/M^2), y solamente puede ser expresado para un instante definido por el ángulo ω (en grados).

3.2 Radiación Extraterrestre Horaria (Irradiación Horaria)

La ecuación (3.9) dá el flujo de radiación extraterrestre instantánea incidente sobre una superficie horizontal caracterizada por la latitud ϕ, para un día N y un instante W. La ecuación (3.9) se puede integrar sobre un intervalo de una hora, alrededor del ángulo horario W, para obtener la irradiación extraterrestre $I_{o_h}(W)$ horaria. En términos generales la cantidad de irradiación incidente sobre una superficie durante un intervalo de tiempo Δt se obtiene mediante:

$$I_{o_h} = \int_{t_o}^{t_o+\Delta t} G_h(t)\, dt \qquad (3.10)$$

donde t está en unidades de tiempo.

Al sustituir (3.9) en (3.10)

$$I_{o_h} = \int_{t_o}^{t_o + \Delta t} G_o\left[1+0.034 \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \quad \operatorname{sen}\delta \operatorname{sen}\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega\right] dt \qquad (3.11)$$

Para efectuar la integración para una hora se debe observar en la ec. (3.11) que la variable ω se encuentra en unidades de grados, recuérdese que $\omega = 15°$ equivale a una hora de tiempo solar así

$$\omega\,(°) = 15(°/\,hr)\; t(hr)$$

o bien se puede expresar ω en radianes.

$$\omega\ (\text{rad}) = 15(^\circ/\text{hr})\ t(\text{hr})\ \frac{\pi(\text{rad})}{180(^\circ)}$$

así $\omega = \frac{\pi t}{12}$ en radianes, (adimensional)

Al evaluar la integral para un intervalo de una hora, se debe tomar como límite inferior media hora antes y como límite superior media hora después de la hora deseada ω_s. En radianes media hora equivale a $\pi/24$, por lo tanto la ecuación 3.11 se convierte en:

$$I_{o_h} = \int_{\omega_s \frac{-\pi}{24}}^{s+\frac{\pi}{24}} G_o e(N)\left[A+B\cos W\right]\cdot\frac{12}{\pi}\, dW \qquad (3.12)$$

donde $e(N) = 1+0.034\cos\left(\frac{360N}{365}\right)$

$A = \operatorname{sen}\delta\ \operatorname{sen}\phi$

$B = \cos\delta\ \cos\phi$

Efectuando la integración y evaluando en los límites señalados:

$$I_{o_h} = \frac{12}{\pi}\ G_o e(N)\left[A(\omega_s+\frac{\pi}{24}) + B\operatorname{sen}(\omega_s+\frac{\pi}{24}) - A(\omega_s-\frac{-\pi}{24}) - B\operatorname{sen}(\omega_s-\frac{-\pi}{24})\right]$$

$$= \frac{12}{\pi}\ G_o e(N)\left\{\frac{2\pi}{24}\ A + B\left[\operatorname{sen}(\omega_s+\frac{\pi}{24}) - \operatorname{sen}(\omega_s\frac{-\pi}{24})\right]\right\}$$

pero $\operatorname{sen}(\omega_s+\frac{\pi}{24}) = \operatorname{sen}\omega_s\cos\frac{\pi}{24} + \cos\omega_s\ \operatorname{sen}\frac{\pi}{24}$

$$\text{sen}(\omega_s \frac{-\pi}{24}) = \text{sen}\ \omega_s \cos \frac{\pi}{24} - \cos \omega_s\ \text{sen}\ \frac{\pi}{24}$$

entonces

$$B\left[\text{sen}(\omega_s + \frac{\pi}{24}) - \text{sen}\ (\omega_s \frac{\pi}{24})\right] = B\left[\text{sen}\ \omega_s \cos \frac{\pi}{24} + \cos\ \omega_s \text{sen}\ \frac{\pi}{24} - \text{sen}\ \omega_s \cos \frac{\pi}{24}\right.$$

$$\left. + \cos\ \omega_s \text{sen}\ \frac{\pi}{24}\right]$$

$$= 2B\cos\ \omega_s \text{sen}\ \frac{\pi}{24} = 0.261\ B\cos\ \omega_s$$

así $I_{oh} = \frac{12}{\pi}\ G_o e(N)\ \left[\frac{2\pi}{24} A + 0.261\ B\cos\ \omega_s\right]$

Finalmente $I_{o_h} = G_o\ e(N)\ \left[\text{sen}\phi\ \text{sen}\delta + 0.9971\ \cos\phi\ \cos\delta\ \cos\ \omega_s\right]$ (3.13)

Antes de analizar este resultado conviene revisar sus unidades. En la ecuación (3.12) se realizó un cambio de variable, donde la variable tiempo (en horas) se convirtió en radianes (adimensional) consecuentemente el factor $12/\pi$ que permanece constante durante la integración se encuentra en horas.

El factor G_o mantiene intactas sus dimensiones en W/M^2, y el término $e(N)$ es adimensional, así la ecuación 3.13 estará en W/M^2 hr., o bien multiplicando por 3600 seg/hr la ecuación anterior se expresa:

$$I_{o_h} = 3600\ G_o\ e(N)\ \left[\text{sen}\phi\ \text{sen}\delta + 0.9971\ \cos\phi\ \cos\delta\ \cos\ \omega_s\right] \quad (3.14)$$

en J/M^2 para una hora.

Para fines prácticos, el factor 0.9971 de la ecuación (3.14) se puede aproximar a 1, esto implica que el valor de la irradiancia extraterrestre en W/M^2 (ec. 3. 9) permanece constante para intervalos de una hora, caracterizados por el valor medio ω_s.

Es muy importante recalcar las consecuencias de la ecuación (3.14). Algunos textos {33,34} sugieren, para propósitos de ingeniería, calcular la irradiación total horaria extraterrestre por medio de la ecuación (3.9) evaluada en el punto medio de la hora en cuestión. Esta aseveración es falsa, ya que si bien la integración de la ecuación 3.9, que es la ec. 3.13, parece tener prácticamente el mismo valor que la anterior, sus unidades no son las mismas como se demuestra en la ec. (3.14). En otras palabras, la ec. 3.9 corresponde a un flujo instantáneo de radiación que a lo más puede valer 1367 $\pm$ 3% W/M^2. Mientras que la ecuación 3.14 a la cantidad total de radiación incidente en una hora cuyo valor máximo es (1367 $\pm$ 3%) x (3600) J/M^2. Frecuentemente se le denomina a la ec. 3.9 irradiancia, mientras que 3.14 se le llama irradiación. {31}

3.3 Radiación Extreterrestre Diaria

El análisis desarrollado en la sección anterior permite simplificar el cálculo de la radiación diaria extraterrestre, el cual dá la cantidad de energía incidente en un metro cuadrado por día (en J/M^2 día).

Ahora la ecuación (3.11) se evaluará entre los límites ω_{ss}, donde ω_{sr} es el ángulo del amanecer, y ω_{ss} el del ocaso.

$$\omega_{sr} = \cos^{-1}\left[- \tan\phi \tan\delta\right]$$

$$H_o = \int_{t_o}^{t+\Delta t} G_o\left[1+0.034 \cos\left(\frac{360N}{365}\right)\right]\left[\text{sen}\,\delta\,\text{sen}\,\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega\right]dt \qquad (3.15)$$

Efectuando el cambio de variable y sustituyendo los límites.

$$\omega = \frac{\pi(\text{rad})\ t\ (\text{hr})}{12\ (\text{hr})} \text{ en } [\text{rad}] \qquad dt = \frac{12}{\pi}\, d\omega \text{ en } |\text{hr}|$$

$$H_o = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} G_o\ e(N)\ \left[A + B \cos\omega\right] \frac{12}{\pi}\, d\omega \qquad (3.16)$$

$$= \frac{12}{\pi}\ G_o\ e(N)\ \left[A\omega + B\ \text{sen}\ \omega\right]_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}}$$

$$= \frac{12}{\pi}\ G_o\ e(N)\ \left[A(\omega_{ss} - \omega_{sr}) + B(\text{sen}\ \omega_{ss} - \text{sen}\ \omega_{sr})\right]$$

pero $\omega_{ss} = -\omega_{sr}$

$$H_o = \frac{24}{\pi}\ G_o\ e(N)\ \left[\omega_{sr}\ \text{sen}\ \phi\ \text{sen}\ \delta + \cos\phi \cos\delta\ \text{sen}\ \omega_{sr}\right] \qquad (3.17)$$

donde ω_{sr} debe estar expresado en radianes cuando no aparece como argumento de una función trigonométrica. Nótese también que en este caso las dimenciones de H_o son $\frac{W}{M^2}$ hora, al multiplicar por 3600 seg/hr se obtendrá H_o en

J/M^2 para un día cuya magnitud está caracterizada por $2\omega_{sr}$.

así

$$H_o = 3600\,\frac{(24)}{\pi}\,G_o\left[1+0.034\cos\left(\frac{360N}{365}\right)\right]\times\left[\omega_{sr}\,\mathrm{sen}\phi\,\mathrm{sen}\delta + \cos\phi\,\cos\delta\,\mathrm{sen}\,\omega_{sr}\right] \tag{3.18}$$

El ángulo ω_{sr} debe ser expresado en magnitudes positivas, ya sea en radia nes o grados, cuando aparece como argumento de una función trigonométrica.

3.4 Radiación Mensual Extraterrestre

Generalmente la radiación mensual se expresa como la radiación total para un día promedio del mes, o sea que se calcula la radiación total diaria para cada uno de los días del mes y se suman los totales, el promedio se obtiene dividiendo la suma por el total de los días del mes. Entonces la radiación mensual extreterrestre $H_{o,h}$ se evalua mediante la siguiente relación.

$$\bar{H}_{o,h} = \frac{Go}{\Delta N}\int_{N_i}^{N_f}\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}}\left[1+0.034\cos\left(\frac{360N}{365}\right)\right]\left[\mathrm{sen}\phi\,\mathrm{sen}\delta(N)+\cos\phi\,\cos\delta(N)\cos\omega(N)\right]dt\,dN \tag{3.19}$$

donde N_i, N_f = días inicial y final del mes en cuestión. Como se puede ob servar la operación anterior no es fácil de evaluar analíticamente. Sí bien la integral interior toma la forma de la ecuación (3.18), la integral exterior se complica ya que la declinación y el ángulo ω_{sr} son función del día N. A continuación se presenta (3.19) después de haber efectuado la primera inte gración

$$\bar{H}_{o,h}=3600\ \frac{(24)}{\pi}\ \frac{G_o}{\Delta N}\int_{N_i}^{N_f} 1+0.034\ \cos\ (\frac{360N}{365})x$$

$$x|\ \omega_{sr}\ \text{sen}\ \phi\ \text{sen}\ \delta + \cos\ \phi\ \cos\ \delta\ \text{sen}\ \omega_{sr}\ dN$$

(3.20)

donde $\omega_{sr} = \cos^{-1}\ (-\tan\ \phi\ \tan\delta)$

$$\delta = 23.45\ \text{sen}\ \left[360\ \frac{284 + N}{365}\right]$$

Al introducir las expresiones anteriores en (3.20) resulta un integrando demasiado complicado para manipular analíticamente, siendo necesario emplear un método numérico (el de Simpson por ejemplo) para obtener $\bar{H}_{o,h}$.

Otro método, ref{32}, para evaluar $\bar{H}_{o,h}$ es calculando la ecuación (3.18) para el día medio de el mes en cuestión. De esta forma se puede obtener un valor aproximado a $\bar{H}_{o,h}$. Las unidades de $\bar{H}_{o,h}$ serán, evidentemente J/M^2 día.

3.5 RADIACION SOLAR EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

Cuando la radiación penetra la atmósfera parte de ella es absorbida y dispersada por las diferentes partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfera. No toda la radiación dispersada se pierde, parte de ella es redirigida a la superficie terrestre en forma de radiación difusa. Esta radiación difusa debido a su naturaleza proviene de todas las partes del hemisferio que envuelve a la superficie de interés. Esta radiación debe distinguirse de la radiación térmica de la atmósfera conocida como radiación de la atmósfera que aunque también es difusa, tiene longitudes de onda mucho más grandes.

La parte de radiación que no logra ser absorbida ni dispersada por las partículas atmosféricas es la radiación directa, esta no sufre cambio de dirección en su trayectoria a través de la atmósfera. Estrictamente hablando la trayectoria de la radiación debiera cambiar al penetrar la atmósfera, ya que según la ley de Snell la radiación se debe refractar al cambiar de medio, sin embargo, los índices de refracción del aire y del vacío son prácticamente iguales.

La atenuación de la radiación directa en su paso por la atmósfera se debe fundamentalmente a 2 fenómenos: 1) La dispersión causada por las moléculas de aire, vapor de agua y polvo, y 2) La absorción de radiación por el CO_2, ozano, vapor de agua y algunas otras partículas.

Para evaluar esta atenuación, se debe considerar la masa de aire, la cual se define como la trayectoria de la radiación directa a través de la atmósfera y se representa mediante: $AM = \sec \Theta_2$. En la figura (3.3) se ilustra esta definición

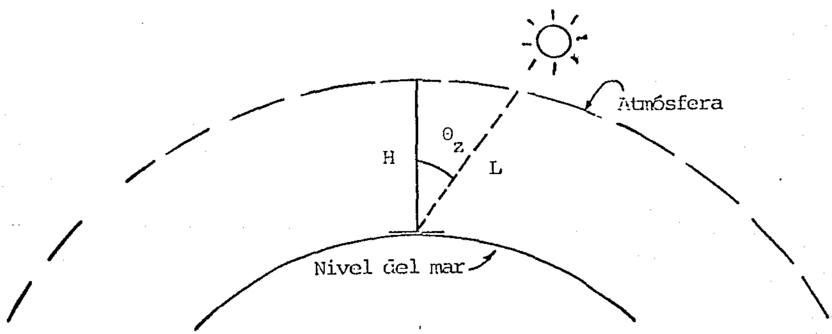


Fig 3.3 Masa de aire, el espesor de la atmósfera atravesado por la radiación solar es $L = H/\cos \Theta_z = H\sec \Theta_z$, siendo H=Espesor vertical de la atmósfera, al término $\sec \Theta_z$ se le denomina masa de aire

Para ilustrar más ampliamente este concepto supongase que se tiene una atmósfera clara, caracterizada por una altura H, a partir del nivel del mar, y un coeficiente de extinción de radiación K, el cual incluye los efectos de dispersión y absorsión de la radiación por las partículas atmosféricas. La ley de Bouger's establece que la atenuación de la radiación es proporcional a la intensidad local en el medio y la distancia recorrida por la radiación en el medio:

$$dG = G\ K\ dx \qquad (3.21)$$

donde K = coeficiente de extención, considerado constante en este ejemplo; integrando de 0 a L y de G a Go se obtiene

$$\ln \frac{Go}{G} = K\ (L-0)$$

o bien

$$G = G_o\ e^{-KL} = Go\ e^{-KH \sec \Theta_z} \qquad (3.22)$$

En la ec (3.22) se observa que $\cos \Theta_z$ interviene en la atenuación de la radiación en cuanto a que el producto $H\sec \Theta_z$ proporciona la distancia real recorrida por la radiación en la atmósfera, esta distancia será mínima cuando $\sec \Theta_z=1$, o sea $\Theta_z=0°$. La ecuación (3.22) representa la radiación directa con incidencia normal sobre la superficie terrestre. Para conocer la radiación horizontal basta con multiplicar por $\cos \Theta_z$. así:

$$G_h = G_o \cos \Theta_z\ e^{-KH/\cos \Theta_z} \qquad (3.23)$$

A G_h se le debe identificar como una disminución de la densidad de energía de la radiación debida a la proyección de la radiación normal sobre el plano horizontal. En la fig (3.4) se muestra un cilindro de radio unitario el cual contiene radiación directa con un flujo representado por F' en W/M^2.

Considérese que tal cilindro se corta oblicuamente por un plano horizontal.

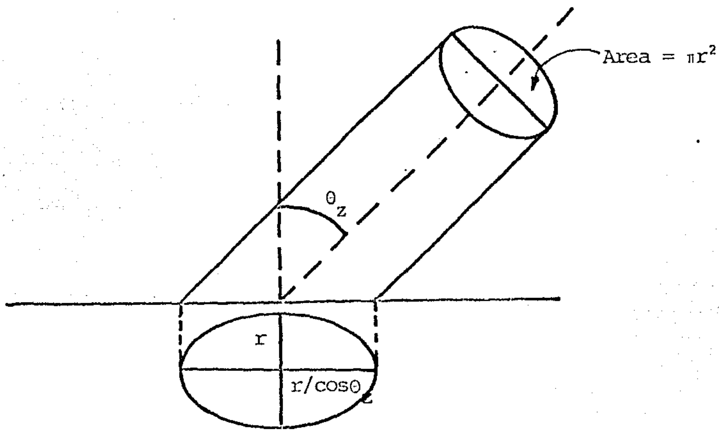


Fig (3.4) Proyección horizontal de la radiación directa normal

La proyección del corte sobre el plano es una elípse la cual tiene como semieje menor r y como semieje mayor $r/\cos\Theta_z$. La energía E distribuida originalmente en el área πr^2 se distribuirá en el área de la elipse $\pi r^2/\cos\Theta_z$ obteniéndose un flujo F", así:

$$F' = \frac{E}{\pi r^2} \quad ; \quad F'' = \frac{E}{\pi r^2/\cos\Theta_z}$$

$$F'' = F' \cos\Theta_z \qquad (3.24)$$

Se puede concluir que el factor $\cos \theta_z$ tiene un doble significado físico en la misma ecuación (3.23); a) proporciona la distancia real recorrida por la radiación en la atmósfera cuando aparece como función exponencial y b) proporciona el factor de reducción en el flujo de radiación cuando ésta incide sobre una superficie horizontal.

La ec. (3.23) representa un modelo demasiado simplificado para la obtención de la radiación directa sobre la superficie terrestre; nótese que este modelo se empleo sólo para analizar la influencia de $\cos \theta_z$. Hottel. (30) desarrolló un método para estimar la radiación directa transmitida para una atmósfera clara. Para el efecto conisderó la influencia de la masa de aire, la altura sobre el nivel del mar y varios tipos de clima. La transmitancia atmosférica para la radiación directa τ_b se da por la siguiente ecuación

$$\tau_b = \frac{Gbn}{G_o} = a_o + a_1 \; e^{-K\sec\theta_z}$$

siendo Gbn = Radiación directa normal sobre la su— de interés

G_o = Radiación normal extraterrestre

a_o, a_1, K = coeficientes que dependen de el clima y la altura

El factor que más influye en la atenuación de radiación solar en la atmósfera es la nubosidad. Debido a la gran variabilidad de esta es imposible predecir los flujos de la radiación directa y difusa en un instante dado para una localidad determinada. Por tal motivo, cualquier intento por correlacionar a la radiación directa con la difusa debe considerar promedios estadísticos los cuales se obtienen de datos experimentales tomados durante un periodo de tiempo lo suficientemente grande como para obtener correlaciones empíricas confiables.

Liu y Jordan {35} , en base a mediciones experimentales diarias de la radiación global y la difusa durante un periodo de 10 años , obtuvieron una forma empírica de correlacionar la radiación global diaria con la difusa diaria. Para tal fin definieron el parámetro de claridad atmosférica de la siguiente manera:

$$K_T = \frac{H}{Ho} \quad \text{para la radiación global} \tag{3.26}$$

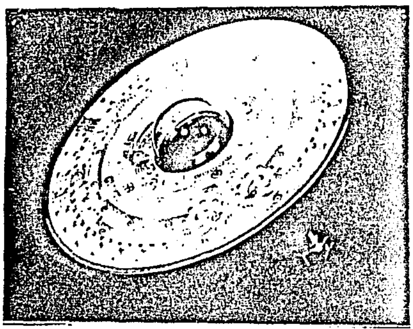
siendo H = Radiación global diaria en un plano horizontal sobre la superficie terrestre, en J/M^2

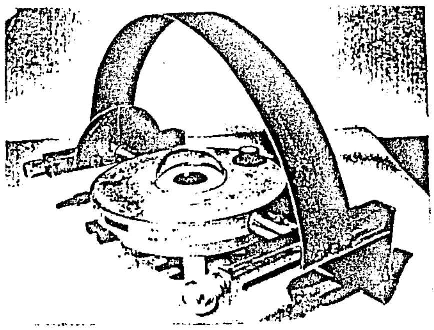
H_o = Radiación horizontal diaria extraterrestre, dada por la ec. 3.18, en J/M^2

Y para la radiación difusa $$K_d = \frac{Hd}{Ho} \tag{3.27}$$

con H_d = Radiación difusa diaria en un plano horizontal sobre la superficie terrestre, en J/M^2

El instrumental empleado por estos autores para la medición de H y Hd, consistió fundamentalmente en un piranómetro y un difusómetro respectivamente. El difusómetro consiste en un piranómetro al cual se le coloca un anillo o banda de tal forma que mantenga sombreado al sensor durante la trayectoria aparente del sol. Ln la fig 3.5 se muestran los disósitivos mencionados.





El problema de emplear un difusómetro radica en que la banda de sombra no solo cubre el disco solar sino también una cierta parte del hemisferio, y como la radiación difusa proviene de todo el hemisferio entonces la lectura obtenida de la radiación difusa es menor que la que se obtendría cubriendo sólo el disco solar.

Collares, Pereira y Rabl {19} evitaron este problema mediante el empleo de un pirheliómetro, el cual mide la componente directa de la radiación solar, de tal forma que la componente difusa para el total diario se puede obtener mediante al sencilla relación:

$$H_d = H - H_b \tag{3.28}$$

La base de datos la obtuvieron mediante la experimentación en 5 estaciones solarimétricas, en diferentes Estados de los E.U. por un espacio de aproximadamente dos años.

En la figura 3.6 se muestra una curva ajustada por Collares-Pereira y Rabl a los datos obtenidos, también se muestra la curva obtenida por Liu y Jordan.

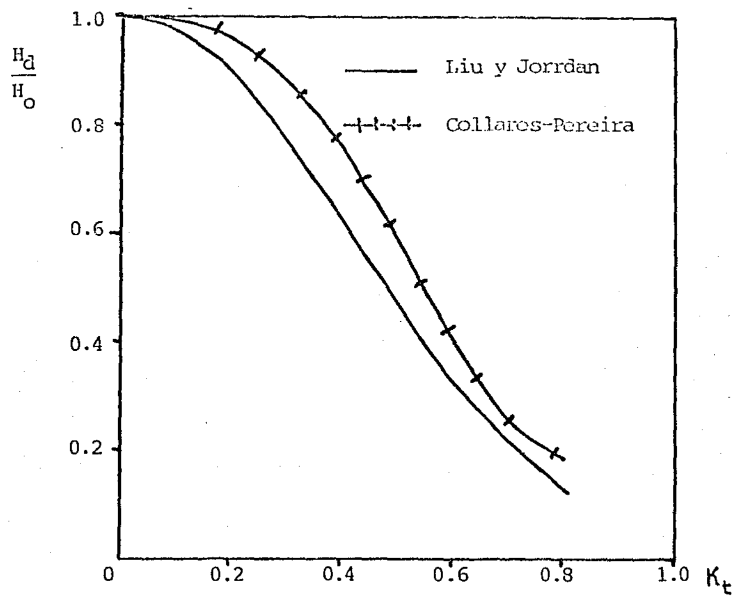


Fig 3.6 Razón de la radiación difusa diaria a la radiación total diaria como función del índice de claridad K_t.

La correlación sugerida por Collares-Pereira para este caso es:

$$\frac{Hd}{H} = \begin{cases} 0.99 & \text{para } K_T \leq 0.17 \\ =1.88-2.27K_T+9.47K_T^{\,2} & \\ -21.865K_T^{\,3}+14.68K_T^{\,4} & \text{para } 0.17 < K_T \ 2075 \\ = -0.54K_T+0.632 & \text{para } 0.75 < K_T < 0.8 \\ = 0.2 & \text{para } K_T > 0.8 \end{cases} \qquad (3.29)$$

Otros autores {17,42,43,44,49} han reportado correlaciones de Hd/H vs K_T para diferentes latitudes alrededor del mundo, estando estas en el intervalo existente entre la de Liu y Jordan y la de Collares Pereira, esto tal vez se deba más a problemas de instrumentación, tales como el de la banda de sombreo, que a la diferencia de latitudes donde fueron realizados. En países como México, donde es difícil contar con sistemas de seguimiento de sol preciso, las mediciones de la radiación difusa se han realizado mediante difusómetros con banda de sombreo{1,27,28}; por tal motivo se espera obtener resultados similares a los de Liu y Jordan. En este caso se tiene que emplear una corrección para los valores obtenidos, la cual se discute.

Coulson ref {21} ; él desarrolló un método teórico en que la suposición fundamental fue la de considerar la radiación difusa homogenea sobre todo el hemisferio. Para los difusómetros de banda el factor de corrección por el que hay que multiplicar la lectura obtenida está en el rango de (1.04, 1.24), según la latitud y la declinación

3.5.1. Radiación Solar Horaria a partir de la Total Diaria

Las ecuaciones 3.26 y 3.27 representan la razón de radiación total y difusa en la superficie terrestre a la extraterrestre respectivamente, estas relaciones son válidas para un día. Frecuentemente para diseñar se requieren de valores promedio diarios por mes de la radiación, y para tal caso se deben emplear distribuciones estadísticas de la radiación para el periodo mencionado. Por lo que en lugar de emplear H y Hd se emplean $\bar{H}$ y $\bar{H}d$, o sea valores promedio diario por mes de la radiación total y difusa, entonces las índices de claridad estarán referidos al promedio diario por mes

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{H_o} \qquad (3.30)$$

$$\bar{K}_d = \frac{\overline{Hd}}{Ho} \qquad (3.31)$$

Liu y Jordan, en su trabajo citado, econtraron que para localidades con un valor de $\bar{K}_T$ determinado la distribución de la frecuencia de ocurrencia para varios valores de K_T es la misma, aun cuando las localidades varian sustancialmente en latitud y altura sobre el nivel del mar. Esto implica que los efectos promedio de las nubes en la transmisión de la radiación se pueden caracterizar simplemente por el parámetro $\bar{K}_T$.

