IV.- COLECTORES DE CONCENTRACIÓN DE MEDIA TEMPERATURA

pfernandezdiez.es

IV.1.- INTRODUCCIÓN

Para construir concentradores reflectores es necesario emplear superficies ópticas de grandes dimensiones. Los sistemas dióptricos, lentes de cristal, no se utilizan a causa de su fragilidad, peso y precio. Sin embargo existen colectores constituidos por un gran número de prismas de cristal de reflexión total de pequeño espesor, (sistemas catadióptricos), con un factor de reflexión del 95%; la reflectividad global es del orden del 90%, superior a la de los mejores espejos y no experimentan degradación con el paso del tiempo.

Los colectores de concentración utilizan sistemas ópticos reflectores y en algunos casos muy particulares, refractores, para aumentar la intensidad de la radiación solar que se dirige sobre una superficie receptora que la absorbe, (lentes Fresnel y lentes de líquido).

Contra mayor sea el flujo solar sobre esta superficie, menor será la zona necesaria para conseguir el mismo efecto térmico sobre un fluido, lo que supone una reducción de las pérdidas térmicas.

Sin embargo aparecen otros tipos de pérdidas como son el que estos colectores funcionan únicamente con la componente directa de la radiación, (no se aprovecha la difusa) y que aparecen pérdidas ópticas por defectos de enfoque y dirección; asimismo aparecen otros problemas, como:

a) Una mayor complicación de las características ópticas de los concentradores, por cuanto precisan de sistemas de orientación y seguimiento del Sol, para aprovechar al máximo la radiación solar incidente.

b) La existencia de flujos no estacionarios en los fluidos que circulan por el receptor.

c) Grandes variaciones tanto en la forma y diseño, como en las temperaturas y pérdidas térmicas de las superficies receptoras absorbentes; la amplia gama de configuraciones permiten la manipulación de una serie de nuevos parámetros de diseño.

d) Una mayor complejidad con la introducción de factores ópticos adicionales, que complican los balances

energéticos.

e) Una mayor calidad en los sistemas ópticos, ya que tienen que trabajar durante largos períodos de tiempo, lo que implica el que deben mantener inalterables sus propiedades ópticas contra la suciedad, erosión, oxidación, condiciones climáticas, etc.

Todo ésto supone un mayor coste del colector lo que introduce algunas restricciones en su utilización, aunque la aplicación de nuevos materiales reflectantes y mejoras en los sistemas de seguimiento, les confieren una cierta importancia práctica. La intensidad de la radiación en las superficies receptoras puede llegar a ser del orden de 4 a 1000 veces el valor de I_0 lo que puede implicar temperaturas relativamente elevadas y una mayor precisión en los mecanismos de seguimiento del Sol y enfoque en la superficie receptora, lo que encarece el equipo.

Un colector reflector de media temperatura se compone de dos partes fundamentales, el concentrador y el receptor. El concentrador es la parte del colector que refleja (o refracta) la radiación solar incidente sobre el mismo, dirigiéndola hacia el receptor, que la absorbe y transmite a un fluido térmico que circula por el mismo.

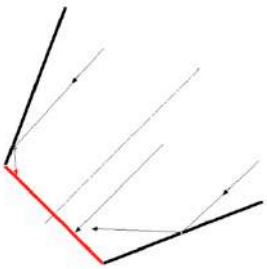
Al ser el Sol la fuente de energía, es muy importante conocer la imagen del mismo reflejada sobre el receptor. El ángulo con el que el Sol se ve desde la Tierra es de aproximadamente 32' y este dato hay que tenerle presente, (aparte de otros propios motivados por errores de seguimiento y reflexión, así como de la dispersión de la radiación por la superficie reflectora originados por defectos de fabricación, etc), a la hora de diseñar el dimensionamiento, tanto del concentrador, como del receptor.

IV.2.- TIPOS DE CONCENTRADORES

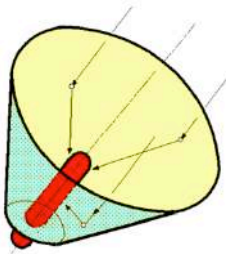
Existe una amplia variedad de medios que permiten aumentar el flujo de la radiación solar sobre un receptor pudiéndose clasificar teniendo en cuenta una serie de factores, como:

a) El que sean lentes o reflectores
b) Por el sistema de montaje y modelo de orientación
c) Por la magnitud de la concentración de radiación que son capaces de conseguir
d) Por los materiales utilizados en su construcción
e) Por los fluidos térmicos que se van a utilizar que dependen de sus aplicaciones, etc.

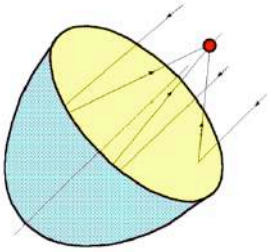
Una característica fundamental de estos colectores es el llamado índice de concentración A_a/A_r, que es la relación entre el área de la superficie de abertura del concentrador y el área de la superficie receptora. En las Fig IV.1 se muestran tres secciones de sistemas de colectores de concentración; en cualquiera de ellos se enfoca la radiación con más o menos nitidez sobre un receptor que puede ser puntual o tener una geometría determinada por las características del concentrador; el índice de concentración para colectores de revolución es mucho mayor que para colectores cilíndricos.



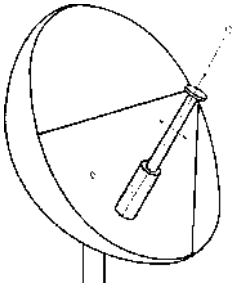
a) Receptor plano
Concentrador plano



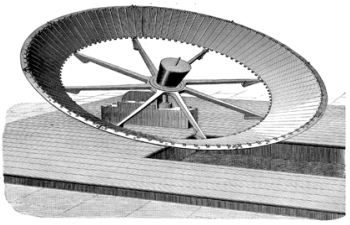
b) Receptor cilíndrico
Concentrador troncocónico

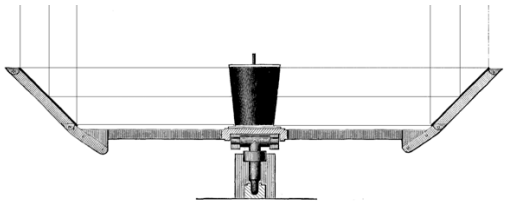


c) Concentrador paraboloide de revolución



Concentrador esférico fijo y receptor móvil, SRTA





e) Receptor y concentrador troncocónicos

Fig IV.1.- Algunas configuraciones de sistemas de concentración

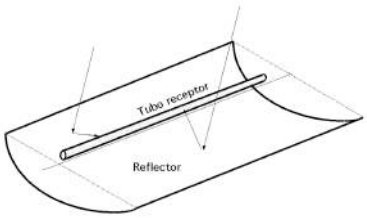
- *Receptor plano y concentrador-reflector plano*.- Tiene un bajo índice de concentración, inferior a 4; se aprovecha en el receptor parte de la componente solar difusa incidente sobre el colector.

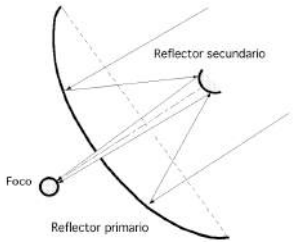
- *Receptor cilíndrico y concentrador-reflector cónico*.- Se mejoran las características de concentración del caso anterior

- *Receptor cilíndrico y concentrador-reflector esférico*.- Se mejoran las características de concentración de los casos anteriores

Concentrador-reflector tipo paraboloide de revolución.- Permite obtener relaciones de concentración muy elevadas, lo que a su vez implica elevadas temperaturas; una modificación del mismo introduce un segundo reflector que permite llevar al foco a otra posición más conveniente.

Colector con concentrador-reflector cilíndrico parabólico y receptor tubular.- Es el modelo más usado y en el que el tubo receptor se encuentra a lo largo de todas las posiciones focales. La temperatura alcanzada en el mismo puede llegar a ser del orden de los 300°C, suficiente para muchas aplicaciones. En la Fig IV.2.a se representa un concentrador cilíndrico parabólico, y en la Fig IV.2.b un concentrador cilíndrico parabólico con reflector secundario.

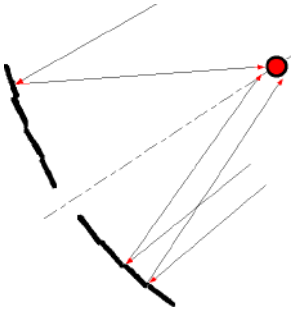


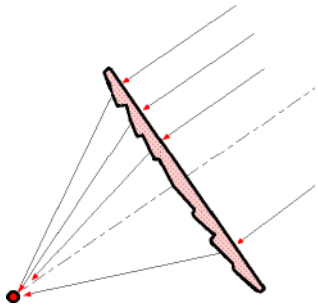


a) Concentrador c.p. general *b) Concentrador c.p. con reflector secundario*

Fig IV.2.- Concentradores cilíndrico-parabólicos

Concentrador de reflexión Fresnel y concentrador refractor Fresnel.- En el reflector Fresnel, Fig IV.3.a, las superficies pueden ser planas o curvas, estando diseñada cada una para reflejar individualmente la radiación sobre el receptor; su gran ventaja radica en su facilidad de construcción, siendo muy interesante su utilización en colectores solares de gran potencia y alta temperatura. El refractor Fresnel utiliza un sistema de concentración parecido a un montaje de lentes con un punto focal único, Fig IV.3.b





a) Reflector Fresnel *b) Refractor Fresnel*

Fig IV.3.- Concentradores Fresnel

IV.3.- ÁNGULO DE INCIDENCIA FORMADO POR LOS VECTORES $\vec{n}$ y $\vec{s}$

Un factor a tener en cuenta es la orientación del colector y el mecanismo apropiado que permita hacer un seguimiento lo más preciso posible del movimiento aparente del Sol, lo que implica en la mayoría de los casos tener que hacer uso de más de un sistema de movimiento.

Así, un concentrador cilíndrico parabólico tiene que tener un mecanismo de seguimiento del Sol que permita que su vector unitario $\vec{n}$ normal a la superficie de abertura y el vector unitario solar $\vec{s}$, conformen un plano que coincida con el plano focal que a su vez sea plano de simetría del concentrador y que por lo tanto contenga al receptor; con este montaje es posible obtener giros del colector alrededor de un sólo eje de giro que puede ser un montaje (Norte-Sur), (Este-Oeste), o inclinado y paralelo al eje de la tierra, con velocidad de giro de 15° por hora.

Sin embargo, el seguimiento perfecto del Sol se conseguirá cuando los vectores $\vec{n}$ y $\vec{s}$ coincidan, ya que en esas circunstancias, la superficie de abertura del colector será normal a los rayos solares incidentes; este montaje requiere la composición de dos movimientos o giros sobre dos ejes combina-

ción de los citados anteriormente, que se conoce como *Alt-acimut*; el movimiento se realiza mediante giros alrededor de un eje vertical y otro horizontal, existiendo otros tipos de movimientos relativos, pero siempre, el vector unitario normal $\vec{n}$ al plano de abertura, tiene que coincidir con la dirección de los rayos solares incidentes definida por el vector unitario $\vec{s}$.

El ángulo θ tiene una gran importancia en este tipo de colectores, por cuanto de él depende el valor de I_s que es la energía incidente por unidad de superficie sobre el concentrador reflector, de valor:

$$I_s = I_0 \cos\theta$$

Según sea el tipo de orientación y movimientos del colector necesarios para conseguirla, tendremos diversos valores para el ángulo θ destacando los siguientes:

a) Colector fijo, estando el plano de abertura normal a la radiación solar directa al mediodía de los equinoccios $(\lambda - \psi = 0)$, por lo que:

$$\cos\theta = sen\,\delta\ sen(\lambda - \psi) + \cos\delta\ \cos(\lambda - \psi)\ \cos\tau$$

$$\cos\theta = \cos\delta\ \cos\tau$$

b) Giro del colector sobre un eje horizontal (Este-Oeste) con un solo ajuste diario, de forma que la normal $\vec{n}$ al plano de abertura coincida con la componente directa de la radiación solar definida por el vector $\vec{s}$, al mediodía de cada día del año; ésto implica que $(\delta = \lambda)$, por lo que:

$$\cos\theta = sen\,\delta\ sen\,\lambda + \cos\delta\ \cos\lambda\ \cos\tau$$

$$\cos\theta = sen^2\delta + \cos^2\delta\ \cos\tau$$

c) Giro sobre un eje horizontal (Este-Oeste) con ajuste continuo de la altura del Sol, formando los vectores $\vec{n}$ y $\vec{s}$ un plano normal al de abertura de la superficie A_s

$$\cos\theta = \sqrt{1 - \cos^2\delta\ sen^2\tau}$$

d) *Giro sobre un eje horizontal (Norte-Sur) con ajuste continuo de la orientación:*

$$\cos\theta = \sqrt{(sen\ \lambda\ sen\ \delta + \cos\lambda\ \cos\delta\ \cos\tau)^2 + \cos^2\delta\ sen^2\tau}$$

e) Giro sobre un eje paralelo al eje de la Tierra, con ajuste continuo:

$$\lambda - \psi = 0,\ \tau = 0 \quad \Rightarrow \quad \cos\theta = \cos\delta$$

f) Giro sobre dos ejes perpendiculares, con ajuste continuo del seguimiento del Sol, de forma que siempre se cumpla que, $\vec{n} = \vec{s}$:

$$\cos\theta = 1$$

por lo que $I_s = I_0$ y los rayos solares inciden en todo momento normalmente al plano de abertura, paralelos al plano de simetría del colector.