Whillier {54} observó que la distribución de la frecuencia de ocurrencia de $k_T = \bar{I}n/Io \cos \theta$ para la radiación horaria es muy similar a la de K_T para un valor $\bar{K}_T$ dado. Así, las curvas de distribución de K_T se pueden em plear para los índices de claridad horarias k_T.

Liu y Jordan, empleando datos de 4 años de la estación de Helsingsfors, Finlandia y de 10 años para la estación de Blue Hills, Mass. (E.U.A) agruparon las cocientes de la irradiación difusa promedio horario por mes (Idh) a la irradiación difusa promedio diaria por mes ($\bar{H}_d$), para diferentes horas a lo largo del día (9:00 - 10:00, 10:00 - 11:00, etc), y las graficaron contra el ángulo del ocaso ω_{ss} evaluado por medio de la declinación media de cada mes. Al cociente de la irradiación difusa promedio horaria por mes $\bar{I}_{dh}$ a la irradiación difusa promedio diaria por mes $\bar{H}_d$, lo denominaron:

$$r_d = \frac{\bar{I}_{dh}}{\bar{H}d} \qquad (3.32)$$

La distribución mostrada por los puntos experimentales puede ser caracterizada con bastante exactitud mediante la relación r_d=Ion/Ho, esto se explica mediante las observaciones de los mismos autores y de Whillier. Es decir, si se iguala el índice promedio de claridad horaria con el promedio de claridad diaria, ambas para la radiación difusa:

$$\bar{k}_d = \bar{K}_d = \frac{\bar{I}_{dh}}{I_{oh}} = \frac{\bar{H}}{H_o} \qquad (3.33)$$

Combinando 3.31, 3.32 y 3.33 se obtiene:

$$r_d = \frac{I_{oh}}{H_o} \qquad (3.34)$$

Conviene aclarar que hasta este momento se ha trabajado sólo con irradiaciones, por tal motivo K_T, K_a, $\bar{K}_T$ y r_d son adimensionales.

En el antiguo sistema inglés la unidad de potencia esta en BTU/hr por tal motivo surge la ambigüedad en las refs {19,33,34,35} en relación a los coeficientes mencionados, sobre todo para los periodos horarios, ya que el valor de la constante solar en este sistema es de 442 BTU/hr sqft lo cual puede confundirse con una irradiación; en cambio en el sistema internacional la constante solar vale 1368 W/m^2 lo que representa una irradiación y no se presta a la confusión anterior. En la referencia{35} la irradiación difusa horaria promedio se iguala con una irradiancia promedio de la radiación difusa evaluado en la media hora de la hora en cuestión y por tal motivo se obtienen irradiancias en BTU/hr sqft. Este punto ya ha sido discutido en secciones anteriores.

El factor r_d se puede expresar por medio de las ecuaciones 3.14 y 3.18 :

$$r_d = \frac{\bar{I}_{dh}}{\bar{H}_d} = \frac{\pi}{24} \frac{\text{sen}\,\phi\,\text{sen}\,\delta + 0.9971\,\cos\phi\,\cos\delta\,\cos\omega_s}{\omega_{ss}\,\text{sen}\,\phi\,\text{sen}\,\delta + \cos\phi\,\cos\delta\,\text{sen}\,\omega_{ss}} \qquad (3.35)$$

empleando $\cos\omega_{ss} = \dfrac{-\text{sen}\,\phi\,\text{sen}\,\delta}{\cos\phi\,\cos\delta}$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{-\cos\phi\,\cos\delta\,\cos\omega_{ss} + 0.9971\,\cos\phi\,\cos\delta\,\cos\omega_s}{-\omega_{ss}\,\cos\phi\,\cos\delta\,\cos\omega_{ss} + \cos\phi\,\cos\delta\,\text{sen}\,\omega_{ss}}$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{0.9971\,\cos\omega_s - \cos\omega_{ss}}{\text{sen}\,\omega_{ss} - \omega_{ss}\,\cos\omega_{ss}} \qquad (3.36)$$

donde ω_s es la hora media del periodo en cuestión, por ejemplo, para la radiación entre las 10 y 11 AM ω_s=-22.5º esto significa que ω_s se refiere a las 10:30 AM.

Collares-Pereira y Rabl (op.cit), y Lunde {36} , introducen un error conceptual al interpretar la ec 3.36, este consiste en considerar que el 24 en el denominador corresponde a las 24 horas de duración del día. Para aclarar esta interpretación erronea basta con revisar el desarrollo para obtener Ioh y Ho en este trabajo, y recalcar que los límites de integración para Ho son precisamente las de horas del alba, ω_{sr}, y el ocaso, ω_{ss}, y no de 0 a 24 como sugieren los autores citados.

Mediante la ecuación 3.36 se puede evaluar la irradiación difusa promedio horaria por mes, para una hora dada por ω_s, en base a la irradiación difusa promedio diaria por mes $\bar{H}d$ la cual se obtiene mediante {19} :

$$\frac{\bar{H}d}{\bar{H}} = 0.775 + 0.347(\omega_{ss}-\pi/2) - \left|0.505 + 0.261(\omega_{ss}-\pi/2\right| \cos \left|2(\bar{K}_T-0.9)\right| \qquad (3.37)$$

Para conocer la irradiación total promedio horario por mes $\bar{I}_h$ en función de la irradiación total promedio por mes $\bar{H}$, se puede emplear con bastante confiabilidad {19} :

$$\frac{\bar{I}_h}{\bar{H}} = r_d\ (a+b \cos \omega_s) \qquad (3.38)$$

donde $a = 0.409 + 0.5016\ \text{sen}(\omega_{ss} - 1.047)$

$$b = 0.6609 - 0.4767\ \text{sen}(\omega_{ss} - 1.047) \qquad (3.39)$$

con ω_{ss} en radianes.

Una vez conocidas las cantidades horarias $\bar{I}_h$ e $\bar{I}_{dh}$ se puede calcular fácilmente la irradiación directa horizontal promedio horaria por mes $\bar{I}_{bh}$.

$$\bar{I}_{bh} = \bar{I}_h - \bar{I}_{dh} \qquad (3.40)$$

Las unidades de $\bar{I}_{bh}$ son obviamente J/M^2, o sea que $\bar{I}_{bh}$ representa el valor de $\bar{G}_{bh}$ en W/M^2 integrado para una hora, al dividir $\bar{I}_{bh}$ por 3600 seg. se puede obtener el valor de la intensidad promedio de la radiación directa en W/M^2.

3.5.2 Estimación de la radiación directa instantánea para superficies en movimiento.

Para las superficies de captación que requieren estar continuamente orientados hacia el sol, como en el caso de la mayoría de los concentradores se requiere evaluar la cantidad de radiación directa instantánea incidente. Esto se puede lograr mediante la obtención del parámetro $\bar{K}_T$ para la localidad en cuestión.

El procedimiento es el siguiente:

1) Obtener el valor de la irradiación total horizontal promedio diaria por mes $\bar{H}$, por medio de cortografía, o bien, experimentalmente

2) Evaluar Ho para el dia medio del mes requerido y calcular $\bar{K}_T=\bar{H}/H_o$

3) Obtener la irradiación difusa promedio diaria por mes, $\bar{H}_d$, a partir de 3.37.

4) Calcular $\bar{I}_{dh}$ e $\bar{I}_h$ a partir de 3.36 y 3.38 respectivamente estas cantidades representan irradiaciones promedio horarias por mes para la radiación difusa y total respectivamente

5) Obtener la irradiación directa horizontal promedio horaria por mes $\bar{I}_{bh}=\bar{I}_h-\bar{I}_{dh}$

6) Determinar la irradiación directa normal promedio horaria por mes $\bar{I}_b=\bar{I}_{bh}/\cos\Theta_z$, $(=\bar{I}_{bh}/\operatorname{sen}\alpha)$ evaluando Θ_z en la hora media de la hora en cuestión

7) Determinar la irradiación directa horaria en la superficie de captación a partir de la irradiación directa normal. Al dividir el valor obtenido por 3600 se obtiene intensidad de la radiación directa promedio en una hora incidente en la superficie de captación.

A continuación se muestran los niveles de radiación directa disponible para una superficie horizontal, una superficie con seguimiento norte-sur, y seguimiento este-oeste, se presentan las curvas para los estados de Sonora y D.F.

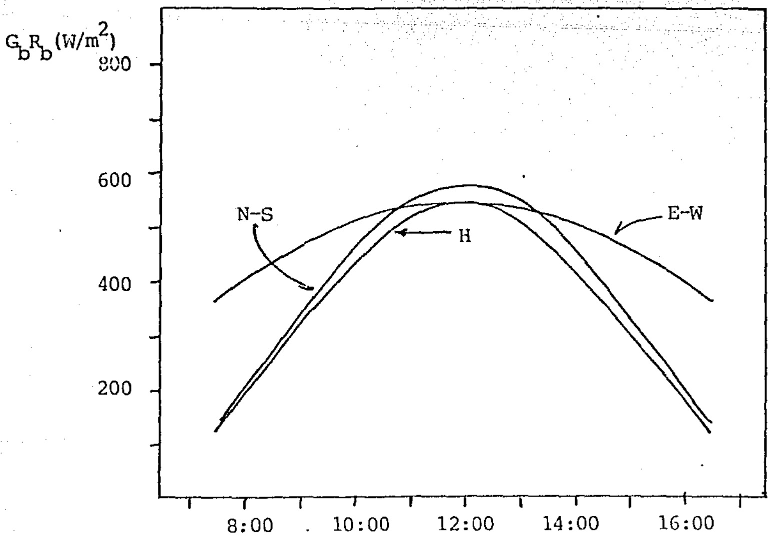


Fig 3.7 Radiación solar directa proyectada en el área de captación de un concentrador tipo canal parabólica ubicado en la ciudad de México el mes de marzo. N-S significa seguimiento norte-sur, y E-W seguimiento este-oeste. H superficie horizontal.

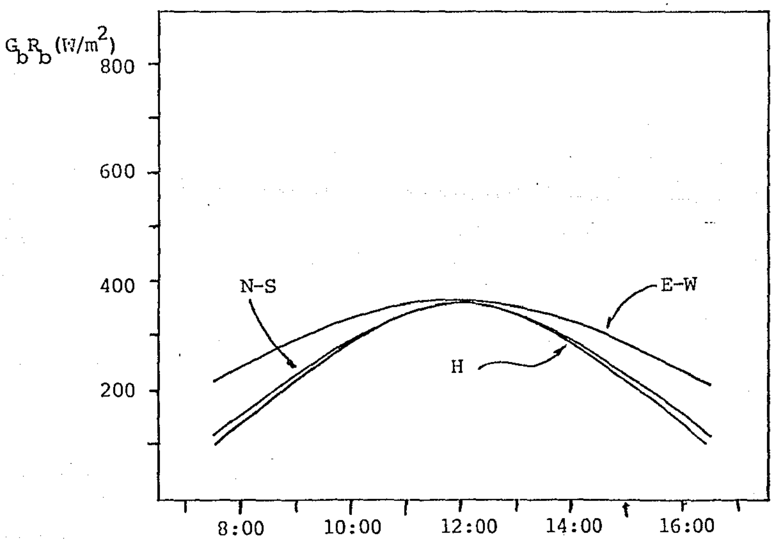


Fig 3.8 México, D.F. mes de junio

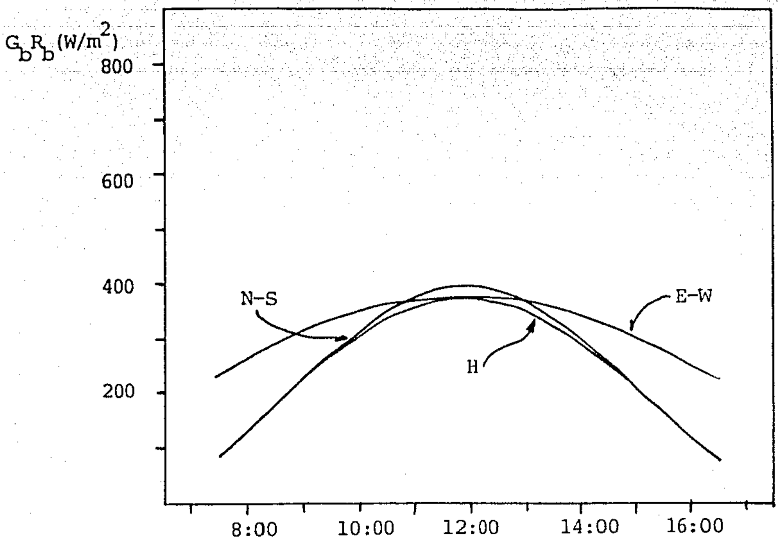


Fig 3.9 México D.F. mes de septiembre

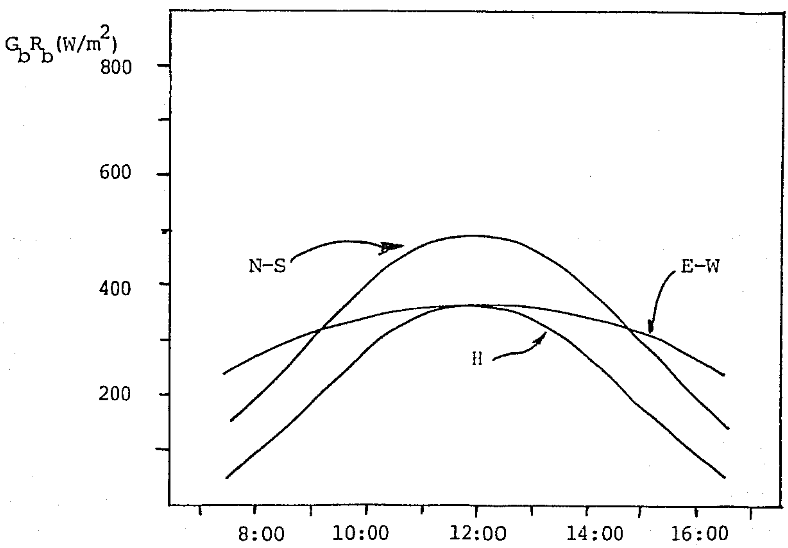


Fig 3.10 México, D.F. mes de diciembre

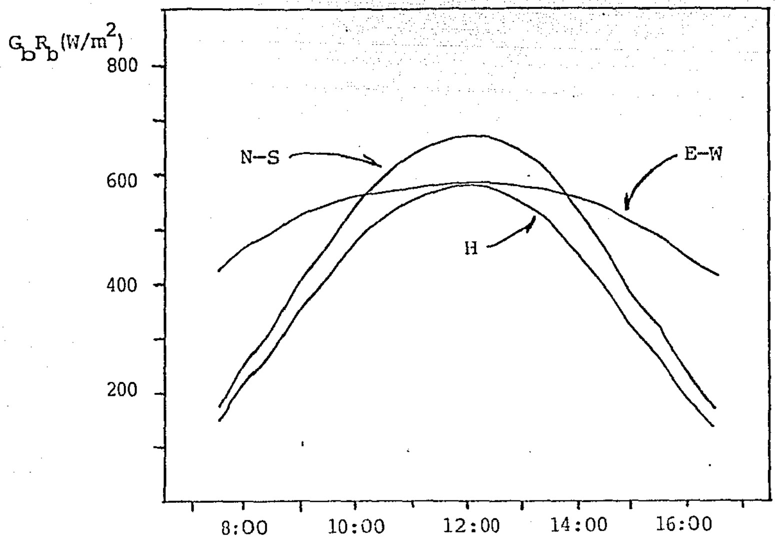


Fig 3.11 Hermosillo, Son. mes de marzo

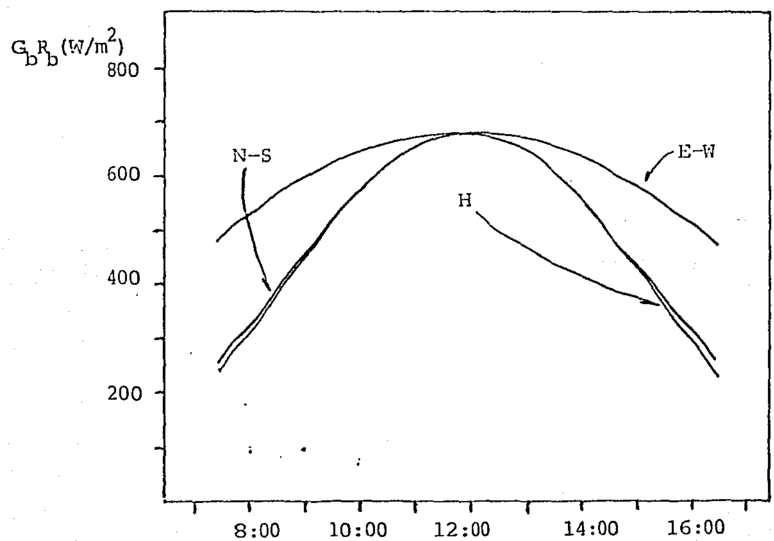


Fig 3.12 Hermosillo Son. mes de junio

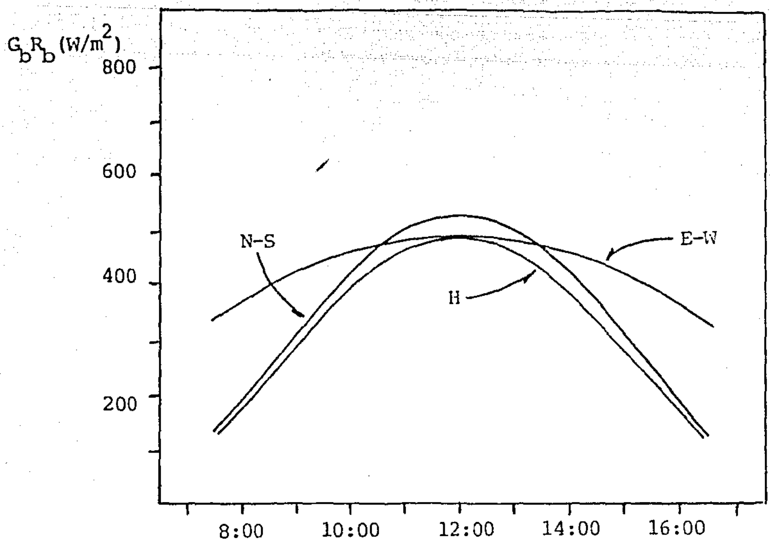


Fig 3.13 Hermosillo, Son. mes de septiembre

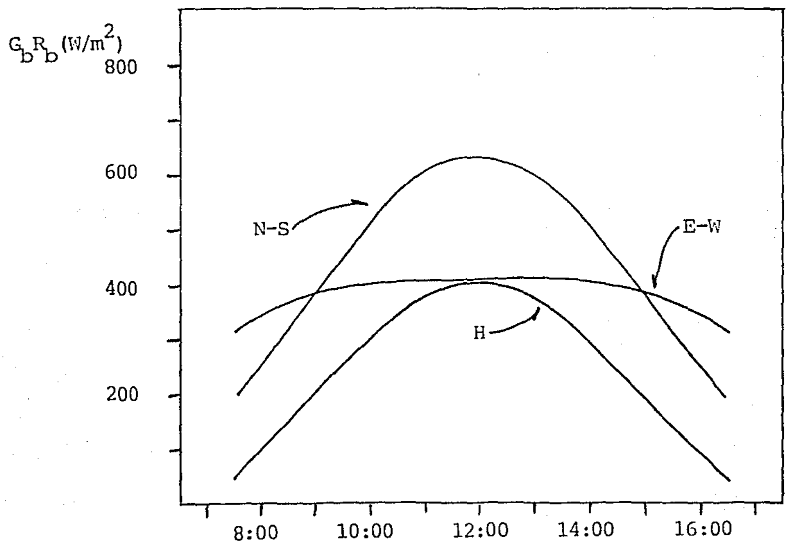


Fig 3.14 Hermosillo, Son. mes de diciembre.

4 OPTICA DE CONCENTRADORES TIPO CANAL PARABOLICA

El colector solar que abastece de energía a un sistema, realiza la función de transferir la energía radiante a un fluído u otro medio de trabajo. El flujo de radiación incidente en un colector en la superficie terrestre es en el mejor de los casos 1000 W/m^2. Para estos flujos tan bajos, las pérdidas térmicas de la superficie absorbedora de energía limitan la temperatura de operación. En los sistemas colectores de enfoque, la energía se concentra por medio de un sistema óptico a través de un espejo o una lente para aumentar el flujo radiante sobre el receptor; así se puede reducir el área del receptor y consecuentemente las pérdidas térmicas, ocasionando un aumento en la temperatura de operación del sistema. Algunas definiciones necesarias para entender los concentradores solares son: {3}

- Colector solar. Dispositivo qoe absorbe la radiación solar y transfiere su energía a un fluído

- Concentrador. Dispositivo que concentra la componente directa de la radiación solar sobre un receptor o absorbedor.

- Absorbedor. Componente de un dispositivo solar que tiene como función captar y retener la mayor cantidad de radiación solar.

- Area del absorbedor. Area que recibe la radiación concentrada.

- Area de apertura. Area del captador que intercepta la radiación solar.

- Razón de concentración. Se define como el cociente entre el área de apertura colectora y el área del absorbedor.

- Angulo de aceptancia. Amplitud de la zona angular dentro de la cual la radiación es captada por el absorbedor de un concentrador. Por ejemplo, el valor mínimo de aceptación es del orden de ½° y se debe al tamaño finito del sol, mientras que un colector plano tiene un ángulo de aceptación de 180°.

- Eje del concentrador. Linea que pasa por el foco y su vértice.

- Angulo de borde. Angulo formado por el eje de un concentrador (tipo parabólico) y la linea imaginaria que va desde su borde hasta el punto focal.

- Absortancia. Razón de la radiación solar absorbida a la radiación solar incidente.

- Absortividad. Propiedad del material que se utiliza para retener la radiación solar.

- Emitancia. Razón de la radiación emitida por la superficie de un cuerpo a la radiación emitida por un radiador perfecto (cuerpo negro) a la misma temperatura.

- Helióstato. Dispositivo que sirve para reflejar la componente directa de la radiación solar sobre un blanco fijo.

- Reflejancia. Razón de la radiación reflejada por un material a la radiación incidente sobre el mismo.

- Reflejancia especular. Reflejancia de un espejo en que el ángulo de radiación incidente es igual al ángulo de la radiación reflejada, ambos medidos con respecto a la normal a la superficie en el punto de incidencia.

- Factor de forma. Razón de la energía (radiación) incidente sobre el absorbedor a la radiación directa incidente sobre el área de apertura del concentrador.

- Trasmitancia. Razón de la energía radiante trasmitida por un material dado a la energia solar incidente.

- Eficiencia óptica de un colector. Razón de la energía absorbida por el receptor a la interceptada por el área de apertura de un concentrador ideal. Esta eficiencia depende de la reflejancia del espejo,trasmitancia de la envolvente que pueda existir sobre el absorbedor, absortividad del absorbedor, factor de forma del sistema concentrador y del ángulo de incidencia de los rayos concentrados hacia el absorbedor.

- Eficiencia de un colector. Razón del calor útil entregado por el colector solar a la energía solar incidente sobre el mismo.

4.1 Concentradores Tipo Canal Parabólica

Uno de los sistemas que más se ha desarrollado en los últimos años es el concentrador tipo canal parabólica. En general, en los sistemas que están operando actualmente, el absorbedor y el concentrador pueden o no girar simultaneamente; el objetivo principal es que exista un buen enfoque sobre el absorbedor que se encuentra a lo largo del foco de la canal parabólica. En la figura 4.1 se muestra este sistema.

Estos sistemas pueden operar con orientación N-S, E-W, o polar. Conforme su orientación, el movimiento angular necesario para seguir al sol será más lento o más rapido, por ejemplo, en el caso de estar orientado N-S, el movimiento es alrededor de 15°/h, en tanto que en orientación E-W el movimiento alrededor del mediodia (4 h antes y 4 h después) es mínimo {3} .

En la fig 4.2 se muestra la eficiencia de este tipo de concentrador según la temperatura del receptor; se observa que las pérdidas por reflexión debido a la refflejancia de los espejos es del orden del 15%; estas pérdidas no se pueden eliminar ya que técnicamente sería difícil fabricar espejos baratos con mejores características ópticas. Las pérdidas por el factor de forma son las

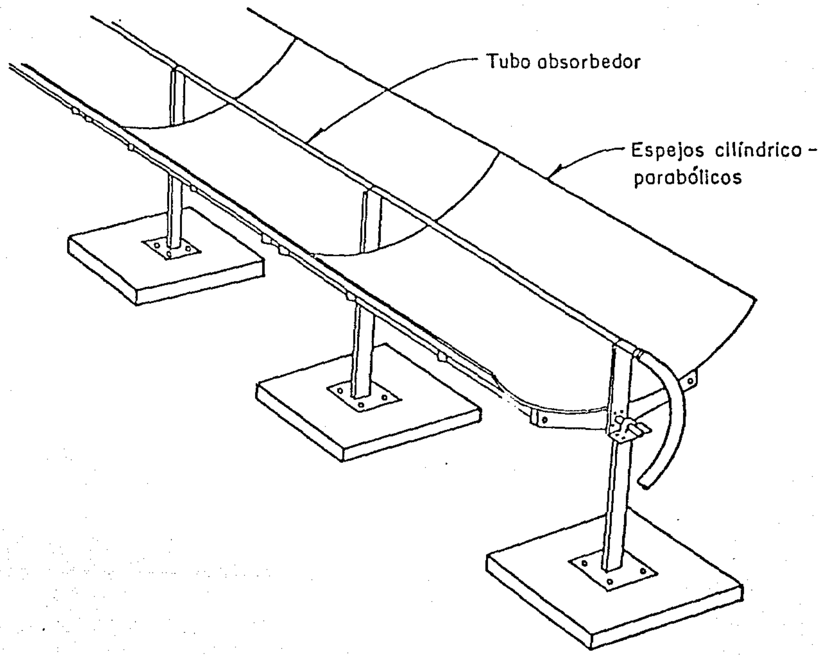


Fig 4.1 Concentrador tipo canal parabólica

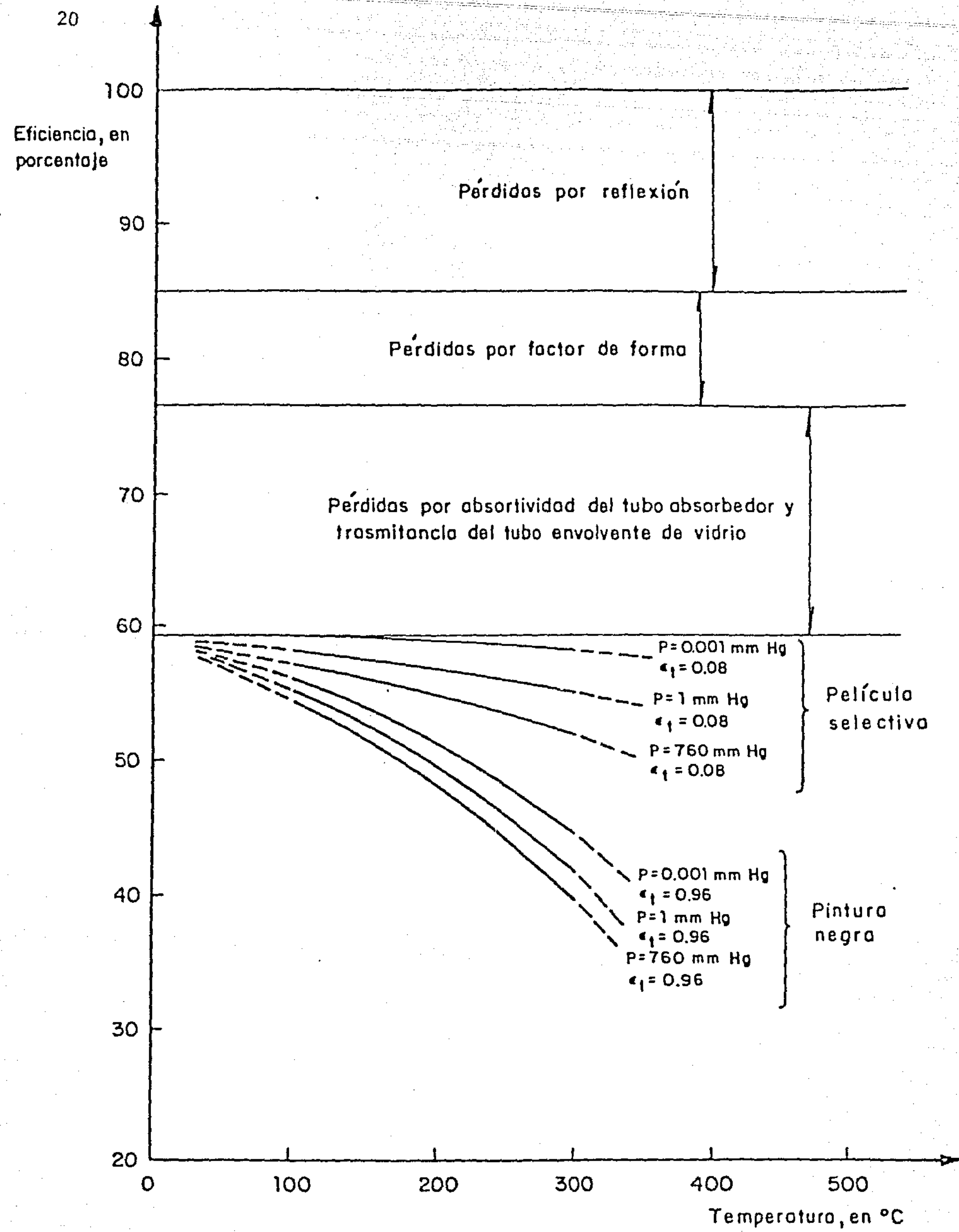


Fig 4.2 Eficiencia instantanea de un concentrador solar tipo canal parabólica

que se deben a las irregularidades de la superficie reflectora así como a su posible desorientación con respecto a los rayos solares; este factor puede empeorar al paso del tiempo si la superficie se deforma.

Un aspecto muy importante en el funcionamiento de un concentrador es el absorbedor. Como intento inicial para fijar el diámetro del absorbedor, es apropiado tratar de captar toda la energía reflejada por el espejo parabólico. El diámetro del absorbedor dependerá del tamaño angular del sol, magnitud del error cometido en el seguimiento, error de curvatura del espejo, irregularidad de la superficie reflejante y de la absortancia angular característica de la superficie receptora (fig 4.3).

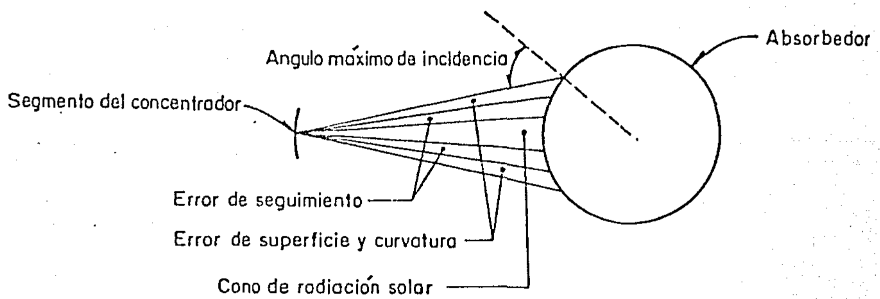


Fig 4.3 Factores que intervienen en la elección del diámetro de un absorbedor.

Para tener un receptor con el menor diámetro posible y así reducir las pérdidas térmicas, es necesario seleccionar un ángulo de borde para el espejo de tal forma que se logre minimizar la distancia máxima ($r_{máx}$) de la superficie reflejante al foco. Como se observa en la figura 4.3, el cono de radiación aumenta su sección circular conforme se incrementa la distancia reflector-receptor, ya que esta aumenta al irse alejando del foco; es por esto que se requiere minimizar la distancia reflector-receptor. Un ángulo de borde de 90° minimiza dicha distancia (fig 4.4)

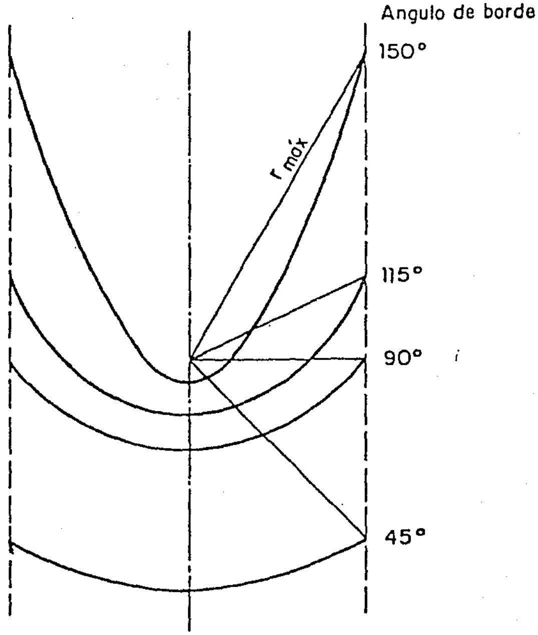


Fig 4.4 Varios ángulos de borde para una apertura fija Para un foco común y una apertura fija $r_{máx}$ es mínima a un ángulo de borde de 90°, por tanto, se requiere de un receptor de menor diámetro que para los otros ángulos de borde.

Una vez que la radiación solar llega al absorbedor, es importante sea captada en la menor medida posible, por eso es necesario cubrir el absorbedor con materiales de alta absortividad. Aunque las pinturas negras tienen esa condición, su emisividad es también muy alta, de ahí que se requieran materiales que al mismo tiempo reduzcan las pérdidas por radiación infrarroja. Los materiales que tienen alta absortividad de radiación solar y baja emisividad para la radiación infrarroja, por ejemplo, CuO, Fe_3O_4, Cr_2O_3, etc. se llaman películas selectivas {2} . En la fig 4.2 se muestra como mejora la eficiencia al usar cromo negro ($\alpha = 0.92$ y $\varepsilon = 0.08$).

Otro tipo de pérdidas importantes en estos concentradores son las debidas a la conducción y convección de calor al medio ambiente, por lo que es necesario reducirlas mediante encerrar el tubo absorbedor dentro de tubos de vidrio y bajar la presión del aire contenido en el espacio anular. En la fig 4.2 se muestra como mejora la eficiencia con la reducción de la presión.

4.2 Eficiencia Optica

Como se puede desprender de la sección anterior, la máxima eficiencia que podría alcanzar un concentrador es la eficiencia óptica o eficiencia de captación η_o, esta se define por la siguiente relación (basada en insolación directa normal al plano de apertura):

$$\eta_o = \rho_m \tau \alpha \gamma \tag{4.1}$$

donde

- ρ_m reflejancia del espejo concentrador
- τ trasmitancia de la envolvente del receptor
- α absortancia de la superficie del receptor

γ factor de forma

Todos estos parámetros son adimensionales y sus valores típicos son del orden de 0.80 a 0.95.

La reflejancia del espejo, la trasmitancia de la envolvente y la absortancia de la superficie del receptor, son parámetros ópticos físicos que dependen de los materiales empleados en la fabricación del espejo, envolvente y absorbedor respectivamente.
El factor de forma es un parámetro óptico geométrico que depende de la precisión de la curvatura del receptor, del diámetro del receptor y de la precisión del sistema de seguimiento. El problema para la evaluación de este parámetro consiste en establecer una relación cuantitativa entre la curvatura real del reflector y el error cometido en el seguimiento del sol, y la distribución de energía en la región focal real del concentrador. Este problema así como su solución serán discutidos ampliamente en el capítulo 5 de este trabajo.

4.3 Evaluación de Parámetros Opticos Físicos

La evaluación de estos parámetros requiere de equipo especializado, ya que las mediciones se tienen que realizar para radiación con longitudes de onda similares a las de la radiación solar para condiciones de masa de aire dadas.

Existen en el mercado diferentes dispositivos capáces de simular la radiación solar y medir al mismo tiempo los parámetros ópticos físicos dentro de este espectro. El Instituto de Ingeniería cuenta con un reflectómetro para espectro solar, modelo SSR de la compañía Devices and Services, así como con un emisómetro modelo AE de la misma compañia {51}.

Con el reflectómetro se han hecho pruebas de reflejancia y absortancia sobre diferentes muestras de superficies reflejantes y selectivas. En la tabla 4.1 se muestran los valores de reflejancia obtenidos para diferentes tipos de superficies reflejantes expuestas al medio ambiente en un intervalo de dos meses.

TABLA 4.1 Reflejancias obtenidas en diferentes muestras de superficies reflejantes. El subíndice 1 significa muestra nueva, 2 al primer mes, 3 al segundo.

Superficie	ρ_1	ρ_2	ρ_3
Acrílico aluminizado de 3mm de espesor sin protección posterior. 2a superficie.	0.738	0.732	0.724
Acrílico aluminizado de 3mm con protección posterior. 2a superficie.	0.738	0.728	0.721
FEK(244) Compañía 3M	0.860	0.860	0.859
Alumínio Kingston (electropulido)	0.850	0.850	0.850
Solar Film (3M)	0.91	0.860	0.841

Este reflectómetro está diseñado para medir la reflejancia solar de muestras planas. La medición se lleva a cabo iluminando hemisféricamente una muestra colocada sobre la cabeza de medición del aparato, determinando éste la cantidad de radiación reflejada a un ángulo de 20° de la normal por medio de varias combonaciones de detectores y filtros integrados al dispositivo.

Tomando en cuenta que para una superficie opaca se cumple la relación $\alpha + \rho = 1$, se puede evaluar la absortancia con el mismo aparato. En la tabla 4.2 se da una lista de algunas muestras planas probadas y los valores de absortancia obtenidos. También se reportan las emitancias obtenidas con el emisómetro AE.

TABLA 4.2 Absortancia y emitancia de algunas superficies

Superficie	α	ε^*
Selectiva. Cromo negro sobre sustrato de cobre niquelado	0.940	0.098
Selectiva. Cromo negro sobre sustrato de fierro niquelado	0.939	0.115
No selectiva. Pintura negra mate sobre sustrato de Cu.	0.915	0.920

* Basada en el espectro de emisión de un cuerpo negro a 100°C

El valor de la trasmitancia para el espectro solar del vidrio envolvente se puede evaluar por medio del reflectometro. Primero se mide la reflejancia ρ_p de una muestra de primera superficie, después se mide la reflejancia de la misma muestra pero en segunda superficie ρ_s; la trasmitancia τ se conoce por medio de $\rho_s = \rho_p \tau^2$. Para el vidrio Pyrex se encontró $\tau = 0.9$.

5 ANALISIS OPTICO GEOMETRICO DE CONCENTRADORES TIPO CANAL PARABOLICA

En un principio se puede diseñar un concentrador tipo canal parabólica con una razón de concentración determinada que dependerá del intervalo de temperatura de operación deseado. Así , para un área de captación dada existe una razón de concentración máxima debido al tamaño finíto del sol.

En la realidad es casi imposible construir un concentrador perfecto, es decir, un concentrador que enfofue toda la radiación directa que incide en su plano de apertura debido a que se cometen errores en el proceso de construcción del concentrador.

El efecto que produce un concentrador con errores en la curvatura de su estructura geométrica, es la creación de una región focal deforme o difusa, y por tanto una disminución en la energía interceptada por el receptor.

En este capítulo se desarrollará una técnica para establecer la correlación cuantitativa existente entre los errores de curvatura del concentrador y la energía interceptada por el receptor.

5.1 Determinacion del Error de Curvatura y de Superficie de un Concentrador Tipo Canal Parabólica

5.1.1 Introducción

La evaluación del error de curvatura de un concentrador tipo canal parabólica, no solamente permite obtener información para caracterizar la densidad del flujo de radiación concentrada en la región focal, si no que además permite establecer criterios de construcción de los concentradores por medio de la detección de sus zonas más defectuosas.

Anteriormente la evaluación del error de curvatura era más bien cualitativa {24}, después Evans (1972) {25} estableció un método para determinar el foco real de una parábola con imperfecciones en su curvatura por medio de un rayo laser; y hasta 1977 en los laboratorios de Sandia en Albouquerque New Mexico {12,16,38,39,40}; se estableció la metodología para encontrar un parámetro que caracterizara la calidad óptica de la superficie concentradora. A dicho parámetro se le denomina desviación estándar de los errores de curvatura, o simplemente calidad óptica.

5.1.2 Tipos de Errores

Básicamente se pueden clasificar los errores de los espejos en dos grupos;

a) Errores microscópicos: se deben a irregularidades muy pequeñas en la superficie reflectora que causan una dispersión de la imagen reflejada (fig 5.1); este efecto disminuye la reflectancia especular {23}. La fuente principal de este tipo de erorres son debidos a defectos en la construcción propia de los espejos y a la degradación de la superficie reflectora con el paso del tiempo.

b) Errores macroscópicos: son principalmente las desviaciones que sufre la curvatura de la "parábola" real, con respecto a la parábola ideal.

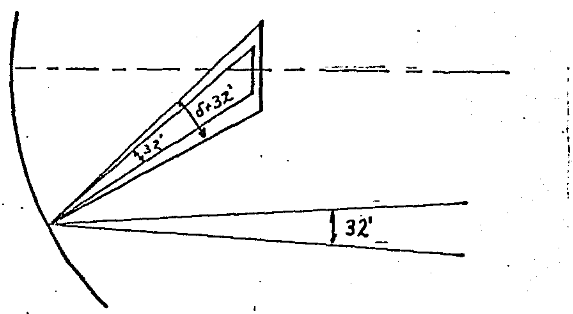


Fig 5.1. Efecto causado por un error microscópico en una porción de un concentrador. El cono reflejado muestra un ángulo de dispersión δ.

De estos dos tipos de errores los más significativos son los macroscópicos. La naturaleza de estos errores es dependiente del proceso de manufactura del concentrador, de la rigidez de la estructura del espejo y de la uniformidad de la superficie reflectante (por ejemplo imperfecciones introducidas por burbujas o granos, a los cuales les denomina "errores de superficie")

Para poder obtener cuantitativamente la magnitud de los errores de superficie y de curvatura de los espejos fabricados en el Instituto de Ingeniería, se utilizó un dispositivo que está compuesto por las siguientes partes:

a) Un rayo laser de He-Ne de 3 mW
b) Un detector de posición
c) Un sistema de adquisición de datos
d) Unos rieles para correr el laser a lo largo y a lo alto de la parábola

Una característica muy importante del detector de posición es que la respuesta a la posición del rayo incidente en el detector es independiente del diámetro de la sección circular del rayo, según datos del fabricante. Tomando en cuenta lo anterior, se puede descartar la influencia de los errores microscópicos del espejo en los cálculos de los errores de curvatura (sólo en este caso).

Los espejos que se probaron tienen una distancia focal nominal de 62.5 cm, una apertura de 250 m y una altura de 115 cm.

5.1.3 Teoría y Técnica Para la Medición de Errores

La técnica utilizada para llevar a cabo las mediciones es una adaptación a la desarrollada por Butler y Pettit {16} , que consiste en lo siguiente:

Se hace incidir el rayo laser a lo largo de la superficie reflectante, de tal forma que el rayo incidente sea perpendicular al plano de apertura del concentrador y se espera que enfoque en el foco teórico. El rayo laser se hace barrer a través de todo el concentrador (fig 5.2); las lecturas se toman a intervalos de 8.5 cm en la dirección horizontal. Una vez que se ha barrido toda la longitud del plano de apertura, se incrementa la altura en 5 cm y se repite el procedimiento hasta recorrer toda la altura del concentrador.

Las lecturas tomadas en el detector de posición corresponden a la desviación que sufre el rayo laser reflejado con respecto al punto focal de la parábola nominal.

Las ecuaciones para procesar la información adquirida por el detector se encuentran en la referencia {50} no obstante, con fines prácticos y de comprensión, se indican a continuación los pasos principales para efectuar los cálculos:

La parábola de diseño obedece a la ecuación:

$$Y = x^2/4\ f' \qquad (5.1)$$

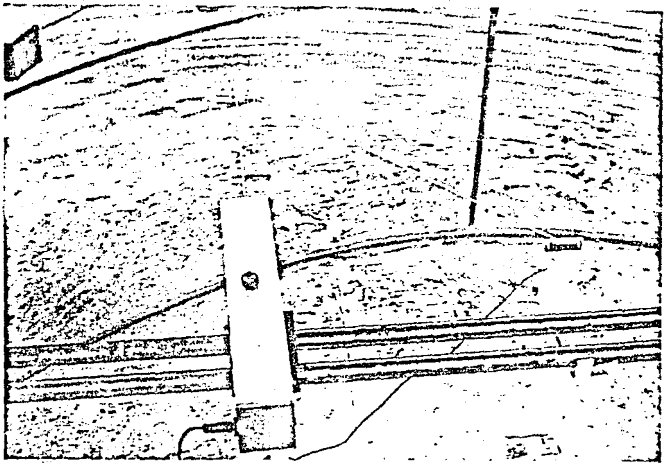


Fig 5.2 Medición de la desviación sufrida por el rayo reflejado con respecto a la reflexión en una parábola ideal.

donde

f' = longitud focal nominal

La fig 5.3 muestra la geometría usada para derivar las expresiones.

Como se observa en la fig 5.3 el rayo reflejado no incide en el punto focal nominal, debido a las imperfecciones del espejo. Conociendo el valor de x y la desviación en el detector (δ), se puede encontrar el ángulo entre el rayo incidente y el rayo reflejado mediante la siguiente relación:

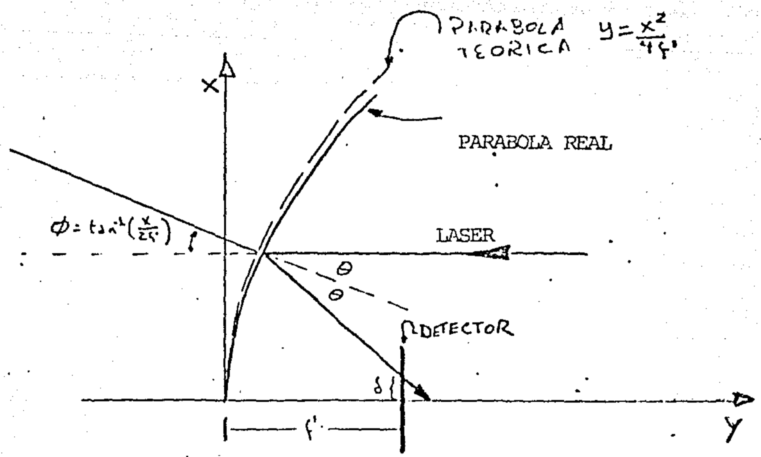


Fig 5.3 Geometría de la trayectoria del laser

$$2\theta = \tan^{-1}\left(\frac{(x-\delta)4f'}{4(f')^2 - x^2}\right) \tag{5.2}$$

La pendiente de la parábola teórica se encuentra diferenciando (5.1)

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{2f'}\right) \tag{5.3}$$

La diferencia entre θ y ϕ es el error de pendiente medido, referido a f'

$$\phi - \theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{2f'}\right) - \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\frac{(x-\delta)4f'}{4(f')^2 - x^2}\right] \tag{5.4}$$

Sin embargo el error verdadero debe estar referido a f (distancia focal real del cilindro parabólico). Una forma de determinar el verdadero error de pendiente, es calcular la distancia focal real (fi) para cada valor de x. Para continuar los cálculos se igualaron ϕ y θ en la ecuación (5.4) ajustando f' en la ecuación (5.3) y llamándola fi, así:

$$\phi - \theta = \mathrm{Tan}^{-1}\left(\frac{X}{2fi}\right) - \frac{1}{2}\,\mathrm{Tan}^{-1}\left[\frac{(x-\delta)\;4\,f'}{4(f')^2 - x^2}\right] = 0 \qquad (5.5)$$

$$fi = \frac{X}{2\,\mathrm{Tan}\left[\frac{1}{2}\,\mathrm{Tan}^{-1}\left(\frac{(x-\delta)\;4f'}{4(f')^2 - x^2}\right)\right]} \qquad (5.6)$$

Los valores de fi obtenidos para cada valor de x son promediados, obteniéndose así la distancia focal media (f) para el cilindro parabólico entero. Cuando f' es sustituida por f en la ec (5.4) , los errores $(\phi - \theta)$ son recalculados, de tal forma que ahora estarán referidos a la parábola mejor ajustada a la superficie real.

Como se observa en el desarrollo anterior, el problema que aquí aparece es que, debido a que la superficie reflectiva tiene errores, no existe físicamente una parábola exacta, y se tiene que escoger una superficie matemática (generalmente una parábola) que se acerque más a la parábola teórica y a la cual se deben referir los errores. Esta parábola se define {29} con su vértice en el vértice de la parábola teórica, y su punto focal, en el centroide de la región focal producido por la superficie real (fig 5.4).

5.1.4 Pruebas y Mediciones

Las pruebas se llevaron a cabo sobre un piso completamente liso y nivelado que se mandó construir especialmente para éste objetivo; en esta superficie se trazó un sistema de coordenadas, así como una parábola con

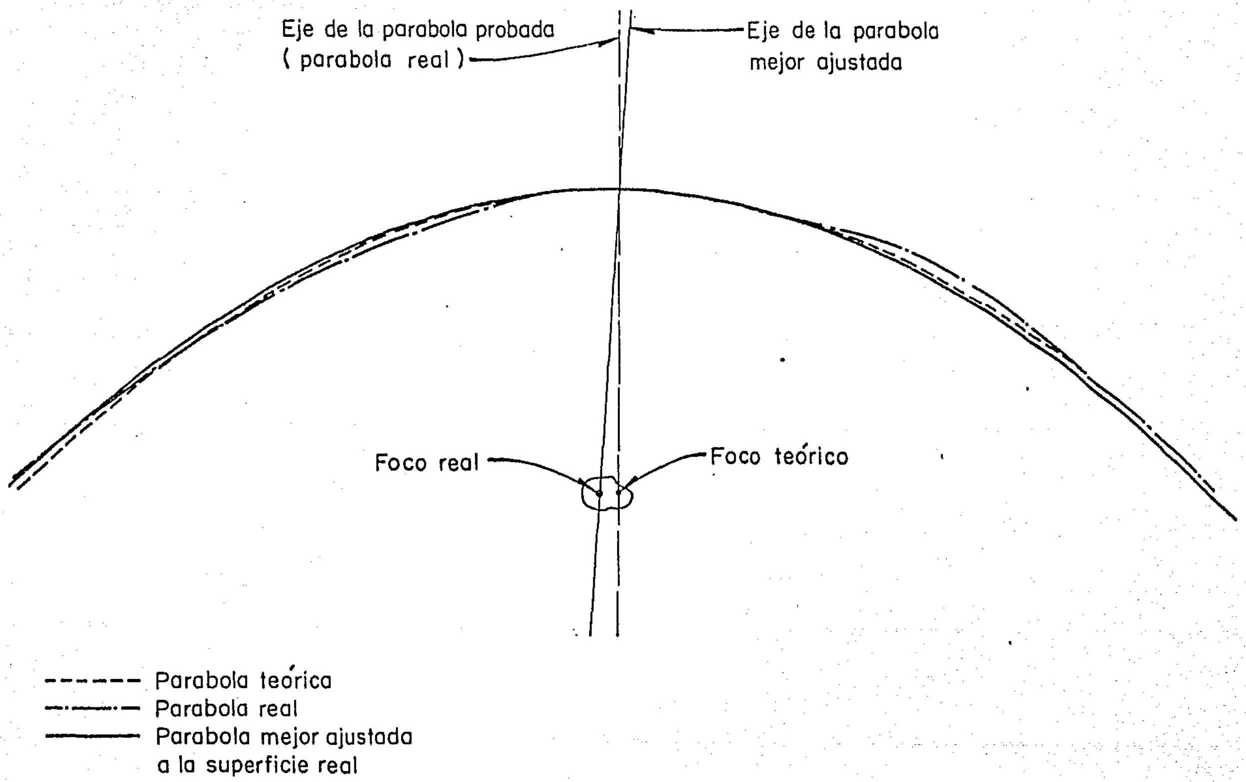


Fig 5.4 Ejemplo de una parábola mejor ajustada a la superficie real. El foco de la parábola ajustada, se encuentra en el centro de la región focal de la superficie real.

vértice en el origen, con el fin de poder orientar correctamente el concentrador con respecto al mecanismo rastreador del rayo laser.