IV.4.- ESTIGMATISMO

Si se considera un punto luminoso A que envía sobre un espejo un haz divergente de radiación cónico de vértice A', se puede admitir que el espejo proporciona del punto luminoso A una imagen A'.



Fig IV.4.- Estigmatismo

Como el haz cónico es convergente, A' es la imagen real de A. Si consideramos sólo imágenes reales, mediante el proceso inverso, un punto luminoso situado en A' proporcionaría una imagen en el punto A, por lo que los dos puntos A y A' son conjugados con relación al sistema óptico, es decir, éste es estigmático para el par de puntos A y A'.

Si se considera un espejo esférico cóncavo, (la superficie reflectante mira hacia el centro de curvatura C de la esfera) y de él un casquete, el polo S de éste es el vértice del espejo y el eje (CS) es el eje principal o eje de simetría del espejo. Un haz de rayos luminosos paralelos a (CS) se transforma, después de la reflexión, en un haz convergente en un punto F del eje principal que se llama *foco imagen* y se dice que F es la imagen del punto del infinito sobre el eje principal del espejo; recíprocamente, todo rayo incidente que pase por F se refleja paralelamente al eje.

Para un espejo esférico, F está en la mitad de (CS) y la distancia (CF) = *f*, es la distancia focal, Fig IV.5. El plano perpendicular al eje que pasa por F es el plano focal imagen. Un rayo luminoso que pase por el centro se refleja sobre sí mismo. Un espejo esférico no proporciona una imagen satisfactoria de un objeto, salvo que:

- *El espejo sea de pequeña abertura*
- *El objeto sea plano, pequeño, perpendicular al eje principal y centrado sobre él*
- *Las dimensiones del objeto y la abertura del espejo son tales que todos los rayos luminosos están centrados; en estas circunstancias se dice que el espejo trabaja en condiciones de aproximación de Gauss*

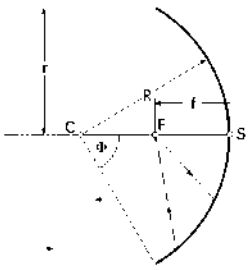


Fig IV.5.- Ángulo y radio de abertura; distancia focal

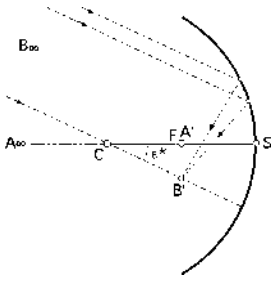


Fig IV.6.- Construcción de la imagen de un objeto en el infinito

Para la construcción geométrica de la imagen de un objeto perpendicular al eje principal del espejo y situado en el infinito, en nuestro caso el Sol, se parte de lo siguiente:

El plano objeto, el Sol, está en el infinito y su imagen en el plano focal; si el punto A∞ del centro del disco solar coincide con el eje principal del espejo, su imagen reflejada estará en F. Para un punto B∞ perteneciente a la circunferencia del disco solar, fuera del eje principal del espejo, cuya línea soporte pasa por C, forma un ángulo ε^* (pequeño) con el eje principal y su imagen está en el punto de intersección del plano focal y el eje secundario (B'C), apareciendo esta imagen en posición invertida.

En el triángulo (CA'B') se tiene que:

$$(A'B') = (CA')\ tg\ \varepsilon^* \cong \frac{(CS)}{2}\ \varepsilon^* = \frac{R\ \varepsilon^*}{2} \quad con:\ \varepsilon^* = 32' \ \acute{o}\ 0{,}00931\ rad$$

El diámetro de la imagen solar dada por un espejo cóncavo de 1 m de radio es:

$$(A'B') = \frac{R\ \varepsilon}{2} = \frac{1\ x\ 0{,}00931}{2} = 0{,}00465\ m$$

IV.5.- CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS SOBRE EL COLECTOR DE SUPERFICIE REFLECTANTE ESFÉRICA

En una superficie reflectante esférica, los rayos solares reflejados son tangentes a una superficie de revolución que se conoce como cáustica. Si se supone un rayo luminoso que incide sobre el espejo esférico de centro C en el punto P, Fig IV.7, el rayo reflejado es tangente a la cáustica en el punto M y corta a la línea (CS) en el punto A' y al plano focal en A. Las distancias (FA') y (FA) caracterizan, respectivamente, las variaciones longitudinal y transversal de la aberración esférica.

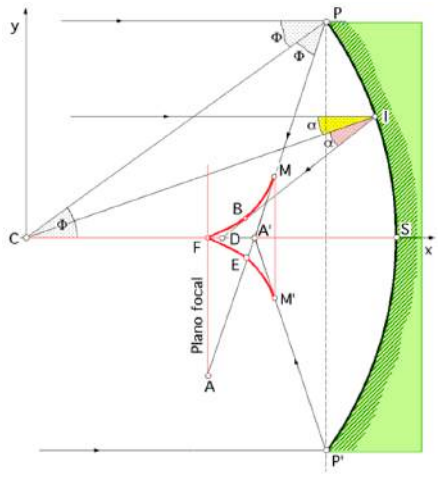


Fig IV.7.- Cáustica de un espejo esférico

Para el cálculo de (FA') y (FA) se define un ángulo Φ que es el ángulo de abertura del espejo; teniendo en cuenta las leyes de la reflexión, el triángulo (CPA') es isósceles, por lo que:

$$(CA') = \frac{R}{2\cos\Phi} \quad ; \quad (FA') = \frac{R}{2}\left(\frac{1}{\cos\Phi} - 1\right)$$

y como el ángulo (CPA') vale (2Φ) resulta:

$$(FA) = \frac{R}{2}\left(\frac{1}{\cos\Phi} - 1\right) tg\ 2\Phi$$

Si consideramos $\Phi = 45^o$:

$$(FA') = 0{,}21\,R \quad ; \quad (FA) = 0{,}21\,R\ tg\ 90^o = \infty$$

que significa que para esta situación, la imagen se extendería indefinidamente sobre el plano focal.

Si por los puntos 1, 2, 3, 4, 5, situados sobre el eje (CS) hacemos pasar unos planos perpendiculares a dicho eje, se obtiene la visualización energética en la que las zonas sombreadas son regiones situadas entre las dos zonas de la cáustica, en las que la acumulación de luz reflejada es más inten-

sa, Fig IV.8. El círculo de radiación mínima por el que pasan todos los rayos reflejados por el espejo se corresponde con la posición 3 y se conoce como círculo de difusión menor.

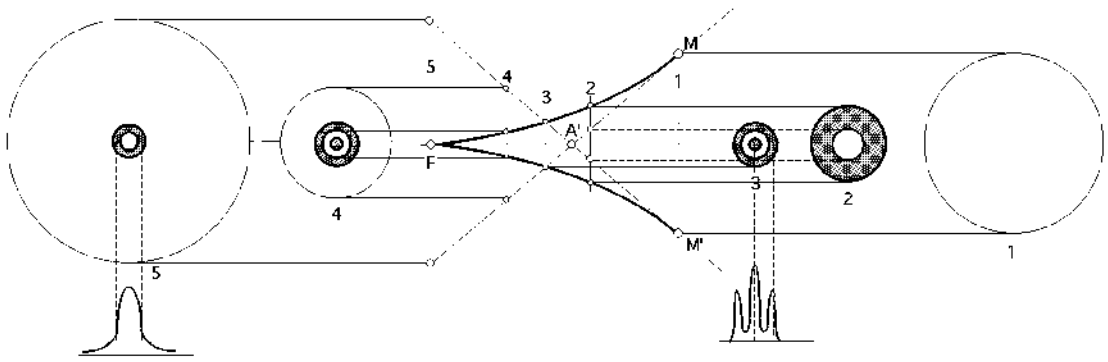


Fig IV.8 .- Distribución de la luz reflejada en diferentes secciones de la cáustica

La distribución de la luminosidad sobre este círculo es un poco compleja por cuanto presenta tres máximos.

En la posición 5 se tiene un máximo de luminosidad que se corresponde con el foco F.

A priori, el factor de concentración se calcula teniendo en cuenta que el diámetro d de la imagen solar en el punto F es:

$$d = 2\,\frac{R}{2}\,tg\,16' = R\,tg\,16' = \frac{R}{2}\,tg\,\varepsilon \;\cong\; \frac{R}{2}\,\varepsilon$$

El diámetro de apertura del espejo es: $D = 2\,R\,sen\;\Phi$, por lo que la relación entre las áreas de abertura y receptora es:

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{D^2}{d^2} = \frac{4\,R^2\,sen^2\Phi}{\frac{R^2\,\varepsilon^2}{4}} = \frac{16\,sen^2\Phi}{\varepsilon^2}$$

que no es exactamente el factor de concentración, por cuanto la imagen en F es la reflejada por puntos próximos a S; sólo sería válido si el ángulo F fuese muy pequeño.

Si se supone $\Phi = \frac{1}{10}$ radianes y $\varepsilon = 32' = 0{,}00931$ *radianes*, el valor del factor de concentración sería del orden de 1700 y éste espejo esférico de pequeña abertura sería un excelente concentrador.

A continuación vamos a determinar la concentración correspondiente al plano del círculo de menor difusión. Para hallar el diámetro de este círculo hay que determinar la ordenada del punto de intersección de la cáustica con el rayo reflejado extremo que pasa por el punto M.

Se mantiene el punto C como origen de coordenadas y como eje x la recta (CS).

Si la intersección de un rayo cualquiera paralelo a este eje con el espejo esférico es el punto I y el

rayo reflejado es tangente a la cáustica en B, que a su vez corta al eje x en D, se puede hallar la ecuación de la recta (ID) si se conocen estos puntos.

Las coordenadas del punto I son: $\begin{cases} R\ sen\ \alpha \\ R\ cos\ \alpha \end{cases}$

Las coordenadas del punto D son: $\begin{cases} \dfrac{R}{2\ cos\ \alpha} \\ 0 \end{cases}$

y la ecuación de la recta (ID): $x\ sen\ 2\ \alpha\ -\ y\ cos\ 2\ \alpha\ -\ R\ sen\ \alpha\ =\ 0$

La ecuación de la meridiana de la cáustica, envolvente de la recta (ID), se obtiene derivando la anterior respecto a α, obteniéndose:

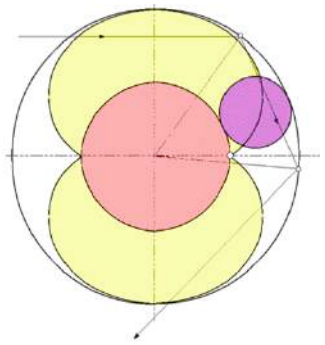


Fig IV.9.- Nefroide

$$2\ x\ cos\ 2\ \alpha\ +\ 2\ y\ sen\ 2\ \alpha\ -\ R\ cos\ \alpha\ =\ 0$$

Su intersección nos da: $\begin{cases} x = \dfrac{R}{2}\ cos\ \alpha\ (1 + 2\ sen^2\alpha\ ) \\ y = R\ sen^3\alpha \end{cases}$

que son las ecuaciones de una curva unicursal de 6º grado, llamada *nefroide* Fig IV.9, que es una epicicloide con dos puntos de retroceso engendrada por la rodadura, sin deslizamiento, de una circunferencia de radio R/4 sobre otra circunferencia de radio R/2 concéntrica con el espejo.