El primer concentrador que se analizó es el mostrado en la figura 5.5, este espejo consiste en una estructura de acero y fibra de vidrio, sobre la cual se encuentra la superficie especular (acrílico aluminizado). Como se observa en la figura 5.5, la fibra de vidrio no forma un respaldo homogeneo para la placa de acrílico.

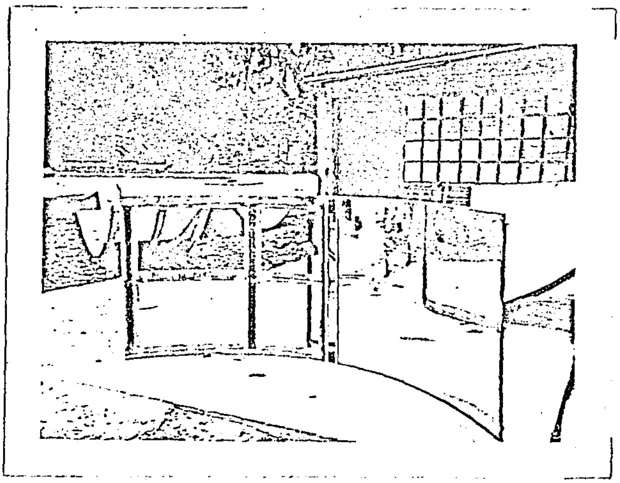


Fig 5.5. Concentrador con estructura de solera de acero y fibra de vidrio (respaldo no homogéneo)

En la figura 5.6 se observa que la mayor parte de los errores son del orden de 10 mrad, y el histograma no muestra una distribución normal; lo cual implica que hubo errores sistemáticos en la elaboración del espejo concentrador.

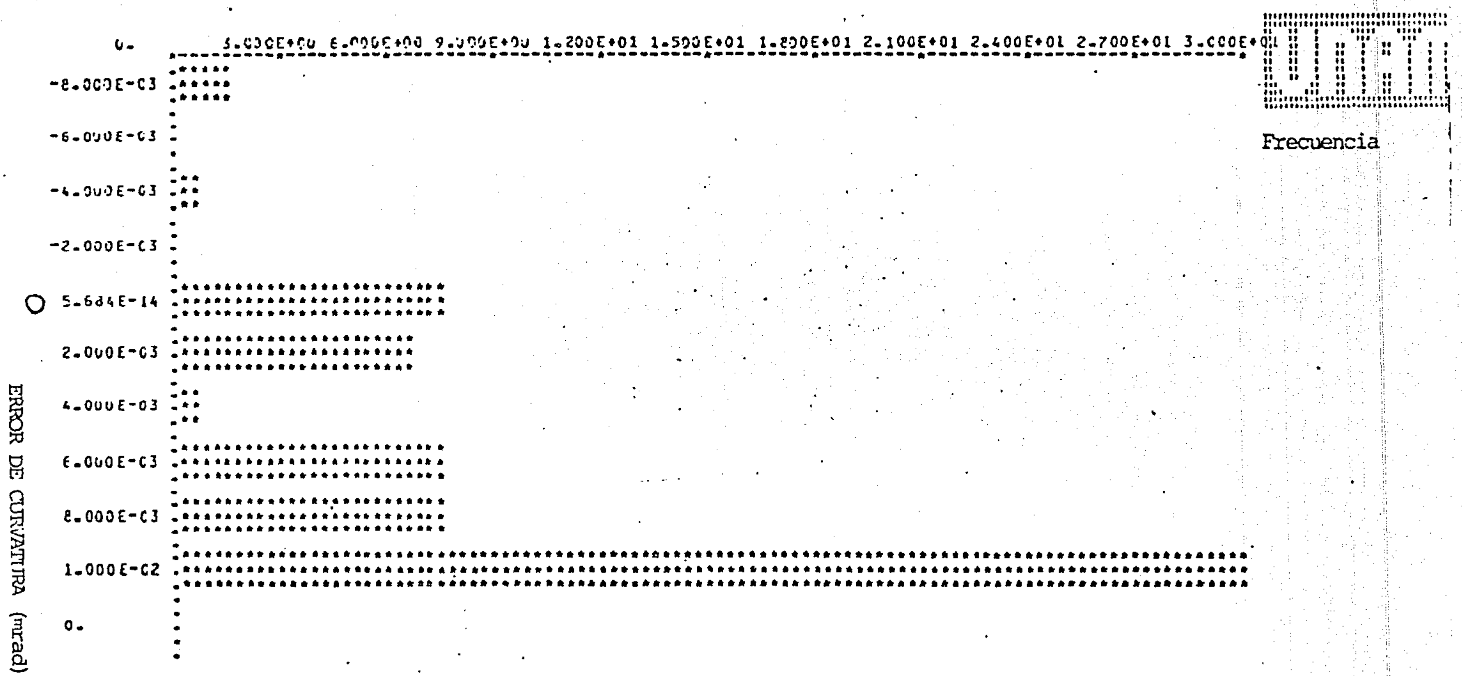


Fig 5.6 Histograma formado por los errores de curvatura del espejo mostrado en la fig EC 5 (estructura rechazada).

En los resultados se observó que los mayores errores correspondían con las regiones donde la superficie reflectante no tenía respaldo.

Como consecuencia de lo anterior, se procedió a modificar el diseño de la estructura del concentrador, y corregir el molde macho empleado para la fabricación del concentrador.

Una vez modificado el molde, se fabricó un espejo (fig 5.7), también con estructura de acero, pero con un respaldo homogeneo de fibra de vidrio para la superficie reflejante.

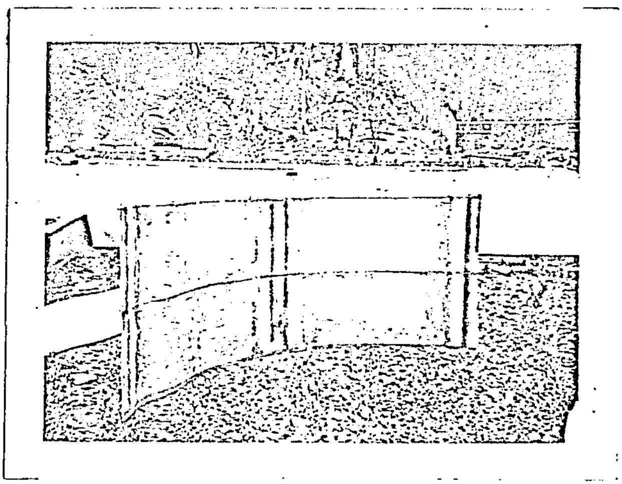


Fig 5..7 Estructura de acero y fibra de vidrio modificada

En este caso los resultados fueron más satisfactorios, puesto que se eliminaron en gran parte los errores sistemáticos en la construcción del espejo, resultando con esto una distribución que se aproxima a una normal en los errores de curvatura. La figura 5..8 muestra el histograma formado.

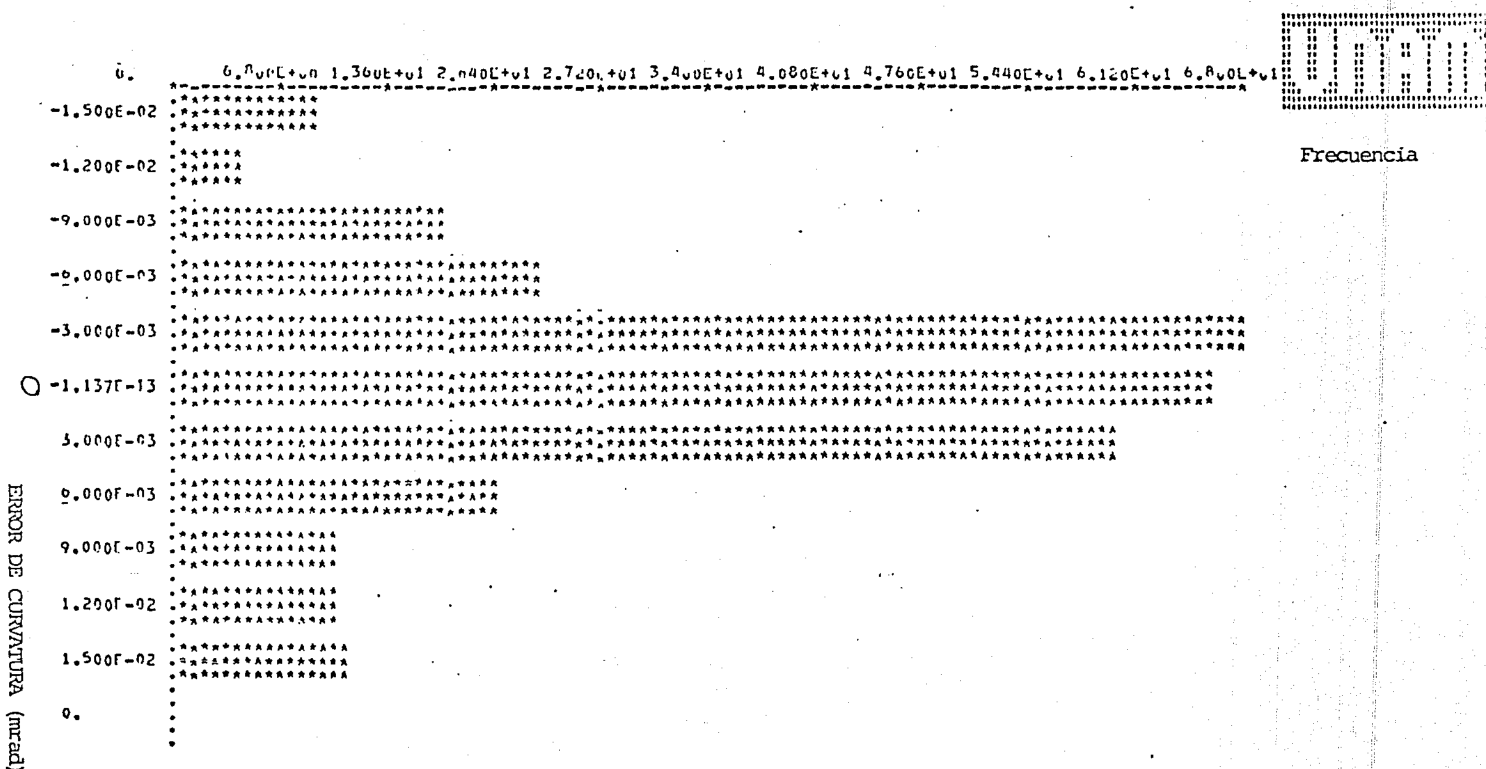


Fig 5.8 Histograma formado por los errores de curvatura del espejo mostrado en la fig EC 7. El molde macho que se utilizó para la elaboración de este concentrador, ya había sido reparado y reforzado.

La función de distribución tiene una desviación estándar de $\sigma_s = .0064$ rad = 0.37°. El valor obtenido de σ_s para los concentradores es bueno si se toma en cuenta que en la fabricación de los mismos no se ha utilizado maquinaria de precisión. En el histograma se observa que aproximadamente un 60% de los errores de curvatura están en el rango de (-3, 3) mrad. Para un concentrador de los fabricados en el Instituto de Ingeniería con una apertura constante con razón de concentración del orden de 20-30, la concentración de energía por una superficie con error de curvatura de 3 m mrad es un 99% como se verá más adelante.

En realidad un valor típico de σ_s para un concentrador de muy buena calidad es de 2 a 3 mrad {16} . lo cual implica que aún hay regiones con grandes errores de curvatura (mayores de 10 mrad) en los concentradores construidos en este Instituto, y que deben corregirse.

Para el concentrador mostrado en la fig 5.7 la mayor fuente de error se localizó en la región central del espejo (± 25 cm a partir del vértice). En la fig 5.9 se reproduce un corte seccional del espejo real, según la interpretación de los resultados.

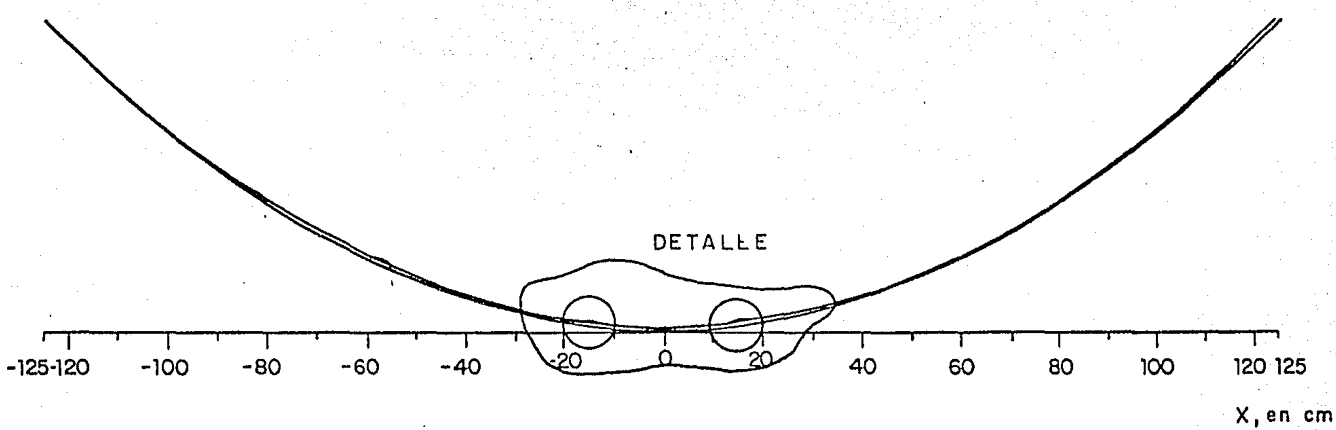


Fig. 5.9. Corte de perfil de un espejo cilíndrico parabólico fabricado en el Instituto de Ingeniería (ver detalle).

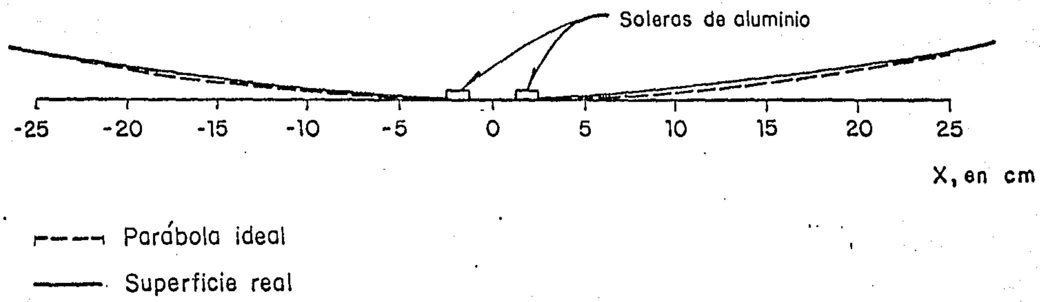


Fig 5.9 a. Detalle de la región del espejo donde se localiza la mayor fuente de error

5.2 Cálculo del Factor de Forma de un Concentrador Tipo Canal Parabólica

5.2.1 Introducción

El factor de forma es la relación de la radiación captada por el absorbedor entre la radiación directa incidente en el plano de apertura del concentrador.

Los cálculos incluyen el cono angular de la radiación solar incidente, los errores de curvatura y de superficie del espejo, y los errores cometidos en la orientación (seguimiento) del espejo.

El análisis es una adaptación al de Bienert {10} . En el análisis se hacen las siguientes suposiciones:

1) La reflexión en la superficie concentradora es especular.

2) El sol irradia con intensidad uniforme a través de su superficie. Correspondientemente, el flujo es uniforme en el cono de energía reflejada desde cualquier punto de la superficie del concentrador.

3) El eje de un cono de radiación dado se halla en un plano perpendicular al eje del tubo absorbedor.

4) Los errores causados por las imperfecciones del concentrador están uniformemente distribuidos sobre la superficie del concentrador, cuando se presenta una distribución estadística de los errores.

5) El error de superficie se caracteriza por una función de distribución normal cuya desviación estándar se usa como medida de la calidad de la superficie.

5.2.2 Concentración por una Parábola Perfecta

La ecuación de la sección parabólica del espejo en coordenadas polares con origen en el foco es

$$\rho = \frac{2\,f}{1 + \cos\theta} \tag{5.7}$$

donde:

f = distancia focal de la parábola

ρ = distancia del foco a un punto en la parábola

θ = ubicación angular de un punto en la parábola con respecto al eje óptico

Esta nomenclatura se muestra en la figura 5.10, junto con el ángulo de borde θ_R.

Considerese un cono de radiación que es reflejado desde algún punto de la superficie del espejo, tal como se muestra en la figura 5.11. Para una parábola perfecta el eje del cono pasa a través del foco. El radio a del círculo formado por el cono en el plano AA, perpendicular al eje del cono, está dado por

$$a = \rho \tan \alpha \qquad (5.8)$$

donde α es la mitad del ángulo subtendido por el sol.

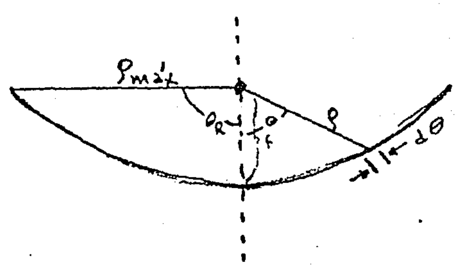


Fig 5.10 Nomenclatura del colector

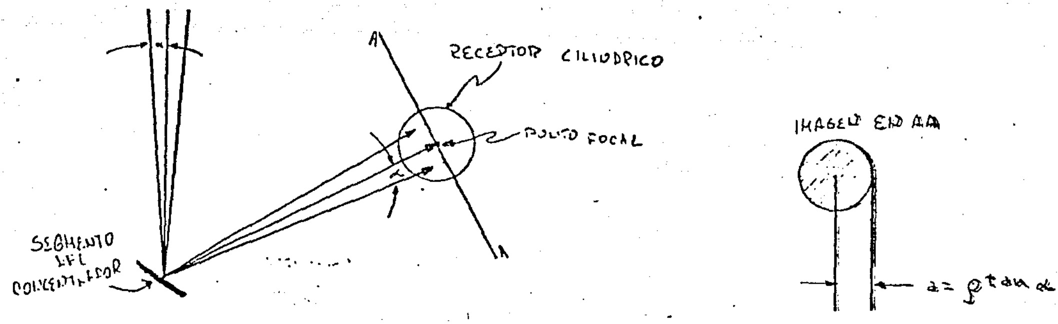


Fig5.11 Imagen producida por el concentrador considerando una óptica perfecta.

Para una tira axial (elemento de área a lo largo de la longitud) del concentrador las imágenes producidas deben ser una serie de círculos sobre el tubo absorbedor. Para poder determinar la energía incidente en el absorbedor, la energía reflejada de los segmentos de tira, $d\theta$, (figura 5.10) es evaluada e integrada en el rango de $\theta = -\theta_R$ a $\theta = \theta_R$ donde θ_R es el ángulo de borde del concentrador. Se toma un elemento dx sobre el plano AA en el plano focal; el área del elemento dx que se encuentra dentro del círculo imagen es 2ydx, donde la ecuación del círculo es

$$x^2 + y^2 = a^2 \qquad (5.9)$$

y donde el radio a es el definido en la ecuación (5.8)

La cantidad de energía que se encuentra en el elemento dx es la fracción $2ydx/\pi a^2$ de la energía interceptada por el círculo imagen. Si K es la radiación solar directa incidente y L es la longitud del espejo parabó lico, entonces $KL\,\rho\,d\theta$ es la energía total entregada al absorbedor por una tira axial, $d\theta$, del concentrador. La energía dE, interceptada por dx es

$$dE = \frac{2ydx}{\pi a^2}\, KL\rho\, d\theta \qquad (5.10)$$

La energía total recibida por el tubo absorbedor será entonces:

$$E = \frac{2KL}{\pi} \int_{-\theta_R}^{\theta_R} \int_{x_1}^{x_2} y \quad a^{-2} dx\, d\theta$$

$$= \frac{2KL}{\pi} (\tan\alpha)^{-2} \int_{-\theta_R}^{\theta_R} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\rho}\; y\, dx\, d\theta \qquad (5.11)$$

$$= \frac{K\,L}{\pi\, f} (\tan\alpha)^{-2} \int_{\theta_R}^{\theta_R} (1 + \cos\theta) \int_{x_1}^{x_2} (a^2 - x^2)^{1/2}\, dx\, d\theta$$

donde θ_R es el ángulo de borde (fig 5.10), y x_1 y x_2 son los límites en x.

Para encontrar x_1 y x_2, nótese que por una parte, la variable de integra - ción x está acotada por el círculo (fig 5.12A).

$$- a \leq x \leq a \qquad (5.12)$$

pero por otra parte, x está acotada por el radio W del absorbedor cilíndrico (fig 5.12B).

$$-W \leq x \leq W$$

por lo tanto:

$$x_1 = \text{máx}(-W, -a), \qquad x_2 = \min(W, a) \qquad (5.13)$$

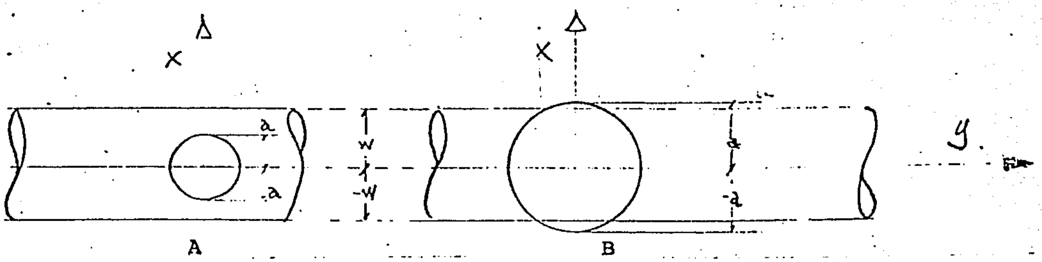


Fig 5.12 Imagen producida por un cono de radiación reflejada en el tubo absorbedor. En el caso A, la imagen no rebasa el diámetro del tubo absorbedor, por lo que los límites serán $x_1 = -a$; $x_2 = a$. El caso B muestra una imagen reflejada por un segmento de espejo más distante, esta imagen sobrepasa el diámetro del tubo absorbedor, por lo que la energía colectada deberá evaluarse entre los límites $x_1 = -W$; $x_2 = W$.

La superficie del tubo absorbedor tiene una absortancia que decrece cuando el cono de radiación reflejada pasa rosando tangencialmente al tubo absorbedor. En tales casos debe haber un límite B para el ángulo de incidencia (medido con respecto a la normal local del tubo) y el cual debe ser menor a 90°. El límite B para el ángulo de incidencia del cono de radiación, depende de la superficie selectiva que se esté utilizando, no obstante, los valores recomendados (refs 1 y 2) para dicho límite son del orden de 50° a 60°. Para ángulos de incidencia mayores que B, la absortancia del tubo se toma como cero, ya que experimentalmente las absortividades son muy bajas. En la figura 5.13 se muestra el ángulo de incidencia.

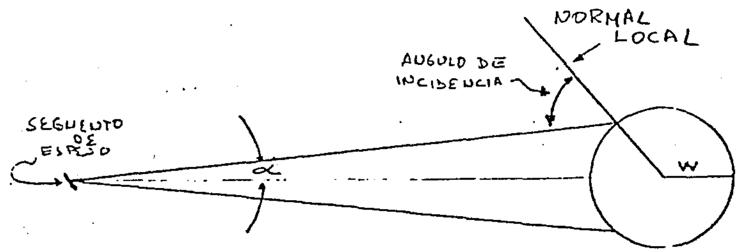


Fig 5.13 Angulo de incidencia de un cono de radiación reflejada desde un punto dado del concentrador.

Con el objeto de representar al absorbedor con una absortancia constante en toda su superficie, se define un radio efectivo W' y se utiliza en lugar del radio real del tubo absorbedor

$$W' = \frac{\operatorname{sen} B}{\cos \alpha} W \qquad (5.14)$$

donde:

B = ángulo máximo de incidencia de la radiación

α = mitad del ángulo subtendido por el sol

W = radio real del tubo absorbedor

Para los cálculos se utilizó B = 60°, debido a que no se tienen valores de la absortancia en función del ángulo de incidencia para las superficies selectivas obtenidas en este Instituto (es necesario contar con el reflectómetro para realizar este tipo de cálculos).

Así se puede obtener como límites de integración para la integral interior de la ecuación (5.11)

$$x_1 = \text{máx}(-W', -a), \qquad x_2 = \text{mín}(W', a)$$

Nótese que a es una función de θ, la variable de integración de la integral exterior.