El rayo reflejado tangente a la cáustica en el punto extremo M tiene otro punto E sobre la nefroide. Si E es el más próximo a F le corresponde un valor de a relativamente pequeño, por cuanto a F le corresponde el valor (α = 0).

Para hallar este punto sustituimos los valores de (x, y) anteriores en la ecuación del rayo reflejado:

$$x\ sen\ 2\ \Phi\ -\ y\ cos\ 2\ \Phi\ -\ R\ sen\ \Phi\ =\ 0$$

$$\frac{R}{2}\ cos\ \alpha\ (1 + 2\ sen^2\alpha\ )\ sen\ 2\Phi\ -\ R\ sen^3\alpha\ cos\ 2\Phi\ -\ R\ sen\Phi\ =\ 0$$

$$\frac{cos\ \alpha\ (1 + 2\ sen^2\alpha\ )\ sen\ 2\Phi}{2}\ =\ sen^3\alpha\ cos\ 2\Phi\ +\ sen\Phi\ =\ 0$$

Sustituyendo $cos\alpha$ y $cos\ \Phi$ en función de $sen\ \alpha$ y $sen\ \Phi$, respectivamente y ordenándola en $sen\ \alpha$, se obtiene:

$$sen^6\alpha\ +\ 2\ sen^3\alpha\ sen\ \Phi\ -\ 4\ sen^3\alpha\ sen^3\Phi\ -\ 3\ sen^2\alpha\ sen^2\Phi\ +\ 3\ sen^2\alpha\ sen^4\Phi\ +\ sen^4\Phi\ =\ 0$$

y como el rayo reflejado es tangente a la cáustica, esta ecuación admite la raíz doble: $sen\ \alpha = sen\ \Phi$

Dividiendo la ecuación anterior por $(sen\ \alpha - sen\ \Phi)^2$, resulta:

$$sen^4\alpha + 2\ sen^3\alpha\ sen\,\Phi + 3\ sen^2\alpha\ sen^2\Phi + 2\ sen\alpha\ sen\,\Phi + sen^2\Phi = 0$$

y si α es muy pequeño, el binomio $(sen^4\alpha + 2\ sen^3\alpha\ sen\ \Phi)$ se puede despreciar, por lo que en primera aproximación se obtiene una ecuación de 2º grado en $sen\,\alpha$, de la forma:

$$3\ sen^2\alpha\ \ sen^2\Phi + 2\ sen\,\alpha\ sen\,\Phi + sen^2\Phi = 0$$

$$sen\,\alpha = \frac{-\ 1\ \pm\ \sqrt{1\ -\ 3\ sen^2\Phi}}{3\ sen\ \Phi} \quad \Rightarrow \quad sen\ \Phi < \frac{1}{\sqrt{3}}\ \ ;\ \ \Phi < 35^o$$

es decir, si el ángulo de abertura del espejo es demasiado grande, los rayos incidentes que caen cerca del borde del espejo, al reflejarse sobre la cáustica, lo hacen muy lejos del punto F y se reflejarían dos veces sobre el espejo.

Si se fija el ángulo Φ la ecuación de 4º encontrada se puede resolver; suponiendo $\Phi = 30^o$, obteniéndose:

$$sen^4\alpha + sen^3\alpha + 0{,}75\ sen^2\alpha + sen\ \alpha + 0{,}25 = 0$$

cuyas soluciones son: $\begin{cases} sen\ \alpha = -\ 0{,}3\ \ ; & \alpha = -\ 17{,}45^o \\ sen\ \alpha = -\ 1\ \ ; & \alpha = -\ 90^o,\ que\ no\ tiene\ sentido \end{cases}$

El radio del círculo de menor difusión es: $R\ sen^3\alpha$

El radio de abertura del espejo es: $R\ sen\ \Phi$

El factor de concentración medio, ya que la imagen no está definida uniformemente, es:

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{\pi\ R^2\ \ sen^2\Phi}{\pi\ R^2\ \ sen^6\alpha} = \frac{sen^2\Phi}{sen^6\alpha}$$

Para, $\Phi = 30 \ \Rightarrow\ C = \frac{sen^2\Phi}{sen^6\alpha} = \frac{sen^2\ 30^o}{(-\ 0{,}3\ )^6} = 343$

resultado que no es exacto porque no se ha tenido en cuenta el ángulo de dispersión de la luz solar ($\varepsilon = 32'$), que produciría un engrosamiento de la cáustica.

Suponiendo que el radio de curvatura del espejo reflector es R = 1 m, y que el diámetro de abertura del espejo es también de 1 m, se tiene:

Área del círculo de menor difusión: $\pi\ R^2 sen^6\alpha = \pi\ 1^2\ (0{,}3)^6 = 2{,}29.10^{-3} m^2$

Diámetro de éste círculo, 5,4 cm.

Fenómeno de coma.- Hemos supuesto, por simplificar, que la dirección de los rayos solares era paralela al eje principal del reflector esférico, con ajuste continuo del seguimiento del Sol, de forma

que siempre se cumple que, $\vec{n} = \vec{s}$. Pero si el espejo esférico debe permanecer fijo, aparece un nuevo tipo de aberración, de forma que la imagen reflejada sobre un plano perpendicular al eje principal no es de revolución, presentando una forma alargada y un máximo de luminosidad hacia una de sus extremidades. El conjunto presenta la forma de un cometa y de ahí el nombre de *coma* conque se conoce al fenómeno, que se acentúa contra más lejos esté del eje.

Para suprimir el defecto del coma y suponiendo una pequeña abertura del concentrador, se tiene que cumplir la condición del seno de Abbe que sólo una superficie esférica puede verificar, por lo que con un espejo esférico aislado no se podría obtener un factor de concentración muy elevado. *Por esta razón, en algunos tipos de concentradores, como el del horno solar de Natick (Massachusetts, USA), se utiliza un concentrador constituido por un mosaico de pequeños espejos esféricos.*

Sistema S.R.T.A.- El sistema S.R.T.A. consiste en un reflector esférico fijo y un colector o receptor cilíndrico móvil, centrado y orientado en todo momento en la dirección del Sol. Teniendo en cuenta la Fig IV.10, hay que determinar la abertura a dar al espejo de forma que todos los rayos incidentes al mediodía, paralelos al eje principal, le corten después de una sola reflexión.

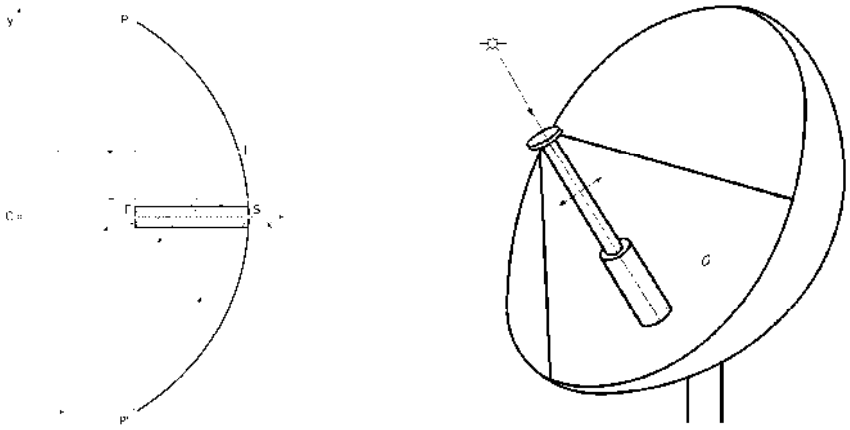


Fig IV.10.- Recepción sobre el eje del espejo del flujo solar reflejado

El rayo extremo reflejado pasa por el punto S y si P' es el punto de incidencia, el triángulo (CSP') es isósceles; para un ángulo de incidencia máximo, se transforma en un triángulo equilátero y el radio de abertura correspondiente vale: $\frac{R\sqrt{3}}{2}$

Los rayos incidentes paralelos al eje principal y exteriores al círculo de máxima abertura experimentan dos reflexiones antes de alcanzar al colector.

Si los rayos solares no son paralelos al eje principal por estar a otras horas distintas de las del mediodía, algunos de ellos alcanzarán dos reflexiones y otro pequeño número no cortan más al eje, por lo que hay unas pérdidas de energía del orden del 1%.

La longitud del colector cilíndrico es R/2

Para fijar las dimensiones del reflector hay que conocer el valor de la superficie de la imagen solar reflejada sobre el eje principal, que es variable, por cuanto la distancia desde los puntos de incidencia al eje es variable, siendo más grande cerca del reflector, que cerca del foco.

- *El diámetro de la imagen solar varía entre* $\begin{cases} d_{máx} = R\ \varepsilon \\ d_{mín} = R\ \varepsilon / 2 \end{cases}$, *con* $\varepsilon = 32'$

- *El camino mínimo (SF) de los rayos reflejados es R/2, y el máximo (P'S) de los rayos reflejados es R*

La superficie luminosa a lo largo del eje principal formada por la superposición de todas las imágenes parciales del Sol es, aproximadamente, cónica; su superficie es:

$$A = \frac{R}{2}\ \pi\ \frac{R\ \varepsilon + \frac{R\ \varepsilon}{2}}{2} = \frac{3}{8}\ \pi\ R^2\ \varepsilon$$

mientras que el área de interceptación de la radiación solar es, aproximadamente:

$$A' = \pi\ \frac{R\ \sqrt{3}}{2}\ \cos\alpha = \frac{3}{4}\ \pi\ R^2 \cos\alpha$$

siendo α el ángulo de incidencia de los rayos solares.

Se puede definir un factor de concentración para cada instante del día, de la forma: $C = \frac{A'}{A}$, y un factor de concentración medio: $\bar{C} = \frac{1}{\theta_s}\ \int_0^{\theta_s}\ C\ d\alpha$

El colector debe tener un diámetro mayor que el valor teórico para compensar errores de dirección, estado superficial reflectante, absorción de radiación difusa, etc.

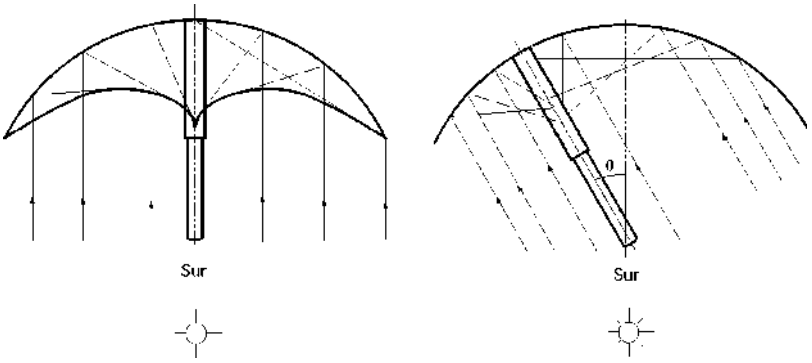


Fig IV.11.- Posiciones del colector del sistema SRTA para cuando el eje del espejo coincide con los rayos solares incidentes (incidencia normal) y para cuando no coinciden

Un ejemplo de colector de estas características está instalado en Boulder, Colorado, a 2400 m de altitud, de 10 m de diámetro, con superficie reflectante de aluminio pulido, orientación Sur, inclinado 55° sobre el horizonte

El colector tiene 2,7 m de longitud y está formado por un serpentín de cobre ennegrecido de 1,2 cm de diámetro y protegido por una cubierta de cristal. Genera vapor de agua a baja presión, que condensa en un depó-

sito de almacenamiento de 11 m^3, que contiene ladrillos de aluminio para almacenar la energía para la noche y para los días sin sol, hasta un máximo de 5 días consecutivos. También puede producir vapor sobrecalentado a 200°C que acciona una turbina para generar electricidad

El factor de reflexión del reflector es 0,86

La constante solar 0,92 kW/m^2

La temperatura del agua 71°C

El coeficiente de absorción de la superficie receptora es 0,9

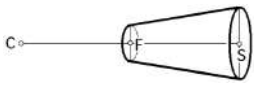


Fig IV.12.- Superficie luminosa a lo largo del eje principal

IV.6.- CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS SOBRE EL COLECTOR PARABÓLICO DE REVOLUCIÓN

Un paraboloide de revolución se obtiene por rotación de una parábola alrededor de su eje. A continuación vamos a exponer algunas propiedades de esta curva, de aplicación en concentradores de energía solar; un paraboloide es el conjunto de puntos situados a igual distancia de una recta fija (directriz) y de un punto fijo F, (foco), Fig IV.13.

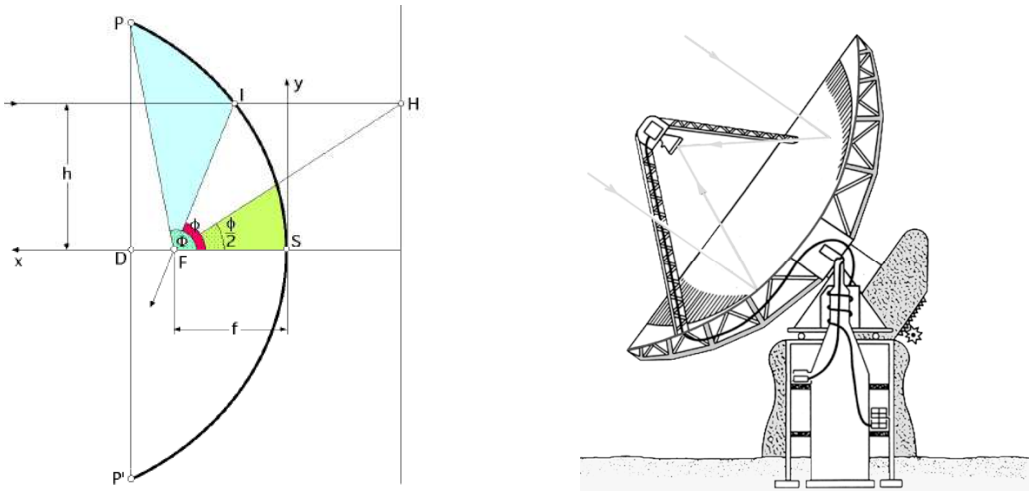


Fig IV.13.- Colector parabólico de revolución

La intersección de la parábola y su eje es el vértice S; si se elige este vértice como origen de coordenadas, la ecuación de la parábola es:

$$y^2 = 4 f x$$

en la que *f* es la distancia focal (SF).

En coordenadas polares de polo F, la ecuación de la parábola es:

$$\rho = \frac{f}{\cos^2 \frac{\Phi}{2}} \ , \ con: \ \Phi = 2 \ arc \ tg \ \frac{h}{2f}$$

El diámetro D de abertura del paraboloide y el ángulo máximo ϕ que le define, vienen relacionados por:

$$\phi = 2 \ arc \ tg \ \frac{D}{2f} \quad \Rightarrow \quad D = 4 f \ tg \ \frac{\phi}{2}$$

resultado que la superficie de abertura A_a de este paraboloide es:

$$A_a = \frac{\pi \ D^2}{4} = \pi \ \frac{16 \ f^2 \ tg^2 \frac{\phi}{2}}{4} = 4 \ \pi \ f^2 \ tg^2 \frac{\phi}{2}$$

El área del paraboloide se determina a partir del teorema de Guldin, en la forma:

$$A_\phi = \int_0^\phi 2 \ \pi \ y \ dS = \left| \begin{array}{l} dS^2 = d\rho^2 + (\rho \ d\phi)^2 \\ y = \frac{f \ sen \ \phi}{\cos^2 \frac{\phi}{2}} \ ; \quad dS = \frac{f \ d\phi}{\cos^3 \frac{\phi}{2}} \end{array} \right| = \int_0^\phi 2 \ \pi \ \frac{f \ sen \ \phi}{\cos^2 \frac{\phi}{2}} \ \frac{f \ d\phi}{\cos^3 \frac{\phi}{2}} =$$

$$= 2 \ \pi \ f^2 \int_0^\phi \frac{sen \ \frac{\phi}{2} \ d \ \frac{\phi}{2}}{\cos^4 \frac{\phi}{2}} = \ldots = \frac{8 \ \pi \ f^2}{3} \left(\frac{1}{\cos^3 \frac{\phi}{2}} - 1 \right)$$

La propiedad fundamental de un espejo parabólico es la de ser estigmático para el punto del ∞.

El diámetro d de la imagen del disco solar es:

$$d = f \ e \cong 0{,}01 \ f$$

es decir, el número que marca la distancia focal en metros es el mismo que marca la imagen solar en cm; se obtiene una imagen nítida del Sol si: $\frac{d}{f} < 0{,}1$

Cálculo de la concentración.- Si en el punto I del paraboloide se refleja un haz cónico de rayos solares, Fig IV.14, y si hacemos $(IF) = \rho$, en el plano focal se obtiene una elipse cuyos ejes son:

$$\left\{ \begin{array}{l} Eje \ menor: \ 2 \ b = (CE) = \rho \ \varepsilon \\ Eje \ mayor: \ 2 \ a = (CG) = \frac{\rho \ \varepsilon}{\cos \ \phi} \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} Area \ del \ círculo \ imagen \ de \ Gauss \ de \ diámetro \ (MN) \ es: A_1 = \frac{\pi \ f^2 \varepsilon^2}{4} \\ Area \ de \ la \ elipse \ correspondiente: A_2 = \pi \ a \ b = \frac{\pi \ f^2 \varepsilon^2}{4 \ \cos \ \Phi} \end{array} \right\} \Rightarrow \xi = \frac{A_1}{A_2} = \frac{f^2 \cos \ \Phi}{\rho^2}$$

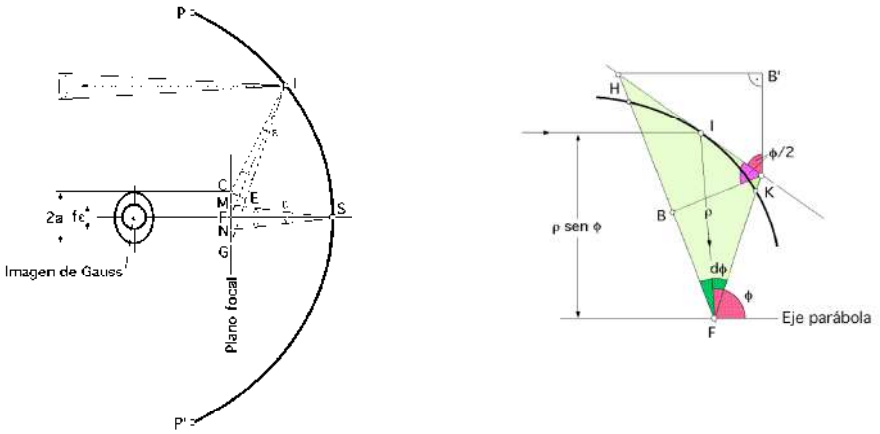


Fig IV.14.- Imágenes producidas en un concentrador parabólico

Si se considera un pequeño elemento (KH) del paraboloide, que se puede confundir con su tangente en I y si desde H se traza la paralela al eje de la parábola, recta (HB'), desde K la perpendicular a la recta (B'H) y desde K la perpendicular a (HF), siendo B el punto de intersección, resulta que (KH) es la bisectriz del ángulo (B'HB), por lo que (HB) = (KB') = $\rho\ d\phi$.

Si se hace girar el segmento elemental (KH) alrededor del eje del espejo se obtiene una corona elemental que proyectada sobre el plano focal origina un anillo elemental de área:

$$dA = 2\ \pi\ \rho^2\ sen\ \phi\ d\phi$$

Si la constante solar es I_0, la radiación recibida por el anillo en el plano de la imagen solar es:

$$dI_0 = 2\ \pi\ I_0\ \rho^2\ sen\ \phi\ d\phi$$

y la fracción de energía recibida por el disco focal:

$$dI_{focal} = 2\ \pi\ I_0\ f^2\ sen\ \phi\ cos\ \phi\ d\phi$$

Si llamamos D al diámetro de abertura del paraboloide de revolución y Φ al ángulo de abertura correspondiente, la energía por unidad de superficie es:

$$I_{focal} = 2\ \pi\ I_0\ f^2 \int_0^{\Phi} sen\ \phi\ cos\ \phi\ d\phi\ =\ \pi\ I_0\ f^2 sen^2\Phi$$

que se recibe en un disco de área

$$A_1 = \frac{\pi f^2 \varepsilon^2}{4}$$

por lo que la densidad de energía concentrada en dicho disco es:

$$I_{disco} = \frac{I_{focal}}{A_1} = \frac{\pi\ I_0\ f^2\ sen^2\phi}{\frac{\pi\ f^2 \varepsilon^2}{4}} = \frac{4\ I_0\ sen^2\phi}{\varepsilon^2}$$

y el factor de concentración:

$$C = \frac{I_{focal}}{I_0} = \frac{4\ sen^2\phi}{\varepsilon^2}$$

Para un ángulo de abertura máximo, $\Phi = 90^o$, $C = \frac{4\ sen^2 90^o}{0,00931^2} = 46150$, y si la constante solar I_0 es del orden de $1\ \frac{kW}{m^2}$, para un espejo con una distancia focal de 1 m, la superficie de la imagen de Gauss es:

$$A_1 = \pi\ \frac{1_x 0,00931^2}{4} = 6,8.10^{-5}\ m^2$$

y la densidad de energía concentrada en el disco:

$$I_{disco\ imagen} = C\ A_1 I_0 = 46150_x\ 6,8.10^{-5}\ m^2{}_x\ 1\ \frac{kW}{m^2} = 3,14\ kW$$

Pérdidas energéticas debidas a la geometría de la parábola.- Si definimos la eficiencia del espejo como la relación entre la energía del círculo imagen de Gauss y la energía incidente recibida por la superficie de abertura normal a los rayos solares en la forma:

$$\eta = \frac{I_0\ \pi\ f^2\ sen^2\Phi}{I_0\ \pi\ 4f^2\ tg^2\frac{\Phi}{2}} = cos^4\frac{\Phi}{2}$$

y para: $\Phi = 90^o \Rightarrow \eta = \frac{1}{4}$, por lo que el círculo imagen de Gauss no recibe más que la 4ª parte de la radiación incidente.

Concentración efectiva.- En lo anterior se ha supuesto que el concentrador paraboloide de revolución es perfecto y que no existe ningún tipo de obstáculo entre él y el Sol; pero la realidad es que en la concentración influyen una serie de factores que disminuyen la energía disponible sobre el plano focal.

Estas pérdidas son debidas a:

- *La reflexión*
- *La absorción*
- *Las irregularidades geométricas de la superficie reflectora*
- *La sombra de las monturas*
- *El soporte del horno*
- *Las imperfecciones de orientación, etc*

de forma que pueden llegar a adquirir una importancia considerable si se pretende obtener concentraciones elevadas.

En general, un horno solar se compone de dos tipos de espejos, uno parabólico fijo que concentra energía en el foco y otro plano que reenvía el haz de rayos solares a la zona de máxima temperatura,

con lo que se tienen dos espejos con las pérdidas correspondientes. Para los espejos recubiertos con plata o aluminio, las pérdidas son del orden del 10% para cada uno, en total un 20%. Las demás pérdidas son difíciles de evaluar, pero se pueden cuantificar entre un 30% y un 70%, según el tipo de construcción.

La relación entre la energía obtenida y la calculada a partir del factor de concentración es el factor F del horno que, en las mejores condiciones, no es superior a 0,6 para factores de concentración del orden de 20000.

Temperaturas obtenidas en un horno solar.- La energía recibida en el plano focal del espejo parabólico es absorbida por el sistema que se va a calentar, de forma que su temperatura aumenta debido a la conducción y radiación. La energía concentrada por unidad de superficie es $C\,I_0$, y si el horno se asimila a un cuerpo negro se puede admitir que toda esta energía se absorbe, por lo que:

$$C\ I_0 = \sigma\ T^4$$

Si $\begin{cases} I_0 = 1\ kW/m^2 \\ C = 20.000 \end{cases}$ se obtendría una temperatura absoluta del orden de 4300ºK, pero al no ser un cuerpo negro y tener pérdidas por conducción, esta temperatura no llegaría a los 4100ºK.