5.2.3 Concentración por una Parábola con Imperfecciones

Las imperfecciones de un concentrador se caracterizan por la desviación estándar de la distribución que forman los errores de curvatura de la superficie real con respecto a la superficie ideal.

Un concentrador imperfecto dispersa la energía reflejada en el plano focal, desplazando los ejes de los conos de radiación de tal forma que pocos de ellos pasan por el punto focal teórico de la parábola.

Cuando un cono incidente es reflejado desde un punto del concentrador con un error de curvatura, ε, su centro será desplazado:

$$K\varepsilon = \rho \tan 2\varepsilon \qquad (5.15)$$

Una mala orientación del concentrador desplaza el eje óptico del sistema del eje Tierra-Sol, esto introduce un error que se puede deber a una mala orientación o a un seguimiento defectuoso; este error β se muestra en la fig 5.14 ; el cono reflejado desde cualquier punto del concentrador tendrá su eje desplazado, con respecto al foco nominal, una cantidad dada por

$$K\beta = \rho \tan \beta \qquad (5.16)$$

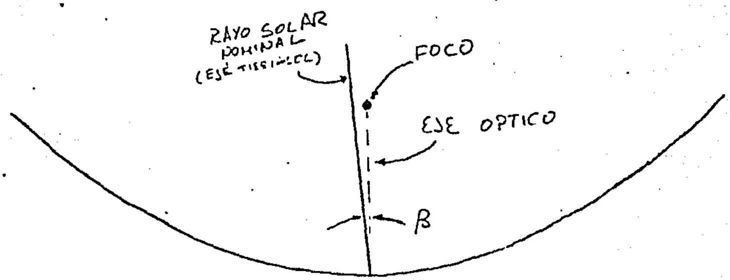


Fig 5.14 Desplazamiento del eje óptico con respecto al eje Tierra-Sol (error de seguimiento).

Por lo que el error combinado, K, debido a una mala curvatura y una mala orientación está dado por:

$$K = \rho \tan (2\, \varepsilon + \beta) \qquad (5.17)$$

Procediendo como antes, pero tomando en cuenta el error K, la expresión para el total de energía recibida por el absorbedor será:

$$E = \frac{K\, L}{\pi\, f} (\tan\alpha)^{-2} \int_{-\theta_R}^{\theta_R} (1 + \cos\theta) \int_{x_1}^{x_2} \{a^2 - (x-K)^2\}^{1/2} dx\, d\theta \qquad (5.18)$$

donde el círculo imagen tiene ahora la ecuación

$$(X - K)^2 + Y^2 = a^2 \qquad (5.19)$$

Manteniendo el origen del sistema de coordenadas en el centro del absorbedor cilíndrico.

Para poder determinar X_1 y X_2 es necesario calcular el radio efectivo definido en la ec 5.14, pero ahora incluyendo los efectos que causan los errores de curvatura y seguimiento

$$W' = \frac{\operatorname{sen} B}{\cos(\alpha + 2\,\varepsilon + \beta)}\, W \qquad (5.20)$$

así, por una parte, los límites de X serán

$$-W' \leq X \leq W'$$

y por otra parte:

$$-a + K \leq X \leq a + K$$

Ya que el centro de la imagen se encuentra desplazando una cantidad K. En consecuencia:

$$X_1 = \text{máx}(-W', -a + K) \qquad (5.21)$$

$$X_2 = \text{mín}(W', a + K) \qquad (5.22)$$

donde a y K están en términos de la variable de integración externa

$$a = \frac{2\ f\ \tan\alpha}{1 + \cos\theta} \quad ; \qquad K = \frac{2\ f\ \tan\ (2\varepsilon + \beta)}{1 + \cos\theta}$$

Para resolver la ecuación 5.18 se efectuó la integral interior en forma cerrada obteniéndose una función en términos de θ.

Por lo que la ecuación (5.18)

$$E = \frac{K\ L}{\pi\ f} (\tan\alpha)^{-2} \int_{-\theta_R}^{\theta_R} (1 + \cos\theta) \int_{X_1}^{X_2} \{a^2 - (X-K)^2\}^{1/2}\, dx\, d\theta$$

se convierte a:

$$E = \frac{K\,L}{f}\,(\tan\alpha)^{-2}\int_{-\theta_R}^{\theta}(1+\cos\theta)\left[\frac{X-K}{2}\;a^2-(X-K)^2+\frac{a}{2}\,\mathrm{sen}^{-1}\left(\frac{X-K}{a}\right)\right]^{1/2} d\theta \qquad (5.23)$$

Esta integral fue resuelta numéricamente por el método de Simpson.

Al realizar los cálculos numéricos, se asume que los errores de superficie del concentrador exhiben una distribución normal, especificada por su desviación estándar σ_s. La distribución normal es una función continua con un rango de rrores de cero a infinito.

En este caso, el intervalo que interesa de la función es el comprendido entre -15 y 15 mrad (-0.86°, 0.86°), puesto que para errores de curvatura mayores de 15 mrad la contribución de energía por el espejo es casi nula. Obsérvese la figura 5.15

Para evitar problemas en el programa de computación, los errores mayores de 15 mrad se desechan debido a las razones anteriormente expuestas.

El intervalo de 30 mrad se subdivide en 10 intervalos de 3 mrad cada uno, donde el error promedio de cada intervalo se utiliza para representar ese intervalo.

A este error promedio se le asigna la probabilidad total de la banda a la cual representa. Para obtener la fracción de energía reflejada que incide en el absorbedor, se calcula la fracción de energía con que contribuye cada intervalo de error, y se multiplica por sus respectivas probabilidades. Los productos son sumados, obteniéndose así el total de energía que llega al absorbedor.

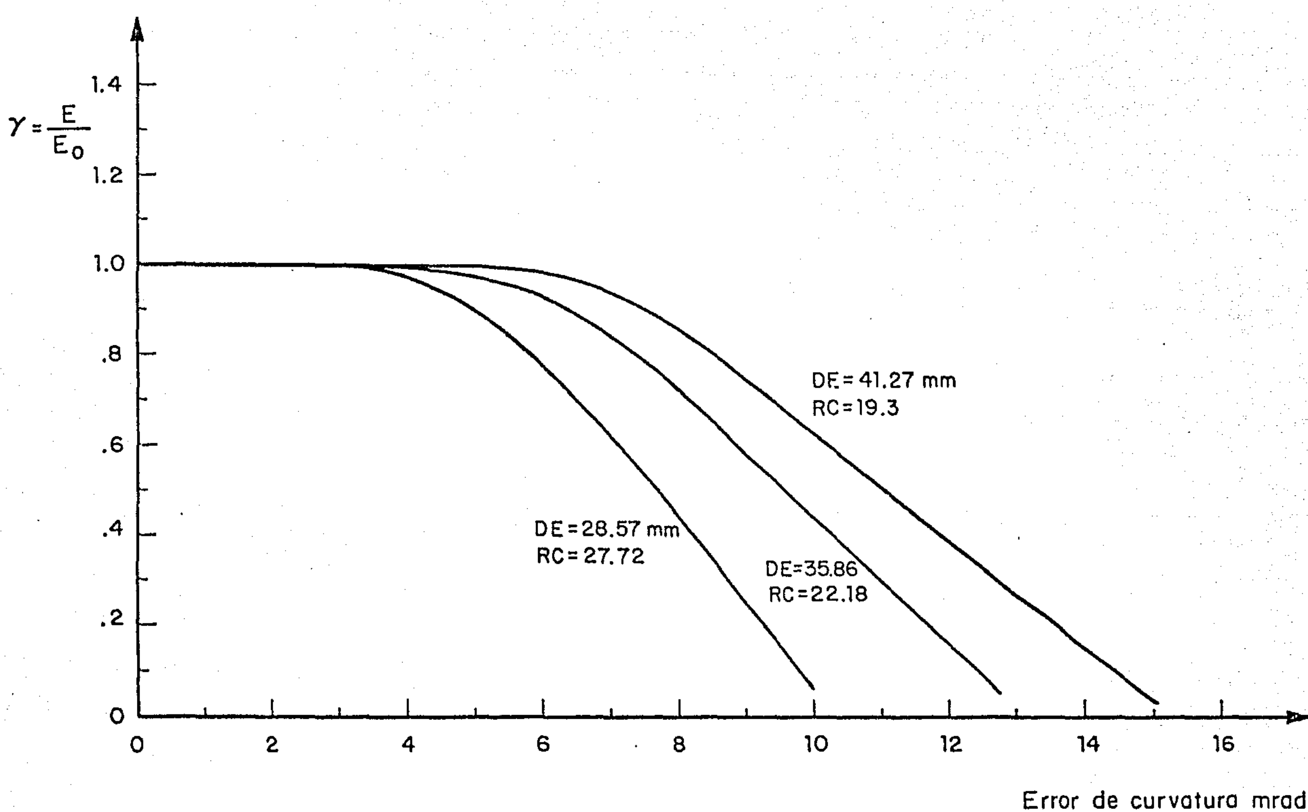


Fig 5.15 Factor de forma en función de los errores de curvatura, para diferentes razones de concentración

Al efectuar los cálculos, se probaron tres diámetros del tubo absorbedor (1", $1\frac{1}{4}$" y $1\frac{1}{2}$"). En la figura 5.15 se muestra el factor de forma en función del error de curvatura de cada intervalo de histograma; se observa que para un error de curvatura dado, el factor de forma aumenta al disminuir la razón de concentración.

Este hecho influye determinantemente en la elección del diámetro del tubo absorbedor, ya que para errores de curvatura mayores de 5 mrad la diferencia empieza a hacerse notoria.

En la figura 5.16 se muestra el factor de forma en función del diámetro exterior del tubo absorbedor, para la desviación estándar de los errores de curvatura obtenida en los concentradores fabricados en el I. de I.

Una manera de estimar el diámetro exterior para el tubo absorbedor, es la desarrollada por Treadwell {48}, y consiste en lo siguiente:

Teóricamente el tubo absorbedor debe capturar toda la energía reflejada por el concentrador; pero experimentalmente el diámetro del absorbedor depende del tamaño angular del sol, el error de curvatura, el error cometido en el seguimiento y la absortancia angular de la superficie selectiva del absorbedor. La figura 5.17 muestra esos factores.

Con relaciones trigonométricas se llega a la relación

$$\text{Diámetro receptor} = \frac{2\, r_{\text{máx}} \,\operatorname{sen}\theta/2}{\operatorname{Sen}60°\ \operatorname{sen}(\text{ángulo de borde})} \qquad (5.24)$$

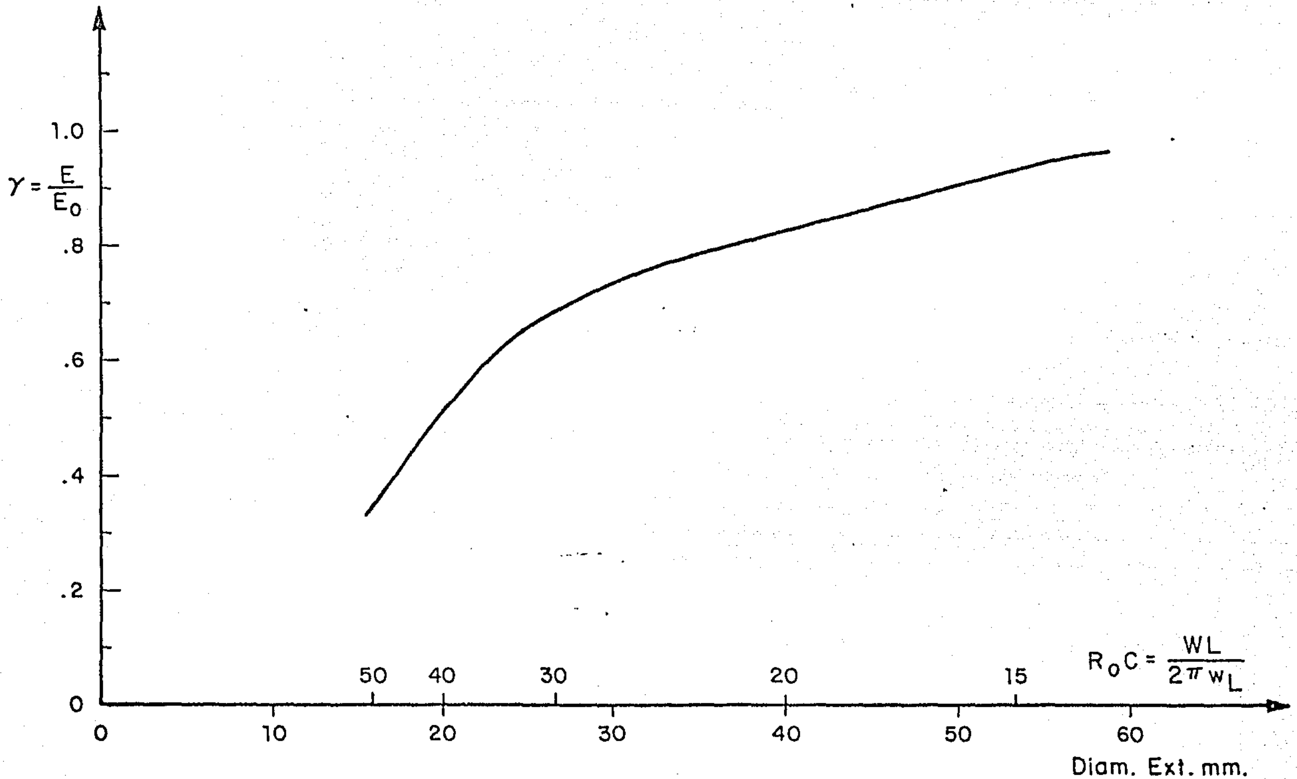


Fig 5.16 Energía incidente en el tubo absorbedor en función del diámetro externo del tubo. La superficie reflectante tiene un error de curvatura con dimensión estándar de 6.61 m rad. No se considera el error cometido en el seguimiento.

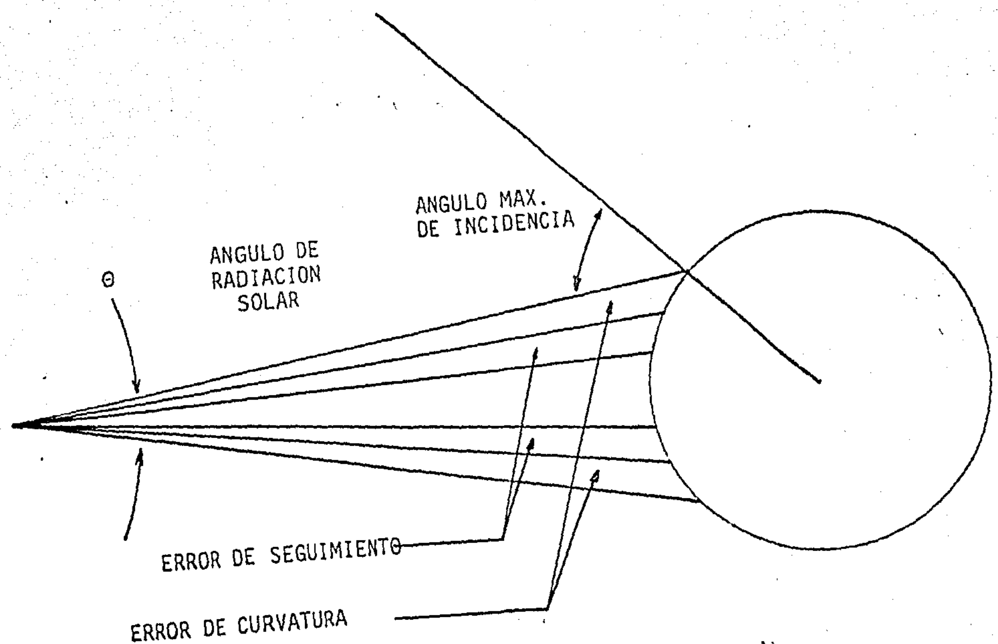


Fig. 5.17 Factores que intervienen en la elección del diámetro del tubo absorbedor.

donde:

Angulo de borde = ángulo formado entre el eje del concentrador y la línea imaginaria que va desde su borde al punto focal

$60°$ = ángulo máximo de incidencia de la radiación

r_{max} = distancia máxima entre el absorbedor y la superficie reflejante.

θ = apertura angular del cono de radiación incluyendo errores de curvatura y seguimiento,

Como los concentradores tienen un ángulo de borde de 90° y una $r_{máx}$ de 125 cm y si se supone que el error permitido en el seguimiento es de 0.25° = 4.4 mrad, sabiendo que el sol subtiende un ángulo de 0.5° se puede calcular el tamaño nominal del diámetro correspondiente a un error de curvatura de 6.37 mrad. como sigue:

$$\theta/2 = .0044 + .0044 + 00637$$

$$\therefore \quad DR = \frac{2(1250 \text{ mm}) \operatorname{sen}(0.01517)}{\operatorname{sen} 60° \operatorname{sen}(90°)}$$

$$= 43.79 \text{ mm}$$

este diámetro corresponde a un tubo absorbedor de $1\frac{1}{2}$" diámetro nominal.

En la figura 5.16 se observa que para el mismo espejo el factor de forma correspondiente a un diámetro de $1\frac{1}{2}$" mm es 0.83; mientras que para un absorbedor de $1\frac{1}{4}$" mm es 0.79.

6 TRANSFERENCIA DE CALOR EN CONCENTRADORES TIPO CANAL PARABOLICA

El balance de energía de un concentrador solar, y en general de todos aquellos sistemas que presentan intercambio de energia radiante, constituye un problema difícil de resolver analíticamente, ya que las pérdidas de calor incluyen temperaturas a la primera y cuarta potencia al menos, además el flujo de calor del del receptor hacía el fluído generalmente no es constante a lo largo del tubo receptor. Algunos autores {23,33,41,46,48} han propuesto métodos de solución de las ecuaciones de balance, estos métodos están referidos a un punto de vista global y tienen como principal característica emplear temperaturas de receptor constantes para cada segmento longitudinal.

En este capítulo se plantearán dos modelos para el análisis térmico de un concentrador; uno está referido a un punto de vista local, y el segundo al punto de vista global {33} . La diferencia que existe entre los dos puntos de vista es que en el primero el balance de energía de realiza en un elemento diferencial de volumen del fluído de trabajo, la ecuación de balance resultante se integra posteriomente en la dirección radial y en la dirección axial.

En el punto de vista global el balance se elabora sobre todo el concentrador y después se secciona este longitudinalmente para trabajarse por diferencias finitas.

En el modelo local se estudiará un receptor sin envolvente de vidrio, y se analizará la influencia que ejerce sobre el sistema algunos parámetros ambientales y de diseño.

El modelo global si incluye la envolvente de vidrio, y se emplea para comparar cualitativamente los resultados obtenidos por el modelo local.

6.1 Modelo Local

El sistema a modelar consiste en un módulo de concentradores similar a los instalados en la planta solar experimental del Instituto de Ingeniería, la única diferencia es que en este caso el receptor no tiene envolvente de vidrio. La descripción del sistema es la siguiente:

Longitud $L = 14$ m.

Apertura $W = 2.5$ m.

Diametro del receptor $D = 1\frac{1}{2}'' = 0.0381$ m.

Superficie selectiva del Receptor $\alpha = 0.9$; $\varepsilon = 0.15$

Reflejancia del espejo $\rho_R = 0.85$

Factor de forma $\gamma = 0.8$ (Valdés y Almanza, {50})

El fluído de trabajo seleccionado para la simulación fue el aceite THERM GL 450 ESSO, mismo que se emplea en la planta mencionada.

Las propiedades termofísicas del fluído se pueden clasificar en dos grupos, por una parte se tienen las que dentro del rango de temperatura de operación del sistema no varían en más de un 10%, como es el caso de la densidad y la conductividad térmica $\overline{K}$, en este caso $\overline{\rho}$ = 789.23 Kg/m^3 y $\overline{K}$ =0.1245 W/M°K. ref. {4}

Por otra parte se tienen las propiedades que en el intervalo de temperatura de opración del sistema sufren variaciones significativas. Para la capacidad calorífica y la viscosidad se ajustan los valores reportados en la ref. {4}

$$Cp = 817.73 + 3.63T, \quad 310 \leq T \leq 533°K \qquad (6.1)$$

$$\mu = 1.21 \times 10^{-6} \exp\left[\frac{3220.9}{T}\right], \quad 310 \leq T \leq 533°K \qquad (6.2)$$

donde Cp tiene unidades de j/Kg °K y μ está dada en Kg/m.s.

Dado que el modelo que se planteará es válido únicamente para flujos internos en régimen laminar y con perfiles de temperatura y velocidad totalmente desarrollados, se requiere que el número de Reynolds sea menor que 2100, según este criterio se puede calcular el flujo másico máximo permitido:

$$\overset{\circ}{m}_{max} = \frac{2100 \ \pi \ D \ \overline{\mu}}{4} \qquad (6.3)$$

siendo $$\overline{\mu} = \frac{\int_{310}^{533} \mu \, dT}{\int_{310}^{533} dT} = 6.8 \times 10^{-3} \frac{Kg}{M.s} \qquad (6.4)$$

Sustituyendo 6.4 en 6.3 se obtiene un flujo másico máximo de 0.43 Kg/s, lo cual corresponde a una velocidad promedio del fluído $<v_z>$ = 0.5 M/s.

El coeficiente de transferencia externo se puede conocer a pesar de que la temperatura de pared del receptor es variable; McAdams ref {37} propuso una correlación para el coeficiente de transferencia entre un tubo horizontal y un flujo de aire cruzado.

$$\frac{\bar{h}\,D}{R_{aire}} = B\,(\,Re_{aire})^{n} \qquad (6.5)$$

Los valores para B y n se localizan en la siguiente tabla:

Re	B	n
1 - 4	0.891	0.33
4 - 40	0.821	0.385
40 - 4,000	0.615	0.466
4,000 - 40,000	0.174	0.618
40,000 - 250,000	0.0239	0.805

Finalmente se considera que la radiación solar directa proyectada sobre el plano de captación, $G_b R_b$, se mantiene constante durante el tiempo de residencia de un elemento de volumen del fluído. Para un día típico del mes de mayo, y para un concentrador con orientación este-oeste situado en la ciudad de México, se tiene un valor promedio $G_b R_b$ = 700 W/M^2 al mediodía. {47}

6.1.1 Modelo Matemático

Para desarrollar el modelo matemático del tubo receptor se emplearon las siguientes hipótesis simplificatorias:

S1: El flujo del fluído es estacionario, unidimensional, incompresible y laminar.

S2: Se tienen perfiles de velocidad y temperatura totalmente desarrollados a lo largo de todo el tubo.

S3: Se desprecia la disipación viscosa.

S4: La conductividad térmica y la densidad del fluído son constantes.

S5: El campo de temperaturas es estacionario y con simetría axial.

S6: La difusión axial de calor es despreciable en comparación con el flujo axial convectivo de calor.

S7: La convección radial de calor es despreciable comparado con la difusión radial de calor.

S8: Se desprecian los efectos de borde.

S9: La resistencia térmica del tubo receptor es despreciable.

En la figura B1 se muestra un diagrama del elemento diferencial de volumen donde se elaboró el balance.

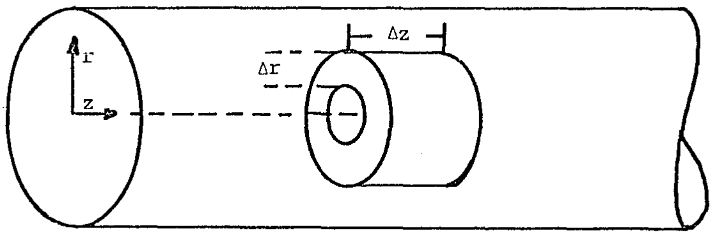


Fig.6.1 Elemento de volumen empleado para realizar el balance de energía en el tubo absorbedor.

La ecuación que describe el campo de temperatura del fluído en el interior del tubo es: (ref. {13}.)

$$\rho \hat{C}_p \frac{DT}{Dt} = -(\nabla \circ \vec{q}) - T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right) (\nabla \circ \vec{v}) - (\vec{z} : \nabla \vec{v}) \qquad (6.6)$$

Considerando las hipótesis S1 a S 8 se obtiene la siguiente ecuación simplificada:

$$\rho \hat{C}_p V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \overline{K} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r}\right) \qquad (6.7)$$

donde Vz es una función de r, y para el flujo laminar se expresa mediante: (ref. {13}.)

$$V_z = 2 < V > [1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2] \qquad (6.8)$$

donde $< V >$ es la velocidad promedio del fluído.

Así 6.7 adquiere la forma

$$\rho C_\rho \; 2 <V> \left[1- \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \frac{\partial T}{\partial z} = \overline{K} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r}\right)\right] \qquad (6.9)$$

Para establecer las condiciones de frontera, se tiene por una parte que el fluído de trabajo entra al receptor con una temperatura T_0 constante, así:

$$\text{C.F.1} \quad T = T_0 \quad \text{para} \quad z = 0; \qquad 0 \leq r \leq R \qquad (6.10)$$

Por otra parte, mediante la condición de simetría axial (hipótesis S5) se tiene que:

$$\text{C.F.2} \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{para} \quad r = 0\,; \quad 0 \leq z \leq L \qquad (6.11)$$

Finalmente, empleando la hipótesis S9, se obtiene la última condición de frontera:

$$\text{C.F.3} \quad \overline{K} \frac{\partial T}{\partial r} = G_b R_b \, \eta_\circ \left(\frac{Ac}{Aa}\right) - \{\varepsilon\sigma \; (T^4(r,z) - T_{amb}^4) + \overline{h}(T\,(r,z) - T_{amb}) \qquad (6.12)$$

$$\text{en } r = R; \quad 0 \leq z \leq L$$

Las ecuaciones 6.9 a 6.12 constituyen un sistema de ecuaciones no lineal en la frontera que no tiene solución analítica, por tal motivo para su solución se empleó la técnica de colocación ortogonal la cual se referirá posteriormente.

Antes de entrar a la solución numérica conviene analizar detenidamente la ecuación 6.12 . El primer miembro representa el flujo difusivo de calor en la frontera de la película de aceite con el tubo, consecuentemente $\overline{K}$ esta referida al aceite y no debe confundirse con la conductividad térmica del tubo, la cual en conjunción con el espesor del tubo forma una resistencia térmica despreciable.

En este caso no se requiere de un coeficiente interno de transferencia de calor, ya que este se emplea cuando se desconoce el perfil de temperatura del fluído, al resolver el sistema 6.9 a 6.12 se obtendrá un perfil térmico radial el cual será continuo y derivable según el régimen laminar que se está trabajando. Por este motivo no se pueden alimentar gastos mayores de 0.43 Kg/s en el modelo.

En el segundo miembro se tiene en el primer término la incidencia de radiación la cual es la radiación proyectada en el plano de captación GbRb, multiplicada por la eficiencia óptica de colección y por la razón de concentración (Ac/Aa). El segundo término representa la suma de las pérdidas por radiación y convección.

Resumiendo, la ecuación 6.12 nos da el flujo de calor conducido en dirección radial y el cual representa la diferencia neta entre la energía incidente en el receptor y las pérdidas radiativas y convectivas del mismo.

6.1.2 Solución Numérica

Para simplificar el manejo numérico de las ecuaciones 6.9 a 6.12 es conveniente expresarlas en forma adimensional, para tal efecto se definen las nuevas variables adimensionales:

$$\xi = \frac{r}{R} \; ; \qquad \zeta = \frac{z}{L} \; ; \qquad \Theta = \frac{T}{T_0} \tag{6.13}$$

Sustituyendo las variables 6.13 en 6.9 se obtiene

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \zeta} = \frac{1}{RePr} \left(\frac{L}{R}\right) \frac{1}{(1-\xi^2)} \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial \Theta}{\partial \xi}\right) \tag{6.14}$$

C.F. 1' $\quad \Theta = 1 \quad$ en $\zeta = 0 \; ; \quad 0 \leq \xi \leq 1$ (6.15)

C.F. 2' $\quad \dfrac{\partial \Theta}{\partial \xi} = 0$ en $\xi = 0, \quad 0 \leq \zeta \leq 1$ (6.16)

C.F. 3' $\frac{\partial\Theta}{\partial\xi} = N_R - [N_{PR}[\Theta^4 - \Theta\, a^4] + B(\Theta - \Theta\, a)]$ (6.17)

donde

$$N_R = \frac{GbRb\eta oR}{\overline{K}\ To} \quad \frac{Ac}{Aa}$$

$$N_{PR} = \frac{\varepsilon\sigma To^4 R}{\overline{K}\ To}$$

$$B = \frac{\overline{h}R}{\overline{K}}$$

En el modelo planteado por las ecs 6.14 a 6.17 resulta una ecuación diferencial parcial no lineal de tipo parabólico, con condiciones a la frontera no lineales. Todo esto se puede representar de la siguiente forma:

$$L_\zeta\ (\Theta) = \Psi(\Theta) L_\xi\ (0),\ 0 < \zeta\ ,\ \xi < 1 \qquad (6.18)$$

donde L_ζ es un operador diferencial de primer orden en la dirección axial y L_ξ es un operador diferencial de segundo orden en la posición radial. Ψ (Θ) es una función no lineal.

Las condiciones de frontera se pueden escribir como:

$$\partial_\xi\ (\Theta) = f_1\ ,\ \xi = 1,\quad 0 \leq \zeta \leq 1 \qquad (6.19)$$

$$\partial_\zeta\ (\Theta) = f_2, \zeta = 0,\quad 0 \leq \xi \leq 1 \qquad (6.20)$$

donde ∂ son operadores de frontera, y f son funciones dadas.

La solución de 6.18 se llevó a cabo numéricamente aplicando una técnica de colocación ortogonal, que es un método de mínimos cuadrados {53}

La idea del método consiste en aproximar la solución de 6.18 como una combinación lineal de la base, $\{\Phi_j\}$, de un espacio aproximante de dimensión NT; esto es

$$\Theta(\zeta, \xi) \sim \hat{\Theta}(\zeta, \xi) = \sum_{j=1}^{NT} A_j(\zeta)\Phi_j(\xi) \tag{6.21}$$

donde Aj es un conjunto de coeficientes a determinar.

Si se escoge una base polinomial $\{\Phi_j\}_{j=1}^{NT} = \{P_{j-1}\}_{j=1}^{NT}$

que además cumpla exactamente las condiciones de frontera, 6.21 puede expresarse en función de una base Lagrange {5} .

$$\hat{\Theta}(\zeta,\xi) = \sum_{j=1}^{NT} l_j(\xi)\Theta_j(\zeta) \tag{6.22}$$

numéricamente esto es más conveniente, ya que estos polinomios son fáciles de evaluar y toman valores en un dominio [-1,1] lo que lleva a números de condición chicos en matrices asociadas con estos.

Al sustituir 6.21 en 6.18 se obtiene

$$L_{\zeta}\ (\hat{\Theta}) = \psi(\hat{\Theta}) L_{\xi}(\hat{\Theta}) + R\ (\xi,\zeta) \tag{6.23}$$

donde R(ξ, ζ) es el residuo de la ecuación debido a la aproximación.

El método de colocación consiste en hacer que el residuo R se anule en N puntos internos del dominio, escogidos como raices de un polinomio ortogonal; es decir R(, ξ) = 0; j = 1,2, . . .N.

Esto se reduce 6.23 a {6}.

$$L_{\zeta}(\underset{\sim}{\Theta}) = F_1\ (\underset{\sim}{\Theta}),\ \underset{\sim}{\Theta}^T = (\Theta_1,\ \Theta_2 . . . ,\Theta_{NT}) \tag{6.24}$$

donde F_1 es una función algebráica. La ecuación 6.24 es un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias de valor inicial. Las condiciones de frontera conducen a un conjunto de ecuaciones algebráicas acopladas con 6.24 , así

$$F_2(\underset{\sim}{\Theta}) = 0 \tag{6.25}$$

La solución $\underset{\sim}{\Theta}(\zeta)$, de 6.25 y 6.24 se puede encontrar para después sustituirla en 6.22, obteniéndose así la aproximación a la solución de 6.18.

Para los cálculos se emplearon dos puntos de colocación en la posición radial, escogiéndose estos como raices de un polinomio ortogonal de Legendre. Además las condiciones de frontera en tal posición se cumplieron exactamente. Esto condujo a un sistema de dos ecuaciones diferenciales de valor inicial en la coordenada axial, acopladas con dos ecuaciones algebráicas no lineales, derivadas de las condiciones de frontera. Este conjunto acoplado se transformó a uno de ecuaciones algebráicas no lineales, mediante la aplicación de un in tegrador de Euler implícito a las ecuaciones diferenciales.

Al final en cada paso de integración se resolvió un sistema de ecuaciones algebráicas no lineales en el vector $\underset{\sim}{Q}$, efectuándose esto, con un método de cuasi-Newton. Hay que hacer notar que el método fue estable al paso de integración.

6.1.3 Resultados

El programa de computadora se corrió para obtener los perfiles de temperatura promedio radial del fluído en función de la longitud del concentrador. Los parámetros que se consideraron para la simulacion fueron el flujo másico, $\mathring{m}$, la temperatura de entrada, T_o , la velocidad del viento, U_o y la temperatura ambiente, T_{amb}.

Las distribuciones de temperatura axial se obtuvieron manteniendo constantes a tres de estos parámetros y variando el otro. Una vez obtenidos estos perfiles se evalúan el calor útil, Q_u, la eficiencia instantanea, η , y las pérdidas de calor, Q_p, mediante las siguientes relaciones.

$$Q_u = \mathring{m}\,\bar{C}_p\,(\,T_s - T_o\,) \qquad (6.26)$$

$$\eta = \frac{Q_u}{G_b R_b A_c} \qquad (6.27)$$

$$Q_p = A_c G_b R_b \eta_o - Q_u \qquad (6.28)$$

donde

$$\bar{C}_p = \frac{\int_{T_o}^{T_s} C_p dT}{\int_{T_o}^{T_s} dT} \qquad (6.29)$$

En la figura 6.2 se puede observar que la influencia de la temperatura ambiente es mínima en el comportamiento térmico del concentrador, ya que al variarse dicha temperatura de 10 a 25 grados centigrados, la eficiencia instantanea apenas se modifica en un 2%; en latitudes como en la ciudad de México, donde la temperatura ambiente oscila dentro de los 10 y 25° se puede considerar que el comportamiento térmico del concentrador no se ve afectado por dicha variación

En la figura 6.3 se muestra la influencia de la temperatura de entrada sobre la distribución axial de temperatura; la eficiencia instantanea disminuye conforme aumenta la temperatura de entrada. Esto es un reflejo de que aumentan las pérdidas de calor a mayor temperatura, para un flujo másico dado. En la misma figura se puede observar que para una temperatura de entrada del fluído de 90° le corresponde una de salida de 120°C, misma que se toma de entrada para la curva 3, la cual tiene una temperatura de salida de 146°C. Las eficiencias instantaneas de las curvas 2 y 3 son 35.38 y 30.33% respectivamente, o sea que se podría elevar la temperatura del fluído de 90 a 146°C con una eficiencia instantanea de 32.85% mediante el acoplamiento en serie de dos concentradores; sin embargo, esto podría no ser tan conveniente para temperaturas de operación mayores, ya que como se puede observar en las figuras 6.2 a 6.5, la temperatura del fluído tiende a acercarse asintóticamente a un valor de equilibrio; es decir, se correría el riesgo de mantener parte del concentrador ociosa.

Otra forma de lograr un aumento de temperatura similar al anterior podría ser la regulación del flujo másico, en la fig 6.4 se observa que reduciendo el flujo másico a 0.07 Kg/s se obtiene una temperatura de salida de aproximadamente 140°C, sin embargo la eficiencia cae hasta el 27.9%, reduciendose consecuentemente el calor útil. En general, al reducir el flujo másico se obtienen temperaturas de salida mayores, aunque con baja eficiencia.

Es importante notar en la fig 6.4 que para flujos másicos bajos, la ganancia de energía por el fluído se lleva a cabo principalmente en la primera mitad del receptor; mientras que para flujos elevados (curva inferior) la variación de la temperatura del fluído es aproximadamente lineal a lo largo del receptor, es decir, la ganancia de energía es constante en la dirección longitudinal.

En la fig 6.5 se muestra el efecto que ejerce la velocidad del viento sobre el perfil axial de temperatura del fluído. Para una velocidad de viento de 2m/s se tiene una eficiencia del 48%, mientras que para una velocidad de 6 m/s la eficiencia correspondiente es 27.8%. La sensibilidad del perfil axial se puede explicar ya que el modelo empleado no incluye la envolvente de vidrio.

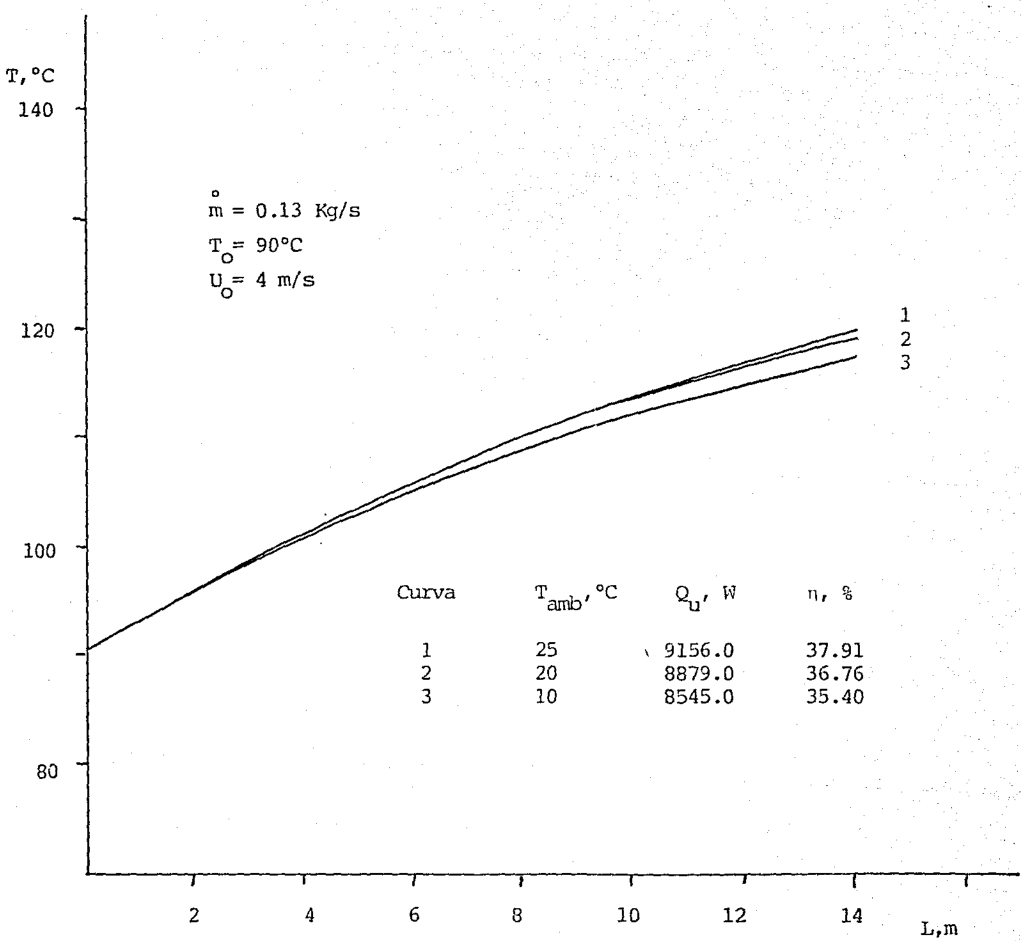


Fig 6.2 Distribución de la temperatura promedio radial del fluído a lo largo del tubo receptor, para diferentes valores de temperatura ambiente.

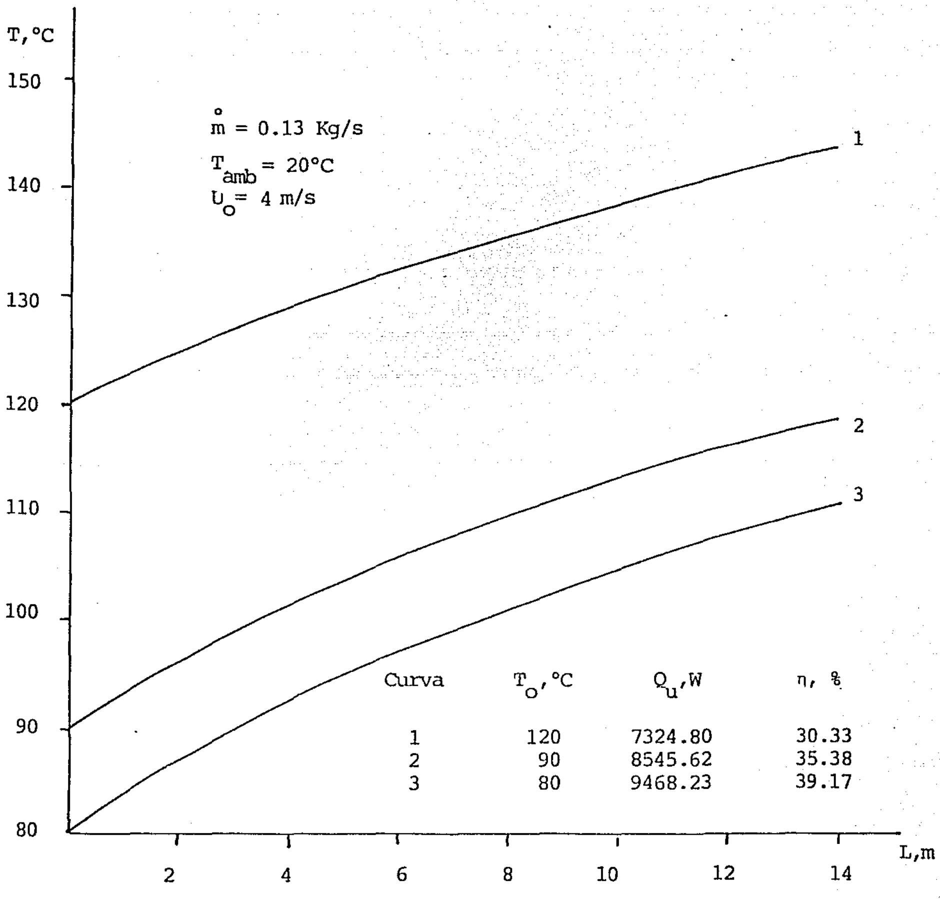


Fig 6.3 Distribución de la temperatura promedio radial del fluído a lo largo del receptor, para diferentes temperaturas de entrada.

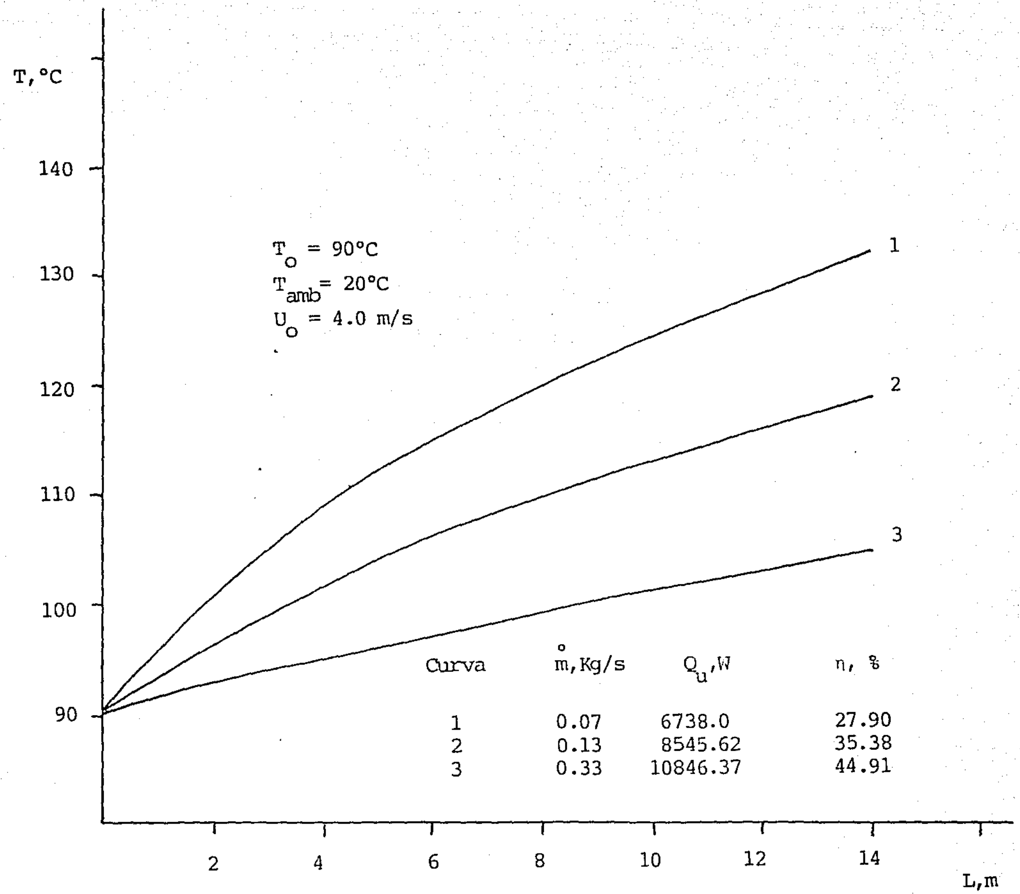


Fig 6.4 Distribución de la temperatura promedio radial del fluído a lo largo del receptor, para diferentes valores de flujo másico.

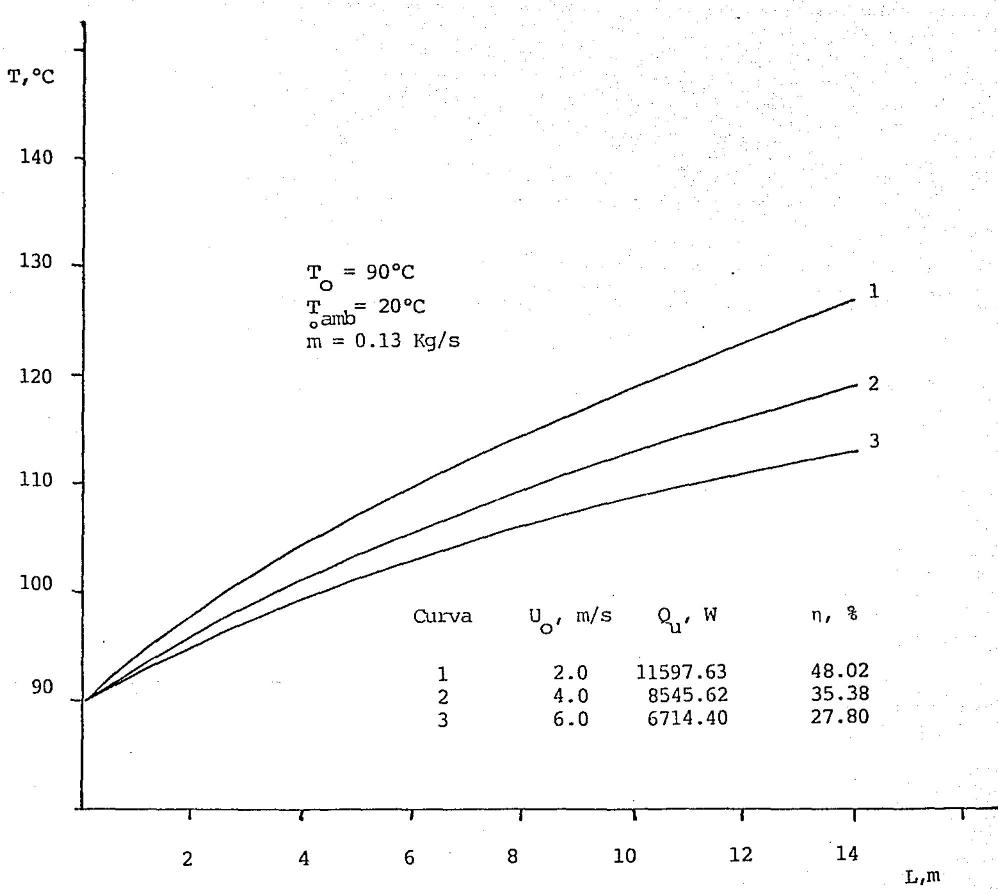


Fig 6.5   Distribución de la temperatura promedio radial del fluído a lo largo del receptor, para diferentes valores de velocidad del viento.

6.2 MODELO GLOBAL

Mediante la primera ley de la termodinámica se puede elaborar un balance de energía en estado estable para un receptor y su envolvente de vidrio.

Para el receptor, el balance de energía se expresa de la siguiente manera:

$$Q_s = Q_{r,ae} + Q_{c,ae} + Q_u \tag{6.30}$$

$$Q_{sc} + Q_{r,ae} + Q_{c,ae} = Q_{r,e} + Q_{c,e} \tag{6.31}$$

siendo

Q_s	radiación solar absorbida por el receptor (sólo se considera la componente directa)
$Q_{r,ae}$	intercambio radiativo entre el receptor y la envolvente
$Q_{c,ae}$	convección libre de calor entre receptor y envolvente
Q_u	calor útil ganado por el fluído
Q_{sc}	radiación solar absorbida por la envolvente

$Q_{r,e}$	intercambio radiativo entre la envolvente y el ambiente
$Q_{c,e}$	pérdidas de calor por convección forzada de la envolvente

Expresando cada flujo de calor de las ecs 6.30 y 6.31, por medio de sus definiciones correspondientes se tiene:

$$\eta_o G_b R_b A_c = A_a F_{ae} \sigma (T_a^4 - T_e^4) + \frac{A_a Nu_c k}{D_a} (T_a - T_e) + \mathring{m} C_p (T_s - T_o) \qquad 6.32)$$

$$\rho_m G_b R_b \alpha_e A_c + A_a F_{ae} \sigma (T_a - T_e) + \frac{A_a Nu_c k}{D_a} (T_a - T_e)$$

$$= \varepsilon_e A_e \sigma (T_e^4 - T_{amb}^4) + h_c A_e (T_e - T_{amb}) \qquad (6.33)$$

donde

A_a	área del receptor, m^2
A_c	área de captación, m^2
A_e	área la envolvente, m^2
C_p	capacidad calorífica del fluído, J/Kg°K
D_a	diámetro del receptor, m
F_{ae}	factor de intercambio radiativo entre receptor y envolvente
$G_b R_b$	radiación directa proyectada sobre el área de captación W/m^2
h_c	coeficiente de convección para la superficie externa de la envolvente, W/m^2 °K
k	conductividad térmica del aire en el espacio anular, W/m°K
$\mathring{m}$	flujo másico del fluído, Kg/s
Nu_c	número de Nusselt para la región anular, adimensional
T_a	temperatura del receptor, °K
T_{amb}	temperatura ambiente, °K

T_e	temperatura de la envolvente, °K
T_o	temperatura de entrada del fluído, °K
T_s	temperatura de salida del fluído, °K
α_e	absortancia de la envolvente, adimensional
ε_e	emitancia de la envolvente, adimensional
ρ_e	reflejancia del espejo, adimensional
σ	constante de Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} W/m² °K⁴

Para un espacio anular conteniendo aire entre cilíndros concentricos y horizontales, se han reportado varias correlaciones semiempíricas para evaluar el flujo convectivo (libre) de calor { 8,13,34,37 }, sin embargo Kreider {33} sugiere para el problema específico de un receptor envuelto por una cubierta de vidrio y expuesto a la radiación solar, las siguientes correlaciones:

$$Nu_c = \frac{0.124(\,GrPr\,)^{1/3}}{\ln(\,D_e/D_a)} \qquad (\,GrPr\,) = [10^7, 10^{10}] \tag{6.34}$$

$$Nu_c = \frac{0.440(\,GrPr\,)^{1/4}}{\ln(\,D_e/D_a)} \qquad (\,GrPr\,) = [10^4, 10^7] \tag{6.35}$$

$$Nu_c = 2[\,\ln(D_e/D_a)\,]^{-1} \qquad (\,GrPr\,) \quad 10^3 \tag{6.36}$$

donde Gr es el número de Grashof y Pr el número de Prandtl definidos por:

$$Gr = \frac{\rho g|\,T_a - T_e|(\,D_a - D_e)^3}{4\mu^2(\,T_a + T_e\,)} \tag{6.37}$$

$$Pr = \frac{C_p\,\mu}{k} \tag{6.38}$$

siendo

g	aceleración de la gravedad, m/s²
ρ	densidad del aire en el espacio anular, Kg/m³

μ viscosidad del aire en el espacio anular, Kg/m s

Tanto la viscosidad como la densidad deben ser evaluadas a la temperatura $(T_a + T_e)/2$.