Figs IV.15.- El horno solar de Odeillo

Debido a las densidades de energía disponibles, la obtención de las temperaturas citadas puede ser muy rápida:

- *Un cuerpo mal conductor y muy absorbente necesita 0,5 segundos para ponerse a 2700ºC y 3 segundos si su poder emisivo es 0,4 (óxidos refractarios)*
- *Para los metales, la conductividad y el estado superficial hacen que el proceso sea más lento, del orden de 7 segundos*

IV.7.- CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS SOBRE LOS COLECTORES CILINDRICO-PARABOLICOS

La *superficie de abertura del concentrador*, es el área del mismo proyectada sobre un plano normal al plano de simetría. Para un colector cilíndrico parabólico es un rectángulo de dimensiones la anchura y longitud de la superficie reflectante. Si se considera un haz de rayos luminosos de abertura e incidente en el punto I del cilindro, el haz reflejado corta al plano normal en el eje de la parábola básica que define el perfil del cilindro, según una elipse de eje mayor (AB). En primera aproximación se puede admitir que el foco F de la parábola que pasa por el punto I es el centro de ésta elipse.



Fig IV.15- Concentrador cilíndrico parabólico

Si ahora se considera un haz incidente de ángulo ε cuyo eje pasa por el vértice de la parábola I', que coincide con el haz reflejado, $\vec{n}=\vec{s}$, siendo la imagen sobre el plano focal un círculo de Gauss.

Si el punto de incidencia I' sobre el reflector se mueve a lo largo de la línea (I'I"), el círculo de Gauss se traslada a lo largo de un rectángulo de longitud H y anchura ($f\varepsilon$), limitado por dos semicírculos de radio $(f\varepsilon/2)$, siendo f la distancia focal de la parábola.

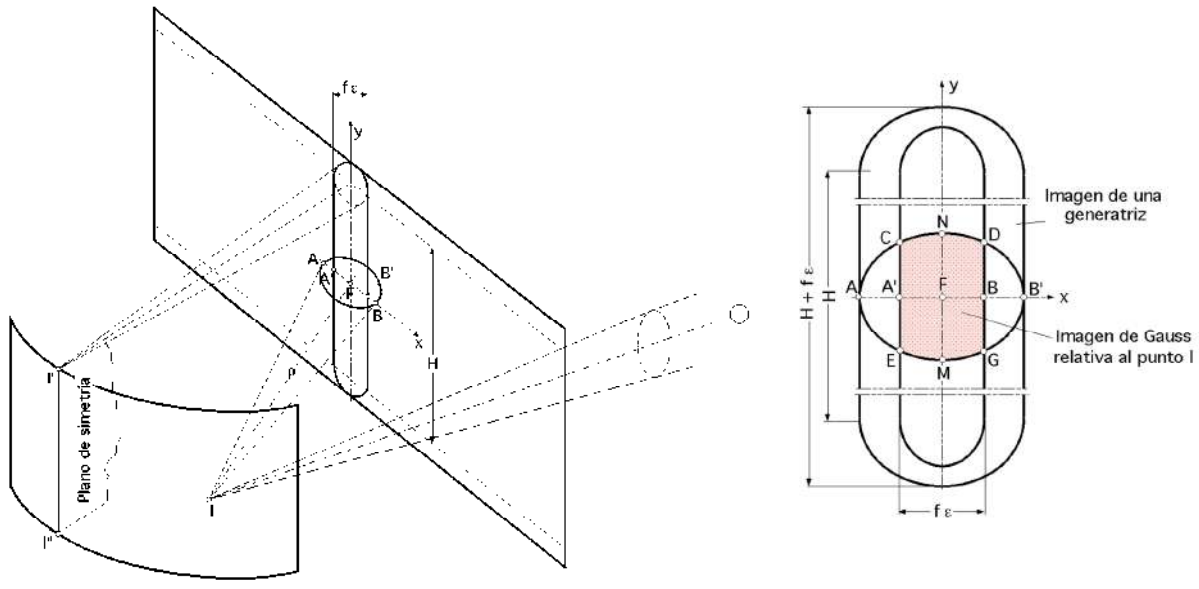


Fig IV.17.- Cálculo de la concentración producida por el concentrador cilíndrico parabólico

Si ($f\varepsilon$) es pequeño con relación a H, se puede admitir que la superficie del rectángulo es ($H\ f\varepsilon$), Fig IV.17. Los lados de este rectángulo cortan a la elipse en C, D, E, F y al eje Ox en A' y B'.

Para calcular el área de la parte sombreada (ECDGE), los ejes mayor (AB) y menor (MN) de la

elipse son:

$$(AB) = 2\ a = \frac{\rho\ \varepsilon}{\cos\ \phi} \quad ; \quad (MN) = 2\ b = \rho\ \varepsilon$$

La superficie elemental sombreada A_1 vale, aproximadamente:

$$A_1 = f\ \varepsilon_x\ \rho\ \varepsilon = f\ \rho\ \varepsilon^2$$

y la superficie de la elipse (ACDBGE) es:

$$A_2 = \frac{\pi\ \rho^2 \varepsilon^2}{4\ \cos \Phi}$$

por lo que:

$$\xi = \frac{A_1}{A_2} = \frac{f\ \rho\ \varepsilon^2}{\frac{\pi\ \rho^2 \varepsilon^2}{4\ \cos\ \Phi}} = \frac{4\ f \cos\ \Phi}{\pi\ \rho}$$

Para el ángulo $d\Phi$: $\begin{cases} La\ imagen\ total\ elemental\ es: \ dA_1 = H\ \rho\ d\Phi \\ La\ imagen\ de\ Gauss: \ dA_2 = H\ \rho\ \xi\ d\phi \end{cases}$

y si I_0 es la constante solar, la energía que incide sobre un espejo de ángulo de abertura Φ es:

$$I_{focal\ \Phi} = 2\ I_0\ H \int_0^{\Phi} \rho\ \xi\ d\phi = 2\ I_0\ H \int_0^{\Phi} \rho\ \frac{4\ f\ \cos\ \phi}{\pi\ \rho}\ d\phi = \frac{8\ I_0\ H\ f}{\pi} \int_0^{\Phi} \cos\ \phi\ d\phi = \frac{8\ I_0\ H\ f\ sen\ \Phi}{\pi}$$

El factor de concentración, que nos da una idea del orden de magnitud disponible, es:

$$C = \frac{Energía\ en\ la\ superficie\ de\ Gauss}{Energía\ en\ la\ elipse\ de\ Gauss} = \frac{8\ I_0\ H\ f\ sen\ \Phi}{I_0\ \pi\ H\ f\ \varepsilon} = \frac{8\ sen\ \Phi}{\varepsilon\ \pi}$$

La concentración maximal se obtiene para $\Phi = 90^\circ$ y vale:

$$\frac{8}{\varepsilon\ \pi} = \frac{8}{0{,}00931\ \pi} = 273$$

La temperatura máxima que se puede obtener sobre un cuerpo negro situado en la línea focal del espejo sería del orden de 1200ºC.

Otra forma de obtener las dimensiones de las imágenes solares reflejadas sobre el plano focal, consiste en suponer que el concentrador, Fig IV.18, refleja sobre un receptor plano y normal al eje del concentrador, de longitud L; el diámetro de la imagen solar sobre el receptor (ab) que se ve desde el punto P, viene dada por:

$$(ab) = 2\ \rho\ tg\ 16'$$

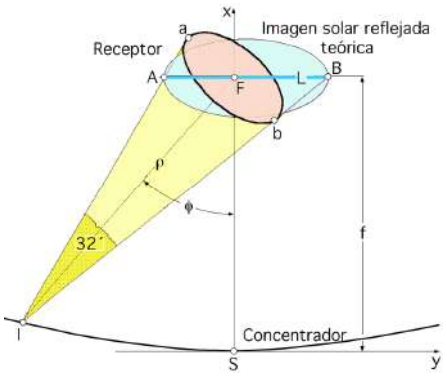


Fig IV.18.- Imagen reflejada teórica del Sol en un colector cilíndrico parabólico

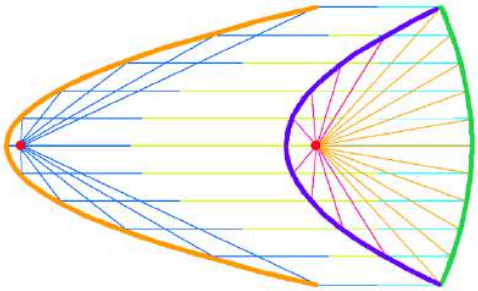


Fig IV.19.- Distintos puntos focales

siendo la longitud: $L = \dfrac{(ab)}{\cos\,\phi} = \dfrac{2\,\rho\,tg\;16'}{\cos\,\phi}$

Si el perfil del concentrador es parabólico y la distancia (SF) es la distancia focal f, se puede definir ésta como:

$$y^2 = 4\,f\,x$$

En el punto I se tiene que:

$$\begin{cases} x_1 = f - \rho\,\cos\,\phi \\ y_1 = \rho\,sen\,\phi \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \rho^2\,sen^2\phi = 4\,f\,(f - \rho\,\cos\,\phi)$$

$$\rho^2 + \frac{4\,f\,\cos\,\phi}{sen^2\phi}\,\rho - \frac{4\,f^2}{sen^2\phi} = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{2\,f\,(1 - \cos\,\phi)}{sen^2\phi} = \frac{2\,f}{1 + \cos\,\phi}$$

lo que permite hallar el tamaño de la imagen solar teórica reflejada sobre el receptor para $f_{máx}$.

Las dimensiones mínimas del receptor son:

$$L = \frac{2\,\rho\,tg\;16'}{\cos\,\phi} = \frac{4\,f\,tg\;16'}{\cos\,\phi\,(1 + \cos\,\phi)}$$

Mediante la distancia focal *f* se determina el tamaño de la imagen solar reflejada y mediante la superficie de abertura A_a la energía total que puede concentrar, por lo que el flujo de energía en el foco receptor será función de la relación $\dfrac{A_a}{f}$

Energía útil sobre el receptor; pérdidas térmicas.- Vamos a considerar un concentrador cilíndrico parabólico (CCP); un balance energético del mismo, en la posición ***x*** permitirá determinar la ganancia útil q_u del colector por unidad de superficie de abertura según se muestra en la Fig IV.20:

$$q_u = I_s\;\rho\,F\varphi\,(\tau\;\alpha) - U_C\;(T_{r,x} - T_a)\,\frac{A_r}{A_a}$$

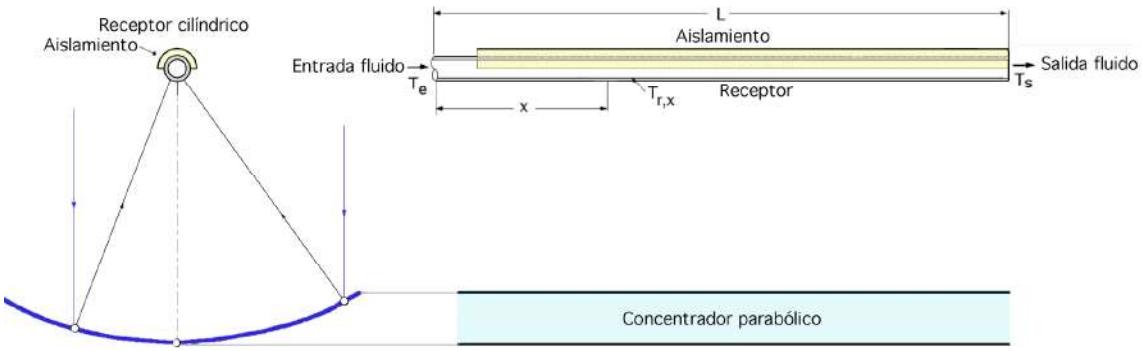


Fig IV.20.- Balance energético en un colector cilíndrico-parabólico

y si todo el receptor está a una temperatura uniforme T_r la ganancia útil total será:

$$Q_u = q_u \; A_a = A_a \; I_s \; \rho \; F_\varphi \; (\tau \; \alpha) - U_C \; A_r \; (T_r - T_a)$$

siendo:

- A_a *la superficie de abertura del colector, sin sombras, y* A_r *la superficie del receptor*

- $C = \dfrac{A_a}{A_r}$ *el factor de concentración que permite obtener flujos de energía comparables a los de cualquier intercambiador industrial convencional*

- ρ *la reflectancia especular de la superficie reflectora*

- F_φ *la fracción de energía reflejada que es interferida por el receptor y que constituye el factor de intercepción*

- I_s *la radiación solar directa normal al plano de abertura del concentrador*

- $U_c\,(T_r - T_a)$*, son las pérdidas térmicas por unidad de superficie del receptor hacia el exterior;* T_r *es la temperatura media del receptor y* T_a *es la temperatura del medio exterior; estas pérdidas se reducen al aumentar el factor de concentración C*

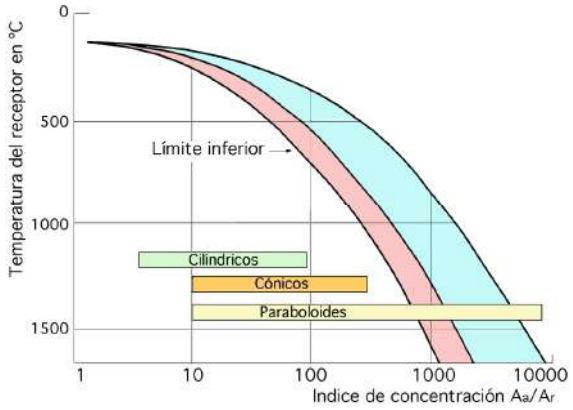


Fig IV.21.- Relaciones entre el nivel de concentración y temperaturas de funcionamiento del receptor

En la Fig IV.21, la curva de *límite inferior* representa los niveles de concentración en los que las pérdidas térmicas son iguales a la energía absorbida, mientras que los niveles superiores dan una

ganancia útil. La zona rayada se corresponde con eficiencias del colector del orden del 40% al 60% y representa el campo de funcionamiento normal; también se indica el campo en el que se pueden utilizar determinados tipos de reflectores. Cuanto menor sea la superficie del receptor, las pérdidas térmicas serán también menores; si ésta superficie receptora fuese puntual, las pérdidas térmicas serían cero; de ésto se deduce que la ganancia de energía útil y las curvas de eficiencia se acercan a medida que se reducen las pérdidas térmicas.

Pérdidas ópticas.- La reflectancia especular ρ se define como la fracción de energía solar directa incidente que se refleja hacia el receptor según las leyes de la reflexión, de forma que el ángulo de incidencia y el reflejado, ambos respecto a la normal en un punto cualquiera de la superficie reflectora, sean iguales; las pérdidas por reflexión son de la forma, $1 - \rho$.

Se consigue una reflectancia elevada utilizando depósitos metálicos o pinturas sobre substratos metálicos o sobre cristal. En colectores cilíndrico parabólicos (CCP) se suelen utilizar láminas de aluminio anodizado, o también películas de plástico metalizadas en vacío, como películas de poliéster aluminizado, que permiten obtener unos valores altos de la reflectividad durante grandes períodos de funcionamiento del colector. La transmitancia τ y la absortancia α tienen el mismo significado que en los colectores de placa plana, aunque sus valores difieren, dado que las condiciones de diseño también son diferentes pudiendo considerar las siguientes:

- Los concentradores no tienen cubiertas y τ *no influye en el balance energético,* $\tau = 1$

- Si el receptor es de cavidad, el valor de α *tiende a la unidad, con una emitancia elevada*

- τ *y* α *dependen del ángulo medio de incidencia que en un diseño tiene que ser inferior a 60°*

- El factor de interceptación F_φ *representa la fracción de energía reflejada en el concentrador, que es interceptada a su vez por el receptor de energía; éste factor* F_φ *es una propiedad del concentrador y de su sistema de orientación al producir la imagen solar y del receptor y de su posición en el colector, al interceptar una parte de dicha imagen solar.*

- Las pérdidas correspondientes son de la forma $1 - F_\varphi$

La distribución del flujo solar se considera como una función de la posición dentro del área A_r del receptor, Fig IV.22; el área bajo la curva de distribución es la energía reflejada en el plano focal. Si el receptor tiene una anchura, (AB) = 2a, la energía interceptada viene dada por el área sombreada entre A y B, pudiéndose poner el valor de

$$F_\varphi = \frac{\int_{-a}^{+a} I(a)\ da}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(a)\ da}$$

Condiciones análogas se pueden aplicar al caso de concentradores de revolución.

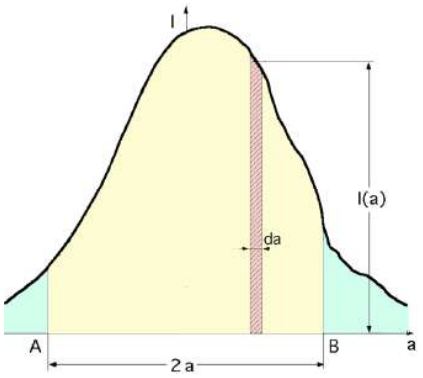


Fig IV.22.- Energía interceptada por el receptor

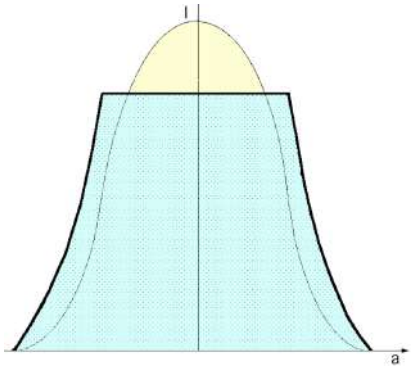


Fig IV.23.- Distribución del flujo solar teórico sobre una superficie normal al eje del reflector

El rendimiento óptimo de un colector se obtiene con un factor $F_{\varphi} < 1$; la optimización del tamaño del receptor proporciona una ganancia máxima de energía útil:

- Reduciendo al máximo las pérdidas ópticas

- Aumentando las pérdidas térmicas

mientras que, para un receptor pequeño, implica pérdidas térmicas bajas y pérdidas ópticas altas.

En consecuencia, un dimensionado adecuado del receptor implica el tener que compaginar ambos tipos de pérdidas de energía. La distribución del flujo solar teórico reflejado por un receptor parabólico, sobre una superficie tangente al receptor, de forma que la normal a esta superficie coincida con el eje del haz reflejado, viene dada por la Fig IV.22; la distorsión de la distribución real frente a la ideal, puede ser debida a los siguientes factores:

- Irregularidades en la superficie del reflector que provocan una dispersión y difuminación de la imagen solar sobre el receptor

- Errores en la orientación del colector, que amplifican y desplazan la imagen solar sobre el receptor

- Errores de tipo constructivo que originan una posición incorrecta de la imagen solar sobre el receptor

La *eficiencia óptica del colector* se define como: $\rho F_{\varphi} (\tau \alpha)$

Distribución del flujo normal sobre el receptor en concentradores cilíndrico parabólicos.- La distribución del flujo teórico normal, (línea de trazos en la Fig IV.23), se puede poner en la forma:

$$I = I_{máx}\ e^{-h^2 (\frac{a}{W})^2} = \left| I_{máx} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\,\pi}} = \frac{h}{W\sqrt{\pi}} \right| = \frac{h}{W\sqrt{\pi}}\ e^{-h^2 (\frac{a}{W})^2}$$

en la que:

I es la densidad del flujo de radiación

$I_{máx}$ *es la densidad de flujo máximo en la línea central*

h es el coeficiente normal de distribución de flujo

2a es la longitud característica del receptor (anchura)

2 W es la longitud característica del concentrador = la anchura del plano de abertura del mismo

σ *, es la desviación standard de la curva de distribución normal*

Para una distribución simétrica el factor

$$F_\varphi = \frac{\int_0^{\frac{h\,a}{W}} e^{(\frac{h\,a}{W})^2}\, d(\frac{h\,a}{W})}{\int_0^{+\infty} e^{(\frac{h\,a}{W})^2}\, d(\frac{h\,a}{W})} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{h\,a}{W}} e^{(\frac{h\,a}{W})^2}\, d(\frac{h\,a}{W})$$

Los valores de F_φ se obtienen mediante la Tabla de valores de la función de error de Gauss, Tabla IV.1, definida en la forma:

$$G(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2}\, du = F_\varphi\,, \text{ en la que: } u = \frac{h\,a}{W}$$

Tabla IV.1.- Función de error de Gauss

u	G(u)	u	G(u)	u	G(u)	u	G(u)	u	G(u)
0,00	0,00000	0,46	0,48466	0,92	0,80677	1,38	0,94902	1,84	0,99074
0,02	0,02256	0,48	0,50275	0,94	0,81627	1,40	0,95228	1,86	0,99147
0,04	0,45110	0,50	0,52050	0,96	0,82542	1,42	0,95538	1,88	0,99216
0,06	0,06762	0,52	0,53790	0,98	0,83423	1,44	0,95830	1,90	0,99279
0,08	0,09008	0,54	0,55494	1,00	0,84270	1,46	0,96105	1,92	0,99338
0,10	0,11246	0,56	0,57162	1,02	0,85084	1,48	0,96365	1,94	0,99392
0,12	0,13476	0,58	0,58792	1,04	0,85865	1,50	0,96610	1,96	0,99443
0,14	0,15695	0,60	0,60386	1,06	0,86614	1,52	0,96841	1,98	0,99489
0,16	0,17901	0,62	0,61941	1,08	0,87333	1,54	0,97059	2,00	0,995322
0,18	0,20094	0,64	0,63459	1,10	0,88020	1,56	0,97263	2,10	0,997020
0,20	0,22270	0,66	0,64938	1,12	0,88079	1,58	0,97455	2,20	0,998137
0,22	0,24430	0,68	0,66278	1,14	0,89308	1,60	0,97635	2,30	0,998857
0,24	0,25670	0,70	0,67780	1,16	0,89910	1,62	0,97804	2,40	0,999311
0,26	0,28690	0,72	0,69143	1,18	0,90484	1,64	0,97962	2,50	0,999593
0,28	0,30788	0,74	0,70468	1,20	0,91031	1,66	0,98110	2,60	0,999764
0,30	0,32863	0,76	0,71754	1,22	0,91553	1,68	0,98249	2,70	0,999866
0,32	0,34913	0,78	0,73001	1,24	0,92050	1,70	0,98370	2,80	0,999925
0,34	0,36936	0,80	0,74210	1,26	0,92524	1,72	0,98500	2,90	0,999959
0,36	0,38933	0,82	0,75381	1,28	0,92978	1,74	0,98613	3,00	0,999978
0,38	0,40901	0,84	0,76514	1,30	0,93401	1,76	0,98719	3,20	0,999994
0,40	0,42839	0,86	0,77610	1,32	0,93806	1,78	0,98817	3,40	0,999998
0,42	0,44749	0,88	0,78669	1,34	0,94191	1,80	0,98909	3,60	1,000000
0,44	0,46622	0,90	0,79691	1,36	0,94556	1,82	0,98994		

Distribución del flujo normal sobre el receptor en concentradores paraboloides de revolución.- Para una superficie reflectante del concentrador tipo paraboloide de revolución la función de distribución normal es:

$$\frac{I}{I_{máx}} = e^{-h^2(\frac{r}{R})^2}\,, \text{ siendo: } I_{máx} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} = \frac{h}{R\sqrt{\pi}} \Rightarrow I = \frac{h}{R\sqrt{\pi}}\, e^{-(\frac{h\,r}{R})^2}$$

siendo ***r*** el radio de la superficie receptora y R el radio de la superficie de abertura del concentrador.

El factor de interceptación es:

$$F_\varphi = \frac{\int_{-r/R}^{r/R} I\, d(\frac{r}{R})}{\int_{-\infty}^{+\infty} I\, d(\frac{r}{R})} = \frac{I_{máx} \int_0^{r/R} e^{-(\frac{h\,r}{R})^2}\, 2\,\pi\,(\frac{r}{R})\, d(\frac{r}{R})}{I_{máx} \int_0^{+\infty} e^{-(\frac{h\,r}{R})^2}\, 2\,\pi\,(\frac{r}{R})\, d(\frac{r}{R})} = 1 - e^{-(\frac{h\,r}{R})^2}$$

que expresa una relación entre el factor de interceptación F_φ y la relación entre los radios $\frac{r}{R}$ permitiendo un cálculo fácil de F_φ para sistemas de concentración con simetría axial.

IV.8.- OTROS TIPOS DE CONCENTRADORES

Evolvente de círculo.- Se han experimentado espejos reflectores cilíndricos basados en la evolvente del círculo, en los que por definición, las normales a la evolvente son tangentes al círculo, de forma que todos los rayos incidentes sobre este reflector se reflejan hacia el círculo, Fig IV.24. Sin embargo no se suele utilizar como un espejo único, sino que va acoplado a otro cilíndrico-parabólico que permite enviar al receptor cilíndrico los rayos que no podrían ser captados por la evolvente del círculo, Fig IV.25.