El factor de intercambio radiativo F_{ae} se expresa mediante la siguiente relación {33 }:

$$F_{ae} = [1/\varepsilon_a + (A_a/A_e) (1/\varepsilon_e - 1)]^{-1} \qquad (6.39)$$

donde ε_a es la emitancia del receptor, también adimensional.

Las ecuaciones 6.32 y 6.33 forman un sistema simultaneo en T_a y T_e, y como estas temperaturas entran a la primera, a la cuarta y a la un tercio (o bien un cuarto) potencias, el sistema no se puede resolver de manera cerrada.

Un método de solución es por iteración:

a) Se evalúa T_e de la ecuación 6.33, empleando la temperatura de entrada del fluído T_o, y estimando la de salida T_s; con estos dos valores se introduce $T_a = \frac{1}{2}(T_o - T_s)$.
b) Se obtiene T_s de la ecuación 6.32 empleando la T_e calculada en a.
c) Se calcula $T_a = \frac{1}{2}(T_o - T_s)$, empleando la T_s obtenida en b.
El procedimiento se repite hasta que haya convergencia en T_a.

El paso a puede realizarse mediante el método de Newton-Raphson, y es deseable seccionar longitudinalmente el receptor, ya que como se observa en el desarrollo de la solución, la temperatura del receptor se considera constante a lo largo del mismo para cada iteración.

6.2.1 Resultados

La función principal de la cubierta de vidrio es eliminar las pérdidas de calor por convección forzada del receptor las cuales, como se vió anteriormente, son muy sensibles al cambio de la velocidad del viento cuando no existe la envolvente. En la fig 6.6 se muestra la variación de la eficiencia instantanea de un concentrador con envolvente de vidrio en el receptor con respecto a la velocidad del viento. En la misma figura se puede observar que en este caso, para velocidades de viento mayores de 4 m/s la velocidad de la eficiencia es mínima; así, mediante el empleo la envolvente se introduce una excelente resistencia térmica para las pérdidas convectivas.

Una de las principales desventajas que presentan este tipo de concentradores, es que operan solamente con la componente directa de la radiación solar; por tal motivo su utilización queda restringida a lugares de alta insolación. Este hecho queda demostrado en la fig 6.7, donde la eficiencia se muestra como función de la temperatura ede entrada del fluído y para diferentes niveles de radiación directa proyectada sobre el plano de captación.

Para un área de apertura dada la razón de concentración se puede fijar mediante el diámetro del tubo receptor. La razón de concentración es un parámetro de diseño importante ya que esta influye en la temperatura de operación del concentrador. Mientras más grande sea la razón de concentración, mayores temperaturas de operación se podrán manejar. Sin embargo, cuando se tienen concentradores imperfectos, como los analizados en el capítulo 5 de este trabajo , la eficiencia óptica (curva superior de la figura 6.8) cae bruscamente para razones de concentración mayores de 30, por lo que es poco incentivo diseñar en ese rango de razones de concentración mientras no se logre mejorar la calidad óptica de los concentradores. Por otra parte, se observa que al disminuir la razón de concentración se llega a un punto donde la eficiencia óptica es máxima, este punto corresponde al diámetro de un un receptor capaz de interceptar toda la radiación concentrada. Después de este punto la eficiencia óptica se mantiene constante mientras que la eficiencia instantanea comienza a decrecer debido a que el área radiativa del receptor va aumentando sin tener ganancias adicionales de calor.

En la misma figura se muestra también la ventaja que representa emplear un receptor con superficie selectiva en lugar de uno con superficie negra. Pra la superficie negra se observa que la eficiencia instantanea es menor que la correspondiente a la superficie selectiva, ambas bajo las mismas condiciones; esto se explica fácilmente dada la alta emitancia que presenta la superficie negra.

Para un concentrador como los instalados en la planta solar experimental se espera que para una razón de concentración de 20, receptor con superficie selectiva y operando con temperatura de entrada de 200°C, la eficiencia instantanea sea del orden del 45%, según los datos de la fig 6.8.

La temperatura a la cual se va a entrgar energía útil por el fluído de trabajo se puede lograr mediante la regulación del flujo másico {47}; en la figura 6.10 se muestra de salida del fluído como función del flujo másico y de la temperatura de entrada del mismo. Se observa que para flujos másicos altos el del orden de 0.4 Kg/s , la temperatura de salida está de 8 a 10 grados sobre la temperatura de entrada para los casos presentados, es decir, para gastos altos la temperatura de salida tiende a acercarse a la temperatura de entrada. En la figura 6.9 se observan las eficiencias correspondientes a las curvas presentadas en la figura 6.10 y se recalca el hecho de que a mayor flujo másico mayor eficiencia.

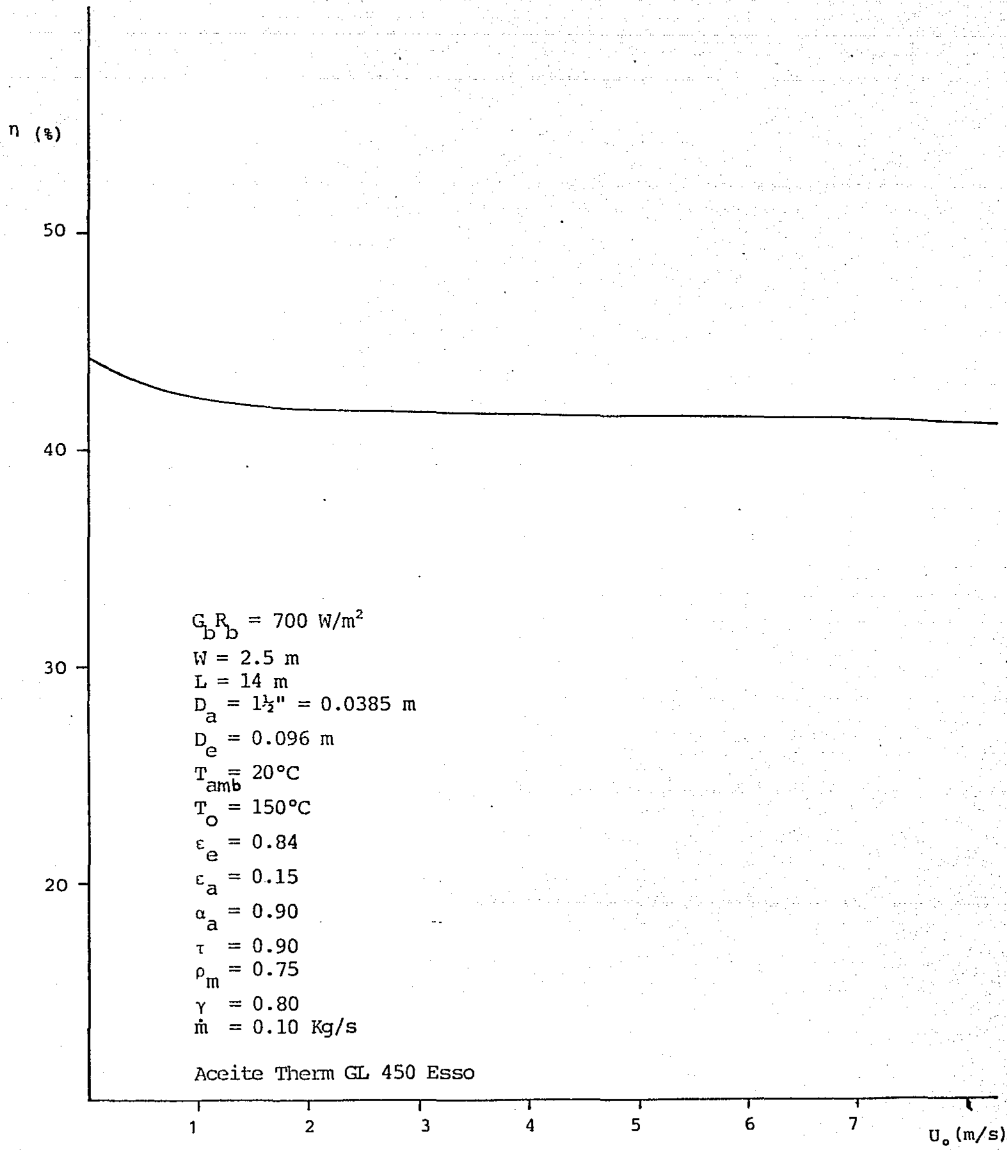


Fig. 6.6 Eficiencia instantanea en función de la velocidad del viento.

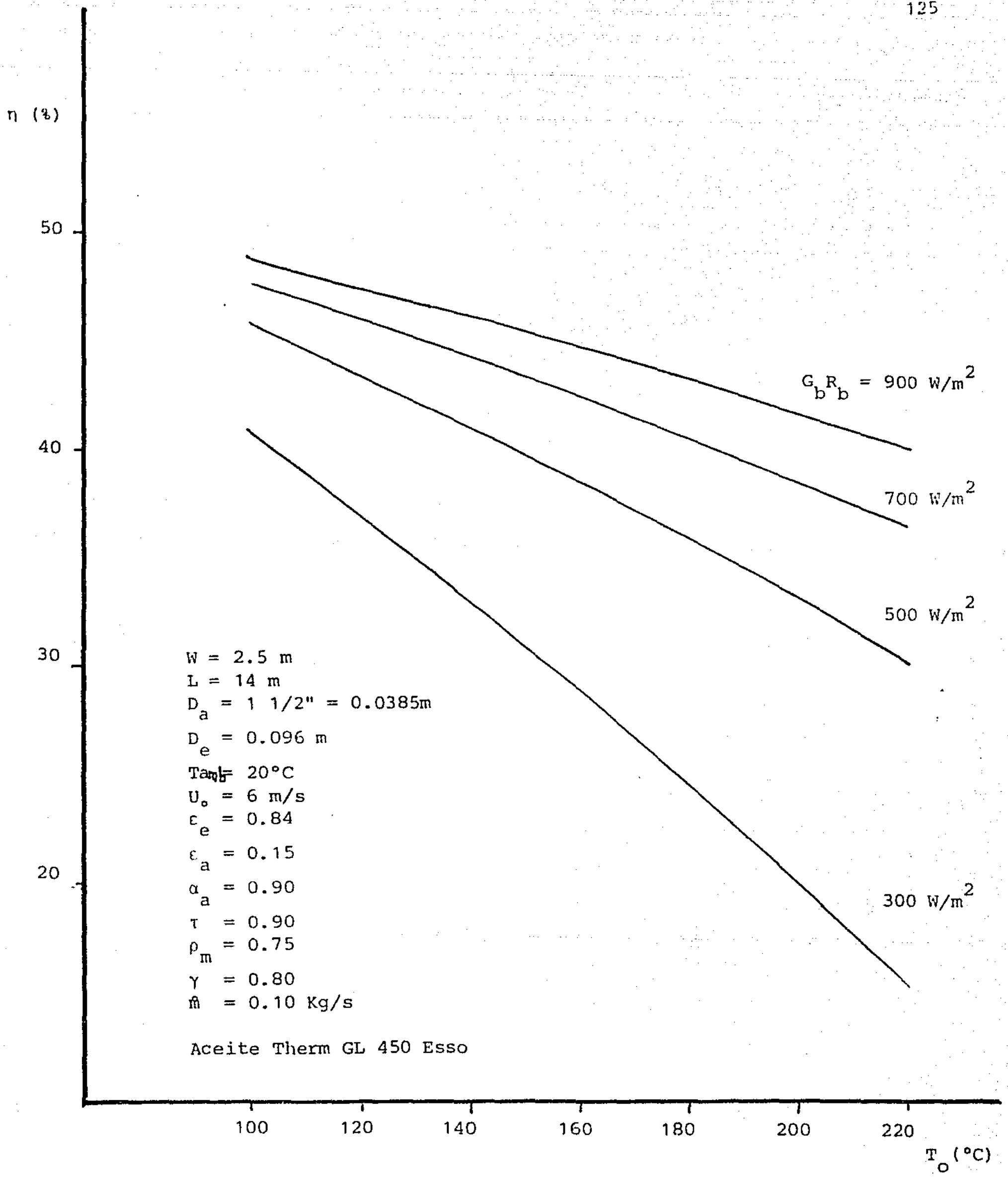


Fig 6.7 Eficiencia instantanea en función de la temperatura de entrada del fluído, para diferentes niveles de radiación directa proyectada sobre el área de captación del concentrador.

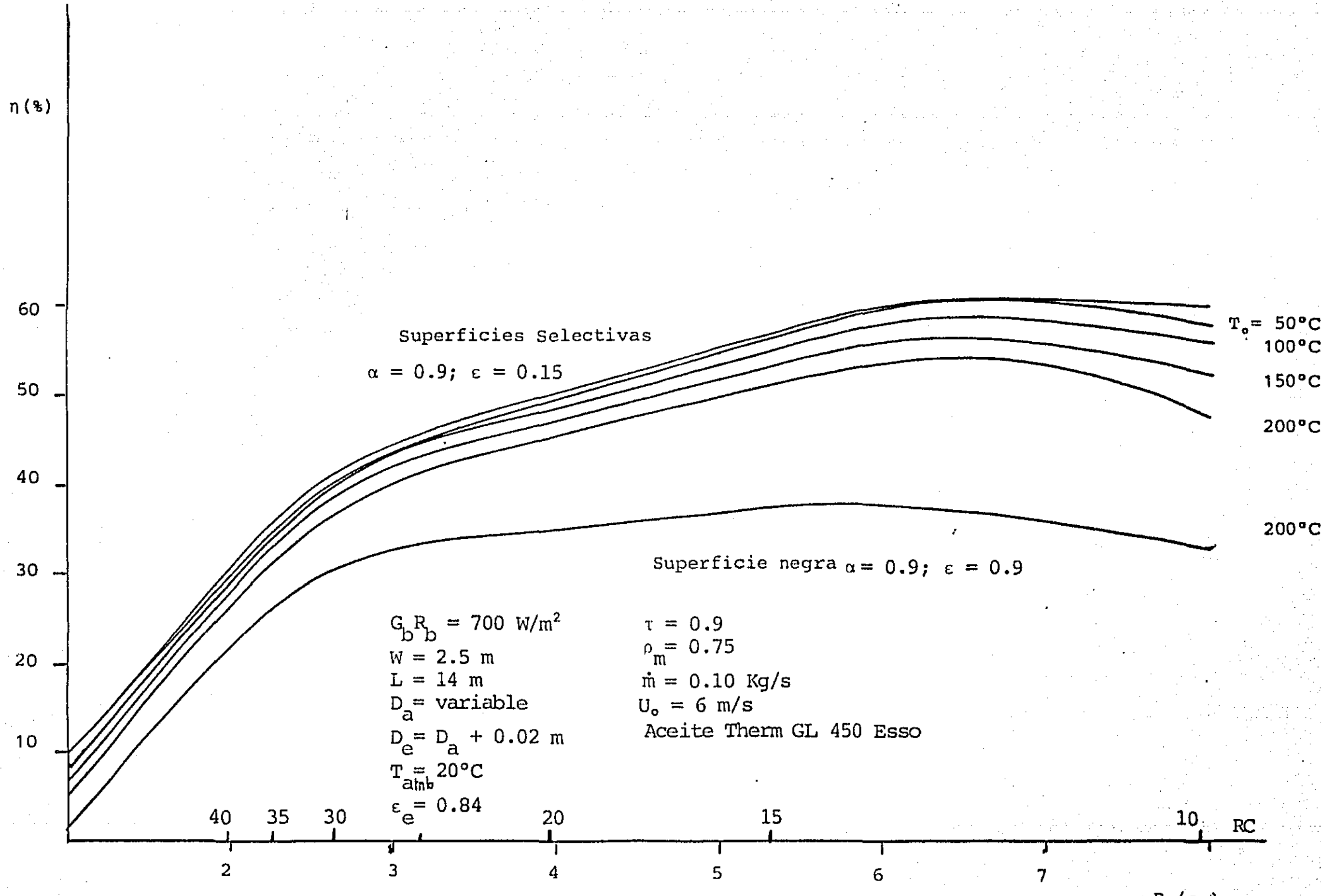


Fig 6.8 Eficiencia instantanea en función del diámetro del receptor, para diferentes temperaturs de entrada. La curva superior representa la eficiencia óptica. Rc significa razón de concentarción

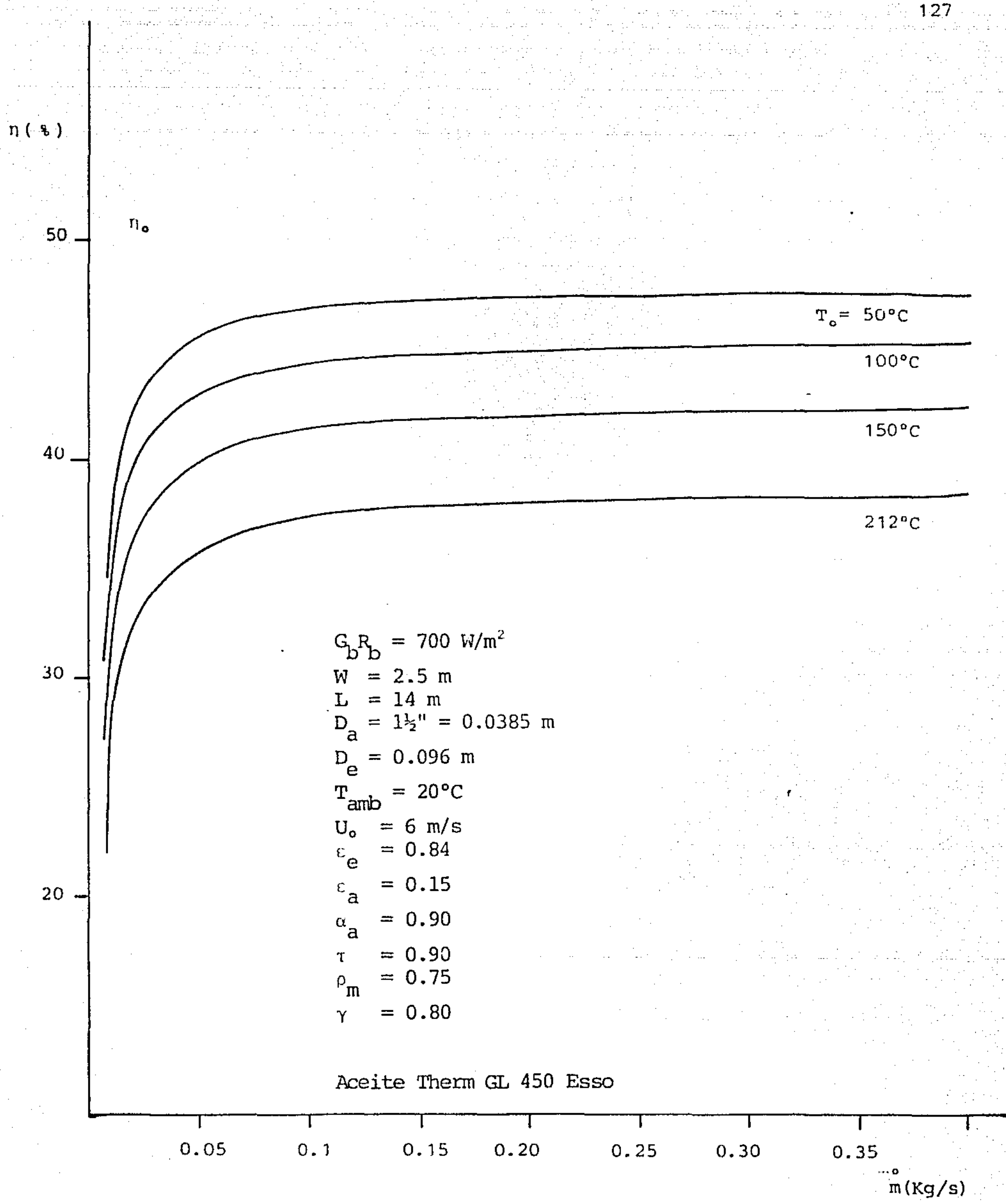


Fig 6.9 Eficiencia instantanea en función del flujo másico para diferentes temperaturas de entrada

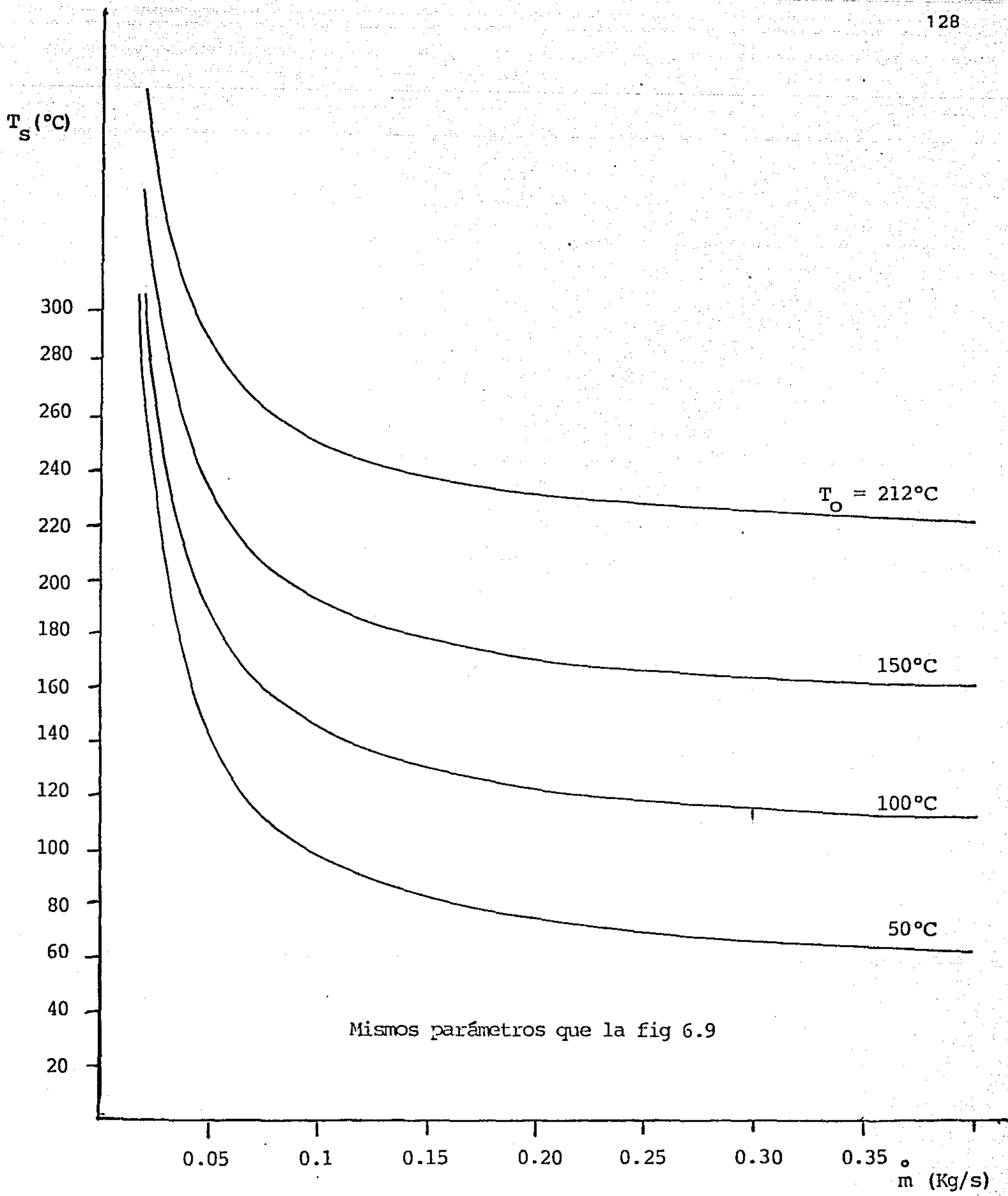


Fig 6.10 Temperatura de salida del fluído en función del flujo másico, para diferentes temperaturas de entrada.

7 DESARROLLO EXPERIMENTAL DE CONCENTRADORES TIPO CANAL PARABOLICA

Desde el inicio del proyecto "Planta Solar Experimental" desarrollado en el Instituto de Ingeniería se planteó la necesidad de fabricar ahí mismo la estructura de los concentradores, ya que éstas no se encontraban disponibles en el mercado nacional.