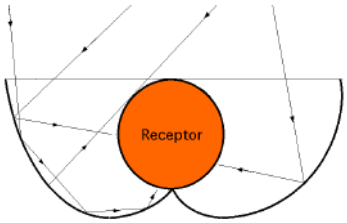
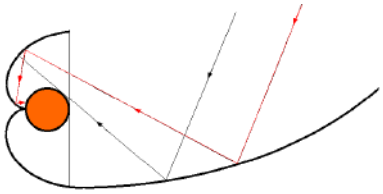


Fig IV.24.- Reflector evolvente de círculo



Fg IV.25.- Reflector cilíndrico parabólico acoplado a otra evolvente de círculo

Concentrador parabólico compuesto.- El concentrador parabólico compuesto es un sistema en forma de barco en el que las paredes tienen un perfil determinado. Está construido de manera que no forma la imagen del Sol porque la obtención de una imagen, al menos como nosotros la hemos visto en el caso del paraboloide, es incompatible con la búsqueda de una concentración sin pérdida de energía. Se demuestra que en un sistema constituido de una pupila de entrada de diámetro d_1, de una pupila de salida de diámetro d_2, si el ángulo de abertura de un haz luminoso incidente es a el factor de concentración maximal es:

$$C = \frac{d_1}{d_2} = \frac{n_2}{n_1}\ \frac{1}{sen\ \alpha}$$

siendo n_1 y n_2 los índices de refracción a la entrada y a la salida.

El perfil del concentrador está compuesto por dos porciones de parábola simétricos, en las que los

ejes están inclinados un ángulo θ respecto al eje de simetría, de forma que el foco de una de ellas se encuentra en el extremo de la otra. Si se toma el punto O como origen de coordenadas, se puede comprobar que las ecuaciones del perfil en paramétricas son:

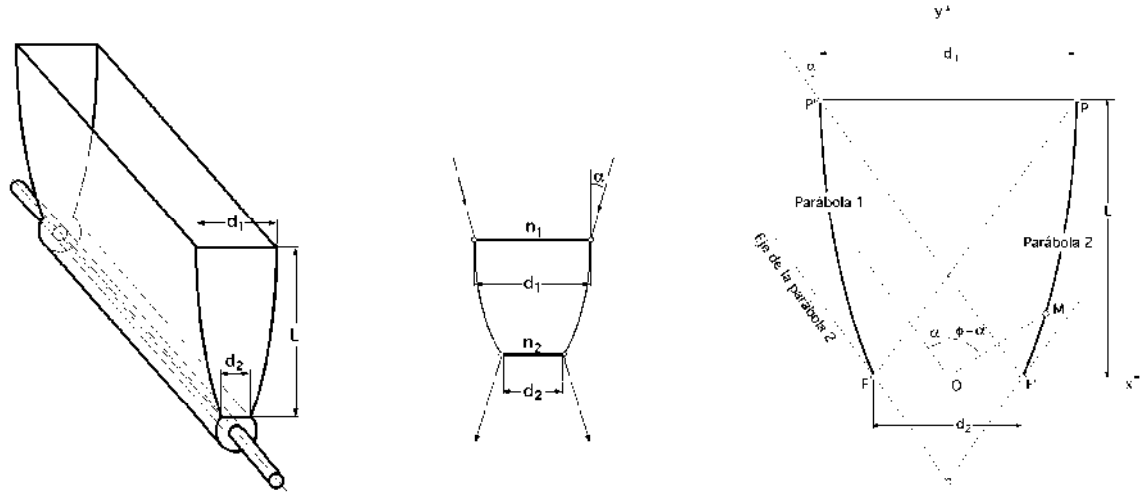


Fig IV.26.- Concentrador parabólico compuesto

$$x = \frac{d_2\ (1 + sen\ \alpha)\ sen\ (\phi\ -\ \alpha)}{1\ -\ cos\ \phi}\ -\ \frac{d_2}{2}$$

$$y = \frac{d_2\ (1 + sen\ \alpha)\ sen\ (\phi\ -\ \alpha)}{1\ -\ cos\ \phi}$$

en las que ϕ es un parámetro igual al ángulo que forma el rayo (OM) con la paralela a (P'F') que pasa por el punto O.

Las tangentes en los extremos P y P' son paralelas al eje de simetría del concentrador.

La altura del colector viene dada por:

$$L = \frac{d_1 + d_2}{2}\ cotg\ \alpha$$

y para $n_1 = n_2$ se obtiene la relación:

$$\frac{L}{d_2} = \frac{C\ +\ 1}{2}\ \sqrt{C^2\ -\ 1}$$

que fija la longitud L del colector en función de C, si se conoce d_2

La longitud L es importante; si por ejemplo: $d_2 = 10$ cm, con $C = 10$, se tiene $L = 5{,}5$ m. Una disminución del valor de L en 1/3, apenas modifica el ángulo de abertura, pero influye sensiblemente en el precio de las superficies reflectantes y, por lo tanto, del colector.

En la Tabla IV.2 se indican algunos parámetros y sus valores correspondientes para distintos grados de concentración. La gran ventaja de este tipo de colector es que prácticamente permanece

fijo, precisando de algunos ajustes en la orientación según la época del año, captando la radiación directa durante un importante número de horas a lo largo del día, como se indica en la Tabla IV.3.

El nº de horas de captación disminuye al aumentar la concentración; así, por ejemplo, en el solsticio pasa de 7 horas para C= 10 y $\alpha = 6º$, a 4,4 horas para C = 28,6 y $\alpha = 2º$.

Tabla IV.2.- Valor de algunos parámetros para distintos grados de concentración

Concentración	*Ancho abertura* d_1 *(cm)*	*Ancho receptor* d_2 *(cm)*	*Altura L (cm)*	*Semiángulo abertura*
3	*70,5*	*24*	*100*	*20°*
5	*45,5*	*8*	*100*	*12°*
10	*30,5*	*3*	*100*	*8°*

Tabla IV.3.- Captación de la radiación directa durante un número de horas a lo largo del día, para $\alpha = 6°$ *y C = 10*

Estación	*Declinación* δ	*Duración de la captación (horas)*
Equinoccio	*0°*	*12*
Equinoccio	*7,5°*	*9*
Equinoccio	*15°*	*7,5*
Solsticio	*23,5°*	*7*

El colector está orientado en la dirección Este-Oeste, con un inclinación β en dirección Sur sobre el horizonte, Fig IV.27. Si el ángulo cenital solar es θ_s se captarán las radiaciones directa y difusa siempre que el ángulo θ entre los vectores normal al plano de abertura $\vec{n}$ y radiación directa solar $\vec{s}$ valga:

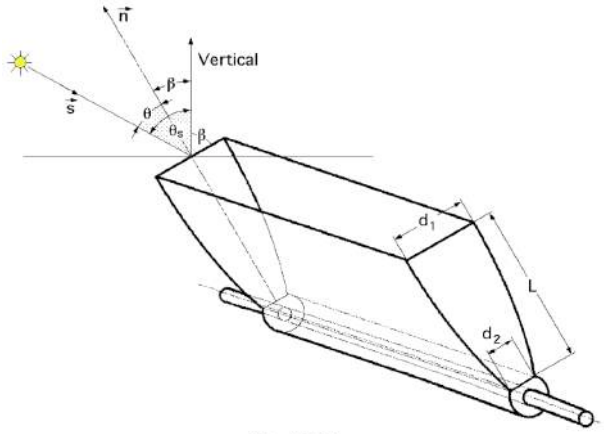


Fig IV.27

$$\theta = \theta_s - \beta \leq \alpha$$

Si $\theta > \alpha$ no se capta la radiación directa y sí la difusa, sobre una superficie igual a la del receptor de anchura d_2.

El sistema de concentrador parabólico compuesto se puede utilizar asociado a un captador plano para reforzar la concentración, Fig IV.28 y actuar como dispositivo antiradiante.

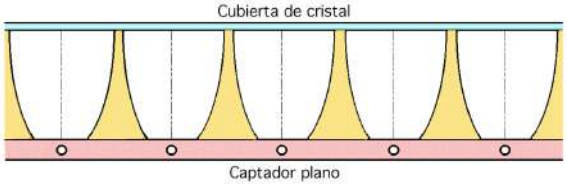


Fig IV.28.- Concentrador parabólico compuesto asociado a un captador plano

También se pueden asociar dos colectores ideales con índices de refracción diferentes, Fig IV.29,

con lo que se aumenta la concentración en la relación $\frac{n_2}{n_1}$ permitiendo ángulos de abertura del orden de 35º; para un acoplamiento cristal-aire, la relación $\frac{n_2}{n_1} = 1{,}5$.

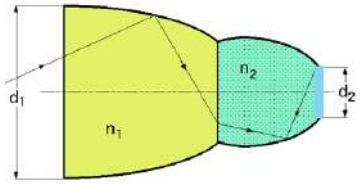


Fig IV.29.- Asociación de dos concentradores parabólicos, con índices de refracción diferentes

Concentradores troncocónicos.- Los espejos troncocónicos pueden servir para irradiar una zona focal lineal. El reparto de la radiación reflejada no es muy homogéneo a causa de la variación de la superficie reflectora lateral entre las bases del tronco de cono.

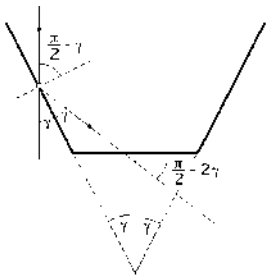
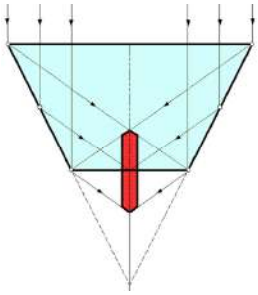


Fig IV.30.- Concentrador troncocónico, recepción en la base



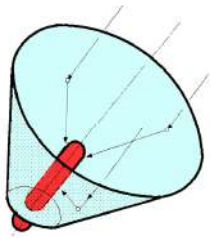


Fig IV.31.- Concentrador troncocónico; recepción en el eje

Si el ángulo en el vértice del cono es 2γ, Fig IV.30, se puede comprobar que la condición para que un haz incidente paralelo al eje del espejo, se refleje en la primera reflexión en la base del cono para $\gamma < 45^o$, es:

$$\frac{\pi}{2} - 2\gamma > 0$$

- *Si, $\gamma = 45^o$, la radiación incidente se refleja sobre el eje produciéndose la máxima concentración*
- *Si, $\gamma > 45^o$, la radiación es reflejada hacia arriba*
- *Si el cono tiene la suficiente altura, para cualquier valor del ángulo en el vértice, la radiación reflejada acaba siempre abandonando el colector*

Los espejos cónicos no son buenos concentradores. Sin embargo, para algunas aplicaciones muy concretas, como por ejemplo, captando la imagen de Gauss, formada en el vértice de un concentrador parabólico, en la base mayor del espejo troncocónico, se puede inducir la concentración a su valor máximo sin que aparezcan pérdidas importantes de flujo.

IV.9.- RENDIMIENTO TÉRMICO DE UN COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO

Vamos a considerar un concentrador cilíndrico parabólico y un receptor circular sin cubierta $(\tau = 1)$, alrededor del cual no existen gradientes de temperatura.