Para satisfacer la demanda de 192 concentradores requeridos por el sistema, se fabricaron varios moldes para obtener después las estructuras de fibra de vidrio sobre las que se montaron los espejos concentradores. Estos concentradores son los que se analizaron en el capítulo 5 de este trabajo.

En este capítulo se presenta el método de construcción del molde, así como la aplicación de las superficies reflejantes empleadas en el sistema.

7.1 Construcción de un Molde Macho para Fabricar Concentradores Tipo Canal Parabólica

El molde de la parábola se construyó mediante el trazo de la misma en una placa de aluminio de 1/4" de espesor. La parábola obedece a la ecuación

$$y = \frac{X^2}{4f}$$

donde

f distancia focal

Para trazar esta parábola se utilizó el método de pendientes, éste método consiste en ir uniendo segmentos de lineas rectas que se obtienen por medio de una escuadra (de 100 x 100, construída de Al especialmente para este problema), que utiliza como pivote el punto focal, y como guía a una línea que pasa por el vertice de la parábola y es parelela al plano de apertura, véase la fig 7.1, {22} .

Una vez obtenido el contorno de la curva, se procedió a cortarla; la curva tiene una apertura de 250.0 cm y una longitud de cerca de 286.95 cm; este hecho aumento el grado de dificultad del acabado de la curva, ya que no se encontro una máquina capaz de rectificar el contorno parabólico; el acabado de la plantilla se hizó a mano.

Inicalmente se hicieron plantillas de madera pero estas se deformaron con el tiempo por lo que se desecharon. Posteriormente se obtuvo una en lámina de aluminio de 1/4", la cual sirvió como patrón para tallar las bases de madera, que se usaron como alma estructural del molde macho y sobre las que se colocó la placa de acero inoxidable, obteniéndose así la superficie cilíndrico-parábolica (véase la fig 7.2).

Es importante hacer notar que debido a que el acabado se hizo a mano, el molde presenta regiones que no enfocan en el punto esperado (este fenómeno se presenta en cualquier espejo cilíndrico parabólico). Este problema se ataca por medio de varias técnicas que predicen los parámetros reales del espejo, que se verán con detalle más adelante.

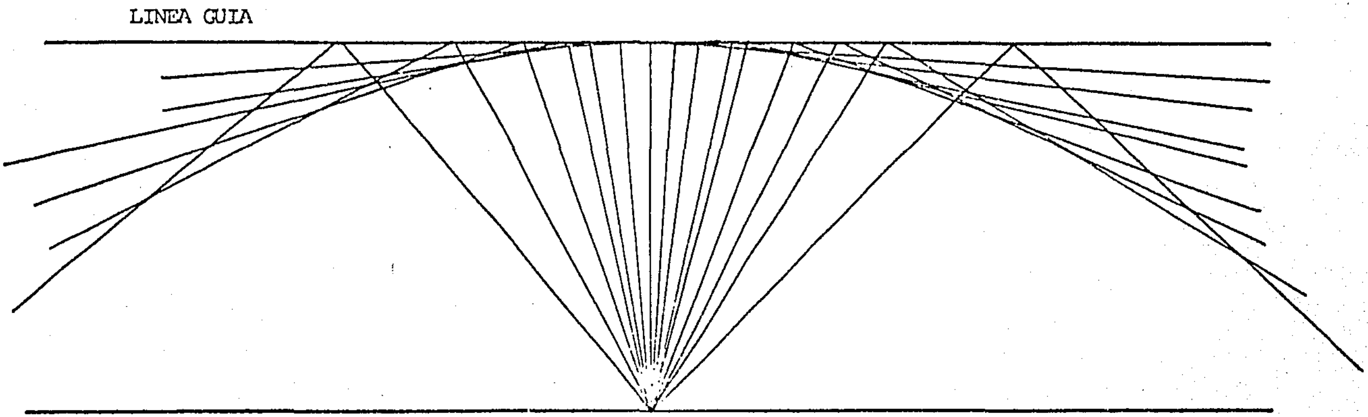
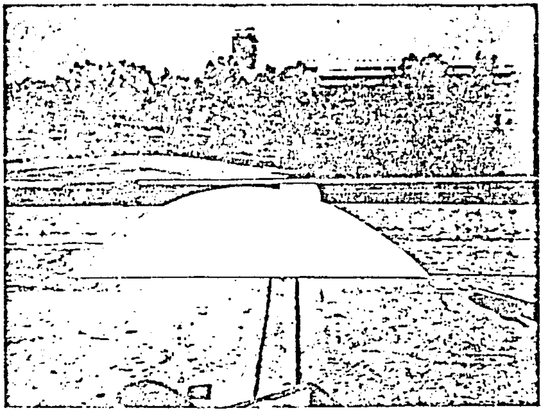
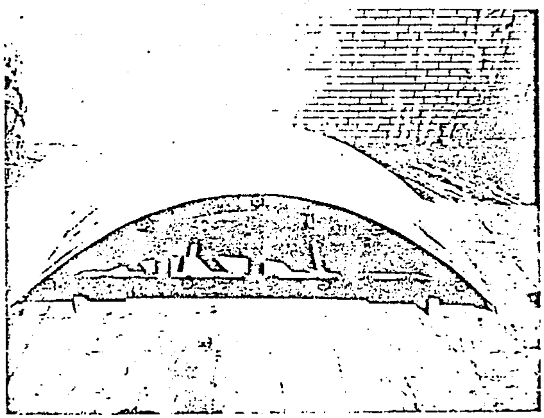


Fig 7.1 TRAZADO DE UNA PARABOLA.



a) Plantilla de aluminio de 1/4'' de espesor



b) Molde macho para vaciar la fibra de Vidrio

Fig 7.2

7.2 MATERIALES REFLEJANTES SOBRE CONCHAS DE FIBRA DE VIDRIO

Uno de los principales problemas en la captación de energía en el sistema generador solar es la obtención de grandes superficies reflejantes que satisfagan los requerimientos de calidad óptica y mecánica para conservar una buena eficiencia con el paso del tiempo.

Con respecto a este problema se han empleado tres tipos de superficies reflejantes:

a) Acrílico aluminizado

b) FEK-244 de la compañía 3M

c) Aluminio electropulido (Kingston)

a) El acrílico aluminizado consiste en una película de aluminio depositado al vacío sobre una placa de acrílico de 3 mm de espesor. Este material ha sido empleado en la mayor parte de los concentradores fabricados en este Instituto.

Los problemas principales en la utilización de acrílico aluminizado son: la dilatación térmica y el desprendimiento de la película reflejante al estar en contacto con el medio ambiente; principalmente en época de lluvias, por la alta humedad en el ambiente.

° El acrílico se ha montado sobre estructuras de fibra de vidrio cuyo coeficiente de dilatación térmica es aproximadamente tres veces menor que el del acrílico; este hecho ha repercutido en la calidad de la superficie reflejante ya que al quedar fija ésta sobre la estructura se producen deformaciones debidas a las diferentes temperaturas ambiente que se alcanzan a lo largo del día. En ocasiones estas dilataciones dan lugar a que el acrílico sufra fracturas.

En consecuencia, la idea general para montar los acrílicos es tratar de evitar al máximo regiones de concentración de esfuerzos (agujeros) que son las fuentes de propagación de fracturas cuando hay dilatación térmica.

Para evitar tener que perforar los acrílicos, éstos se montaron a presión sobre la estructura de fibra de vidrio, logrando así que el acrílico siguiera el contorno parabólico de la estructura como se muestra en la figura 7.3

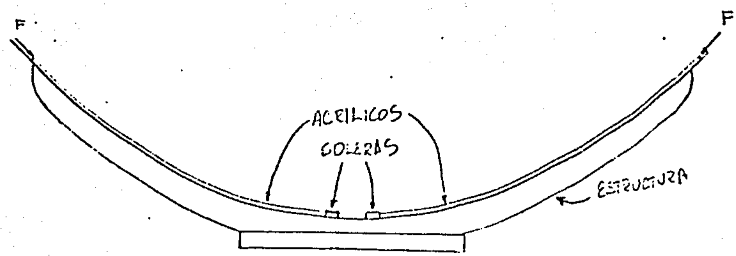


Fig.7.3 Montaje de las superficies de acrílico a presión

El acrílico queda fijo en la estructura por medio de una solera de aluminio que se coloca en cada extremo desde donde se aplica la fuerza; entre la solera y el borde del acrílico hay una tira de hule espuma que tiene como función absorber la dilatación térmica del acrílico. El problema con este método es el mantenimiento del concentrador, ya que el hule espuma se degrada rápidamente, ocasionando con ésto, el desprendimiento del acrílico. Para evitar ésto último, se puede emplear otra solera para fijar los espejos a la estructura y proteger a la vez la tira de hule espuma. Esta solera es dos veces más ancha que la solera que sirve como tope del acrílico, y del mismo espesor. En la fig.7.4 se muestra dicha solera.

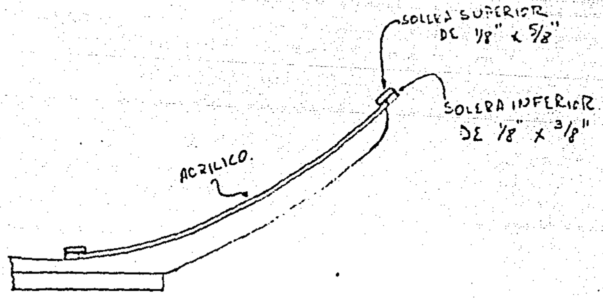


Fig 7.4 Soleras empleadas para la sujeción del acrílico

b) Una alternativa interesante en la obtención de superficies reflejantes a ser utilizadas en el sistema "generador solar" es el empleo del FEK-244. Este material consiste en una capa reflectora de segunda superficie depositada sobre una película acrílica transparente y de aplicación autoadhesiva sobre el sustrato geométricamente adecuado.

La gran ventaja que presenta este material sobre el acrílico aluminizado y sobre el aluminio Kingston es precisamente la autoadherencia, con lo cual se facilita la aplicación sobre las superficies parabólicas. El método de aplicación es el siguiente:

Se selecciona un sustrato adecuado (fig7.5) para cubrir con él la superficie parabólica. En este caso se utilizó como sustrato lámina de aluminio calibre 22, la cual se fijó sobre la fibra de vidrio con dos soleras de aluminio en sus extremos.

Para aplicar el material reflectante al sustrato, se utilizó una solución de detergente no enzimático (con detergente enzimático la adhesión es pobre).

El sustrato se limpió con la solución quedando así libre de polvo y grasa: inmediatamente se mojó el lado adhesivo del FEK con la misma solución, aplicándose en ese instante sobre el sustrato; la película de solución que queda entre el sustrato y el FEK se expulsó con una espátula de plástico (fig 7.6). Es conveniente que la limpieza previa del sustrato sea tan perfecta como sea posible ya que cualquier partícula de polvo se nota inmediatamente por la deformación que produce en la imagen del espejo.

Otro detalle importante en la aplicación del FEK es evitar tener la superficie reflectora adherida en regiones de concentración de esfuerzos sobre el sustrato (esquinas, perforaciones), ya que a partir de ellos se crean nervaduras sobre la película que se propagan de extremo a extremo del espejo, disminuyendo así su calidad óptica.

Con el fin de tratar de reducir el costo por metro cuadrado de concentrador construido, se hicieron pruebas de aplicación del FEK sobre fibra de vidrio directamente y sobre acrílico.

En la fig 7.7 se muestra el resultado de aplicar el FEK directamente sobre la estructura de fibra de vidrio. En la misma figura se observa la propagación de las nervaduras como consecuencia de la mala adhesión, es posible también que haya gasificación de los materiales plásticos.

La fig 7.8 muestra el FEK adherido sobre un sustrato de acrílico; aquí también se observan irregularidades sobre la superficie reflectora, aunque ahora aparecen como granos, siendo en realidad burbujas de aire, o bien, gases formados durante la adhesión.

En consecuencia, el mejor sustrato de los que se han probado es el aluminio, ya que permite tener un buen acabado superficial en el espejo (fig 7.9) y sobre todo que no produce efectos secundarios (nervaduras, burbujas) en la superficie reflectante con el paso del tiempo (fig

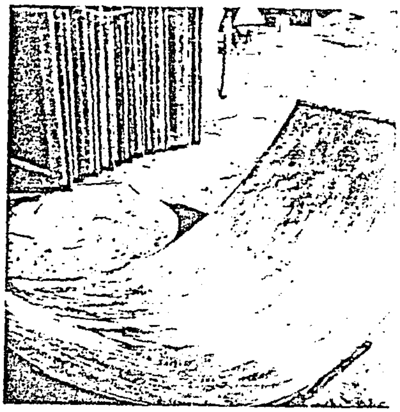
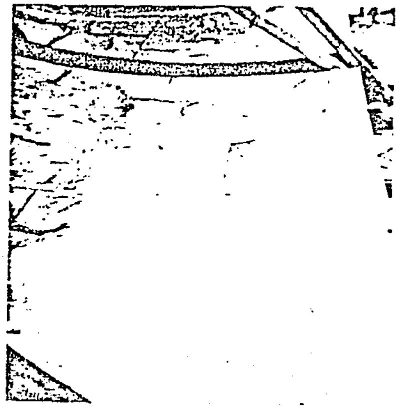
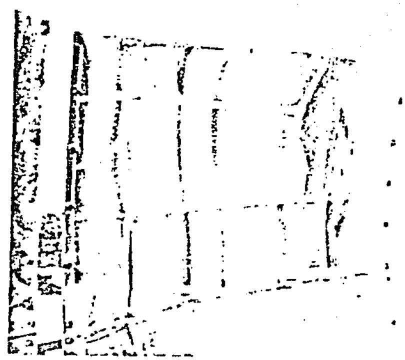


Fig 7.5 Lámina de aluminio empleado como sustrato.

Fig 7.6 Expulsión de la solución de detergente con una espátula de plástico.





Figs 7.7 y 7.8 Resultado de la aplicación del FEK sobre sustratos de fibra de vidrio y acrílico respectivamente, la calidad óptica del espejo es muy pobre.

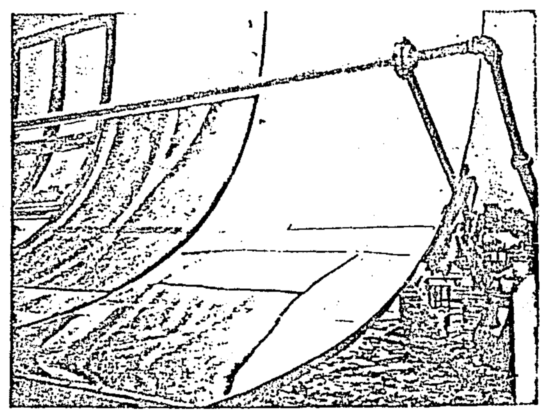


Fig 7.9 Acabado superficial del FEK aplicado sobre el sustrato de aluminio.

Fig7.10 La durabilidad del FEK sobre aluminio es mayor que sobre otro sustrato, la calidad óptico geométrica se conserva.

c) El aluminio electropulido (Kingston) presenta otra alternativa para la fabricación de los concentradores; este material consiste en una lámina de aluminio de alta pureza (99.99%), pulida mediante un proceso electrolítico.

La aplicación de esta superficie es básicamente la misma que la del acrílico aluminizado y que el sustrato de aluminio mencionados anteriormente, la única diferencia es que el Kingston se presenta como lámina rolada y necesita plancharse antes de su aplicación.

Hasta la fecha el material que ha presentado mayor calidad (a simple vista) a lo largo de seis meses es el FEK 244; no obstante es necesario hacer un análisis a fondo (error de curvatura, reflectancia) para conocer el mejor material, tanto en durabilidad como calidad. Es importante recalcar que tanto el concentrador fabricado con FEK, como otros fabricados con acrílico, han estado expuestos al medio ambiente por medio año, y la mayoría de los acrílicos ya se han degradado, mientras el FEK (adherido sobre aluminio) sigue igual que cuando se fabricó el concentrador.

El problema del aluminio Kingston es su baja reflectancia (también a simple vista) y la fragilidad de la superficie reflectante.

8 CONCLUSIONES

La eficiencia óptica es la máxima a la que puede aspirar un concentrador solar, por tal motivo es necesario seleccionar, o bien desarrollar, materiales que permitan incrementar esta eficiencia sin incrementar los costos.

La ventaja de emplear una superficie selectiva en lugar de una negra en el receptor se ha hecho evidente en este trabajo, por lo tanto hay que tratar de obtener superficies selectivas estables con el paso del tiempo.

El error de curvatura de los concentradores limita el diseño de los mismos a razones de concentración altas. Para los concentradores fabricados en el Instituto de Ingeniería se encontró un error de curvatura de 6.62 mrad el cual impide diseñar para razones de concentración mayores de 25. Este error se podría disminuir si se contase para la fabricación de los moldes con maquinaria de precisión.

El material reflejante más adecuado que se ha encontrado para la superficie concentradora es el FEK-244, desafortunadamente éste es un material de importación demasiado costoso. Existen posibilidades de desarrollar en México espejos de alumínio sobre sustratos poliméricos lisos, sin embargo aún no se obtiene buena aderencia.

La gran mayoría de modelos matemáticos existentes para el diseño de un concentrador son incompletos debido a que el modelamiento de la transferencia de calor en el receptor es un problema muy complicado. En este trabajo se ha presentado un avance de un modelo matemático de un receptor sin cubierta de vidrio, la solución numérica del mismo mostró estabilidad al paso de integración. En general el método de colocación ortogonal presenta grandes perspectivas en la solución numérica de modelos, lineales o no lineales, que resultan en muchas áreas de la Ingeniería. Tiene la ventaja de que es fácil de implementar computacionalmente, y además lleva a aproximaciones comparables a un método de mínimos cuadrados. Se espera que esta técnica sea útil al incluir en las ecuaciones de balance los términos de convección libre en el espacio anular al considerar un receptor con envolvente.

Con respecto a la radiación solar se puede decir que la correcta interpretación de las relaciones existentes para estimar el recurso solar evita equivocaciones serias en el dimensionemiento y análisis de comportamiento térmico de sistemas solares.

R E F E R E N C I A S

1. Almanza, R., López S., Total Solar Radiation in Mexico using sunshine hours and meteorological data, Solar Energy, Vol. 21, N° 5, 1978.

2. Almanza R., López S., Utilización de las superficies selectivas en la Energía Solar, Instituto de Ingeniería, UNAM, 378 (1976).

3. Almanza R., Valdés A., López S., Solar Concentrators, NTIS, PB-82-157553, USA, 1981.

4. Almanza R., Mora J.L., Theoretical Behaviour During the Day and the Year of a Solar System Using Cylindrical Parabolic Collectors, Colloques Internationaux du CNRS, N° 306 - Systemes Solaires Thermodynamiques. STS 80-68.

5. Alvarez C.J., Alvarez R.J., Solution of Summatian difference equations by collocations techniques, 1986. Enviado para revisión a Chem. Eng. Sci.

6. Alvarez R.J., Alvarez C.J., Martínez V.C., Aproximación de distribuciones de especies poliméricas mediante polinomios. VII Congreso Nacional de AMIQUID, Oaxtepec, Mor. Mayo de 1986.

7. Benford F., Bock J.E., A time analysis of Sunshine, Trans. Am. Illumination Eng. Soc., 34,200, 1939.

8. Bennet C.O., Myers J.E., Momentum, Heat, and Mass transfer, third edition, McGraw-Hill, 1983.

9. Bether R.M., et al, Environmental Effects on Solar Concentrator Minors, Solar Energy, Vol 27, N° 6, 1981.

10. Biennert, et al., "Two Dimensional Analysis of Parabolic Trough Collector, University of Minnesota, January 1973.

11. Bingham C.E., Posner D.M., A Method for estimating hourly Solar Radiation for Parabolic Trough Collectors, SERI, Colorado, USA.

12. Biggs F., Vittitoe C.N., "Mathematical Modeling of Solar Concentrators" Proceedings of ISES Conference, August 1976, Winnipeg, Canada.

13. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., Transport Phenomena, Wiley, 1960.

14. Boes E.C., Fundamentals os Solar Radiation, Handbook of Solar Energy, McGraw-Hill.

15. Braun J.E., Mitchell J.C., Solar Geometry for fixed and tracking Surfaces, Solar Energy, Vol. 31, N° 5 pp.439-444, 1983.

16. Butler B.L., Pettit R.B., Optical Evaluation Tecniques for Reflecting Solar Concentrators. Vol. 114, Optics Applied to Solar Energy Conversion, 1977.

17. Choudhury N.K.D., Solar Radiation al New Delhi, Solar Energy, 7, 44,(1963).

18. Clifford R., Hay J.E., An Assesment of Models wich use Satellite Data to estimate Solar Irradiance at the Earth's Surface, American Meteorological Society, 1984.

19. Collares-Pereira M., Rabl A., The Average Distribution of Solar Radiation Correlations Between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Valves, Solar Energy, 22, 155 (1979)

20. Cooper P.I., Digital Simulation of Experimental Solar Still Data, Solar Energy, 14, 451 (1973).

21. Coulson K.L., Solar and Terrestrial Radiation, Academic Press, New York (1975).

22. Daniels F., Direct use of Sun's Energy. (1964), Yale University Press, New Haven, Conn., Paperback Edition (1973), Ballantine Books.

23. Duffie, J.A., Beckman W.A., Solar Energy Thermal Processes, Wiley, USA (1974)

24. Duffie J.A., Löf G.O.G., Focusing Solar Collectors for Power Generation, Sixth World Power Conference, Melbourne (1962).

25. Evans J.D., Equations for Determining the Focal Length of On Axis Parabolic Mirrors by He-Ne Laser Reflection, Applied Optics, Vol 11, N° 3, March (1972)

26. Evans J.D., Method for Aproximating the Radius of Curvature os Small Concave Spherical Mirrors using a He-Ne Laser, Applied Optics, Vol 10, N° 4, April (1971).

27. Fernández J.L., Estrada C.V., Cálculo de la Radiación Solar Instantánea en la República Mexicana, Instituto de Ingeniería, UNAM, Serie Azul, 472, 1983.

28. Galindo I., Chávez A., Estudio del clima solar en la República Mexicana I. Radiación solar total, Instituto de Geofísica, UNAM, 1977.

29. Hansche B.D., Comunicación Privada, Sandia Laboratories, Junio (1980).

30. Hottel H.C., A simple model for estimating the transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmospheres, Solar Energy, 18, 129(1976).

31. ISES, Glossary of terms used in Solar Energy, Solar Energy, 33, (1984).

32. Klein S.A., Solar Energy, 13, 325(1977).

33. Kreider J.F., Medium and High Temperature Solar Processes, Academic Press, U.S.A. (1979).

34. Kreith F., Kreider J.F., Principles of Solar Engineering, McGraw-Hill, U.S.A. (1978).

35. Liu B.Y.H., Jordan R.C., The Interrelationship and Characteristic Disrtibution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, Solar Energy, 4, 3(1960).

36. Lunde, P.J., Solar Thermal Engineering, Wiley and Sons, pp-91-92, 1980.

37. McAdams W.H., Heat Transmission, Third Edition, McGraw-Hill,1954.

38. Pettit R.B., Characterization of the Reflected Beam Profile Of Solar Mirror Materials, Solar Energy, 19(1977)

39. Pettit R.B., Butler B.L., Laser Ray and Bidirectional Reflectometry Measurements of various Solar Concentrators, Sandia Labs, 1977.

40. Pettit R.B., Mahoney A.R., Portable Instrumentation for Solar Absortance and Emitance Measurements, Proceedings of Line Focus Solar Thermal Energy Technology Development Conf, Sept (1980).

41. Rabl A., Bendt P., Gaul H.W., Optimization of Parabolic Trough Solar Collectors, Solar Energy, 29, 5(1982).

42. Ruth, D.W., Chant R.E., The Relationship of Diffuse Radiation to Total Radiation in Canada, Solar Energy, 18, 153 (1976).

43. Smietana R.G., et al., A New Look at the correlation of K_d and K_t Ratios and at global Solar Radiation Till Models using one minute Measurements Solar Energy, 32, 1 (1984).

44. Stenhill G., Diffuse and Cloud Radiation in Israel, Solar Energy, 10 (2), 96 (1966).

45. Sternberg S., Celestial Mechanics, W.A. Benjamin Inc, New York (1969).

46. Stormberg, R. P., Performance of Linear Solar Concentrating Collectors, First International Simposium on New Conventional Energy, International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy, June (1980).

47. Straulino R., Rodriguez V.L., Aplicación Experimental de un Algoritmo de Control a colectores Solares de Tipo canal parabólico. Memorias IX Reunión Nacional de Energía Solar, pp-107-111, Mérida , Yucatán, Oct. (1985).

48. Treadwell G.W., Design Considerations for Parabolic-Cylindrical Solar Collectors, Sand 76-0082, Sandia Labs, July (1976).

49. Tuller, S.E., The Relationship between Diffuse total and Extraterrestrial Solar Radiation, Solar Energy, 18, 259 (1976).

50. Valdés A., Almanza R., Dispositivi para Analizar Espejos Concentradores, Memorias de la IV Reunión Nacional de Energía Solar, pp 135-138, San Luís Potosí, SLP.(1980)

51. Valdés A., Almanza R., Obtención de Diferentes Parámetros Para la Estimación de la Eficiencia de Concentradores Solares, Memorias de la V Reunión Nacional de Energía Solar, pp 78-82, Guadalajara, Jal(1981)

52. Valkonen E.B., Karlsson B.C., Ribbing G., Solar Optical Propierties of Cu, Ag, Au, Cr, Fe, Co, Ni and Al, Solar Energy, 32, 2(1984).

53. Villadsen J., Michelsen M., Solution of Differential Equation Models by Polynomial Aproximation, Prentice Hall, New Jersey, 1978.

54. Whillier A., The Determination of Hourly Values of Total Radiation from Daily Summations, Arch. Met. Geoph. Biokl. series B,7,197(1956).