El coeficiente de transmisión de calor entre el tubo a T_r y el fluido a T_F que circula por su interior es h_{cF} y el coeficiente global de pérdidas al exterior U_c, de la forma:

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_{viento}} + \frac{1}{h_r}$$

siendo: $\begin{cases} h_r \text{ el coeficiente de radiacin, igual a : } h_r = 4\ \sigma\ \varepsilon_r\ \hat{T}^3 \\ \varepsilon_r \text{ la emitancia del receptor} \\ \hat{T} \text{ la temperatura media de la radiación} \end{cases}$

Como el flujo de calor es elevado, hay que tener en cuenta el coeficiente de transferencia de calor por conducción k, desde la superficie exterior del tubo receptor, a la interior, por lo que el coeficiente global de transmisión de calor U basado en el diámetro exterior d_e del tubo, desde la superficie exterior al fluido, es:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_C} + \frac{d_e}{h_{cF}\ d_i} + \frac{d_e}{2\ k}\ ln\ \frac{d_e}{d_i}$$

La ganancia útil de energía por unidad de longitud L del receptor, en función de T_r y T_a, es:

$$Q_u = \frac{A_a}{L}\ I_s\ \rho\ F_\varphi\ (\tau\ \alpha) - U_C\ \frac{A_r}{L}\ (T_r - T_a) = \frac{A_a\ S}{L} - U_C\ \frac{A_r}{L}\ (T_r - T_a) = \left| \begin{array}{l} A_a = 2\ W\ L \\ A_r = \pi\ d_e\ L \\ S = I_s\ \rho\ F_\varphi\ (\tau\ \alpha) \end{array} \right| =$$

$$= 2\ W\ S - U_C\ \pi\ d_e\ (T_r - T_a)$$

y la temperatura del receptor:

$$T_r = T_a - \frac{Q_u\ L - A_a\ S}{U_C\ A_r}$$

Si se pone la ganancia útil de energía, por unidad de longitud L, en función de los términos de transferencia de energía al fluido, entre T_r y T_F, se obtiene:

$$Q_u = \frac{\pi\ d_i (T_r - T_F)}{\frac{d_e}{h_{cF} d_i} + \frac{d_e}{2\ k}\ ln\ \frac{d_e}{d_i}} = \frac{\pi\ d_i (T_r - T_F)}{\frac{1}{U} - \frac{1}{U_C}} = \frac{\frac{A_r}{L}\ (T_r - T_F)}{\frac{1}{U} - \frac{1}{U_C}} \quad \Rightarrow \quad T_r = T_F + \frac{Q_u L}{A_r} \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{U_C} \right)$$

Igualando las expresiones de T_r se tiene:

$$T_r = T_a - \frac{Q_u L - A_a S}{U_C\ A_r} = T_F + \frac{Q_u L}{A_r} \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{U_C} \right)$$

Despejando Q_u resulta una expresión que depende de T_F y T_a:

$$Q_u = \frac{U\ A_r}{L}\ (-\ T_F + T_a + \frac{A_a\ S}{U_C\ A_r}) = \frac{U}{U_C}\ \frac{A_a}{L}\ \{S\ -\ U_C\ \frac{A_r}{A_a}\ (T_F - T_a)\} = F\ \frac{A_a}{L}\ \{S\ -\ U_C\ \frac{A_r}{A_a}\ (T_F - T_a)\}$$

siendo $F = \frac{U}{U_c}$ *el factor de eficiencia del colector.*

La expresión anterior se puede poner en función de la temperatura T_{F1} del fluido a la entrada y en función de un factor de evacuación de calor F_R del receptor al fluido, que se define como:

$$F_R = \frac{Ganancia\ energética\ útil}{Ganancia\ energética\ útil\ si\ la\ superficie\ del\ receptor\ está\ a\ T_{F_1}} = \frac{G\ c_p}{A_r\ U_C}\ (1 - e^{-\frac{A_r\ U_C\ F}{G\ c_p}})$$

siendo G el flujo másico, resultando:

$$Q_u = A_a\ F_R\ \{S\ -\ \frac{A_r\ U_C}{A_a}\ (T_{F_1} - T_a)\}$$

Si el receptor estuviese recubierto habría que tener en cuenta el producto transmitancia absortancia ($\tau\ \alpha$) y evaluar de nuevo U_c, por cuanto aparecen resistencias adicionales de transmisión de calor.

Si el receptor funciona como caldera (vaporizador), resulta que F es igual a F_R por cuanto no hay gradientes de temperatura en la dirección del flujo; si una parte del receptor funciona como caldera (vaporizador) y el resto como calentador de líquido, cada tramo correspondiente a un efecto hay que tratarlo por separado.

El rendimiento térmico se define en la forma: $\eta = \frac{Q_u}{I_s\ A_a} = \frac{Q_u}{I_0\ \cos\ \theta\ A_a}$

IV.10.- EFECTOS DE LA CAPACIDAD TÉRMICA

Los efectos de la capacidad térmica para colectores de concentración de media temperatura, se pueden calcular de la misma forma que para los colectores de placa plana. Los concentradores se encuentran inicialmente a la temperatura ambiente o próximos a ella, por lo que para determinar la capacidad térmica de los mismos habrá que tener en cuenta qué partes del sistema van a influir en este efecto, cuando se modifique la temperatura, al poner el colector en régimen de trabajo.

Como el receptor tiene una superficie más pequeña que el colector equivalente de placa plana, su capacidad térmica por cada ºC que se modifique su temperatura puede ser significativamente más baja. No obstante, la variación de la temperatura de un receptor de un CCP puede ser muy superior a la del colector de placa plana y, por lo tanto, el efecto de la capacidad de almacenamiento de calor

puede ser significativo; este efecto se puede considerar como el resultado de dos factores, como son:

a) La energía necesaria para calentar el colector desde la temperatura de la noche a su temperatura definitiva de funcionamiento durante el día

b) El efecto transitorio de funcionamiento del colector bajo condiciones meteorológicas variables

La variación de la temperatura desde la ambiental de la noche a las de régimen de funcionamiento son predecibles y se puede calcular la energía necesaria para lograr dicha variación. El efecto transitorio por cambios meteorológicos es más difícil de predecir por cuanto una interrupción en la radiación directa debida a la nubosidad reduce a cero la entrada de radiación directa en el reflector, produciendo caídas de temperatura mayores que en los colectores de placa plana.

IV.11.- RENDIMIENTO EXPERIMENTAL DE LOS CCP

El rendimiento de los colectores de concentración depende de una amplia gama de factores, no pudiéndose utilizar ningún método general que permita el cálculo de cualquiera de ellos en forma generalizada, por lo que hay que resolver cada problema como un caso particular.

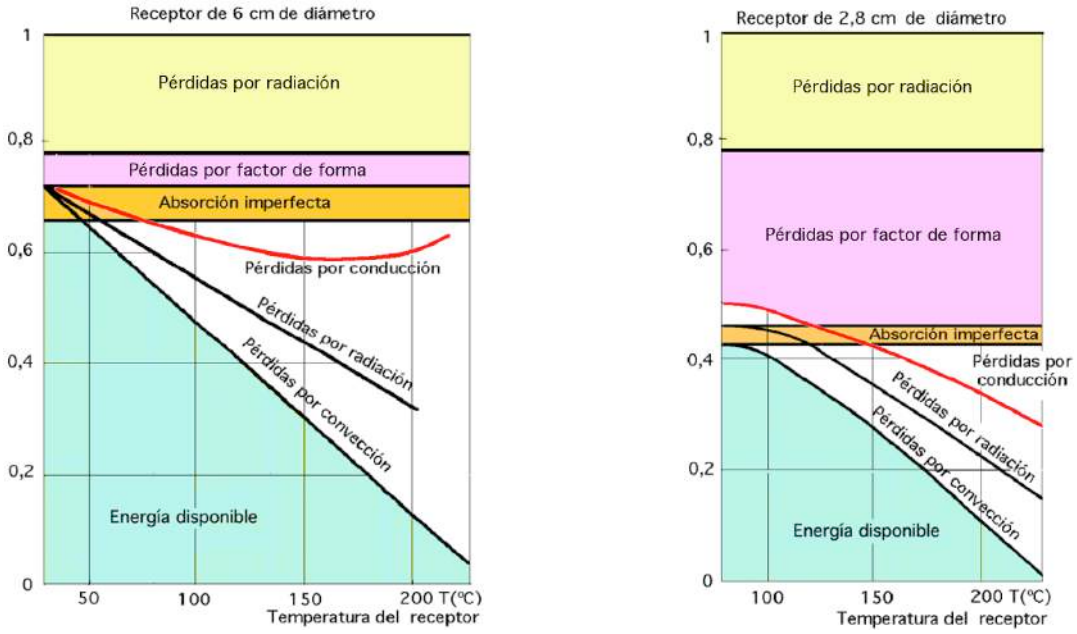


Fig IV.32.a.b.- Distribución de la energía solar incidente para diversos receptores

A título de ejemplo se presentan los datos relativos a un colector (CP) cuyo reflector cilíndrico-parabólico tiene una abertura de 1,89 m, una longitud de 3,66 m y una distancia focal de 0,305 m con receptores tubulares sin protección, de varios tamaños, con una mano de pintura negra no selectiva de absortancia 0,95. Se puede suponer un dispositivo de seguimiento que permite diseñar a este colector para hacerle girar sobre un eje polar a 15°/hora, (paralelo al eje de la Tierra) y funcionar en una amplia gama de temperaturas, desde las próximas a la del medio ambiente (calentando agua fría que fluye a alta velocidad), hasta otras del orden de 180°C (que puede comprender flujos a pre-

sión y también vaporizaciones).

Los factores de interceptación F_φ se calculan para varios tamaños del receptor, a partir de una serie de medidas de la distribución del flujo solar en el tubo focal, que es muy parecida a una curva normal de distribución, pero desplazada, como sabemos, respecto a la posición del foco teórico. Los resultados de muchas medidas de los balances energéticos se compendian en las Fig IV.32.a.b, que muestran la conversión de la energía solar directa incidente en ganancia útil, funcionando en régimen estacionario con sol brillante, así como varias pérdidas térmicas para dos tamaños del tubo receptor.

A partir de estos resultados es posible predecir los efectos que se pueden introducir en el diseño. Por ejemplo, si se supone un determinado colector que utiliza una superficie selectiva de emitancia $\varepsilon = 0{,}2$, se reducen las pérdidas de radiación en un 80% del valor mostrado para cualquier temperatura, aunque no obstante, las pérdidas de radiación no son las pérdidas más significativas. Las mejoras prefijadas más evidentes para este colector consisten en una reducción de las pérdidas ópticas usando superficies de reflectancia más alta y en mejoras del factor de interceptación F_φ .

Tanto el tubo receptor, como el reflector parabólico, pueden estar apoyados en placas en cada extremo, que originan una pérdida de calor por conducción desde los tubos a los apoyos; estas pérdidas se calculan haciendo mediciones de temperatura a lo largo de las placas de apoyo, siendo del orden del 3% al 10% de la radiación incidente con cielo claro, para temperaturas de superficie de receptor comprendidas entre 100°C y 175°C respectivamente.

Optimización del colector para la obtención de máxima energía.- El hacer un estudio completo de la optimización de un colector, para así poder llegar a un diseño que produzca energía al mínimo de costes, implica el que se puedan evaluar los efectos de los cambios del parámetro de diseño sobre el rendimiento del colector, eligiendo el valor óptimo de dicho parámetro sobre la base de máximo rendimiento, teniendo en cuenta una serie de condiciones de funcionamiento; para un reflector con unas determinadas propiedades ópticas, uno de los parámetros de diseño principales es el tamaño del receptor.

En la Fig IV.33 se muestra la eficiencia de la superficie de absorción en función del tamaño del receptor, para tres temperaturas; comparando los resultados se observa que se puede interceptar más radiación aumentando el radio *r* del receptor, lo que a su vez origina un aumento de las pérdidas térmicas; las líneas discontinuas son experimentales; las curvas continuas se han obtenido mediante los correspondientes balances energéticos, utilizando valores apropiados del factor F_φ .

Las geometrías del colector para sistemas que tengan un error de orientación despreciable, que proporcionan un rendimiento térmico óptimo, se calculan en función de:

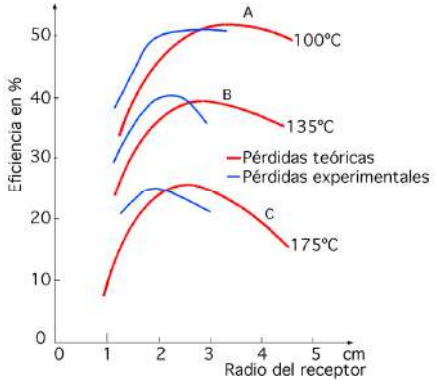


Fig IV.33.- Eficiencia como una función del radio del receptor para un CCP

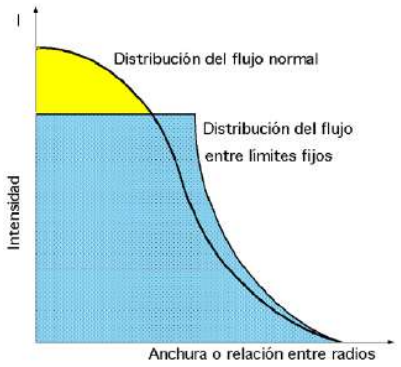


Fig IV.34.- Comparación del flujo entre límites fijos y la distribución normal

a) El coeficiente de distribución del flujo para una curva normal de distribución, $I_s\ \rho\ \tau\ \alpha$

b) Del índice de pérdidas teóricas por unidad de superficie del receptor, definido como el error angular de curvatura de un reflector de trazado teórico, con una distribución uniforme del error angular

c) Del parámetro F_φ *que describe la precisión óptica del reflector*

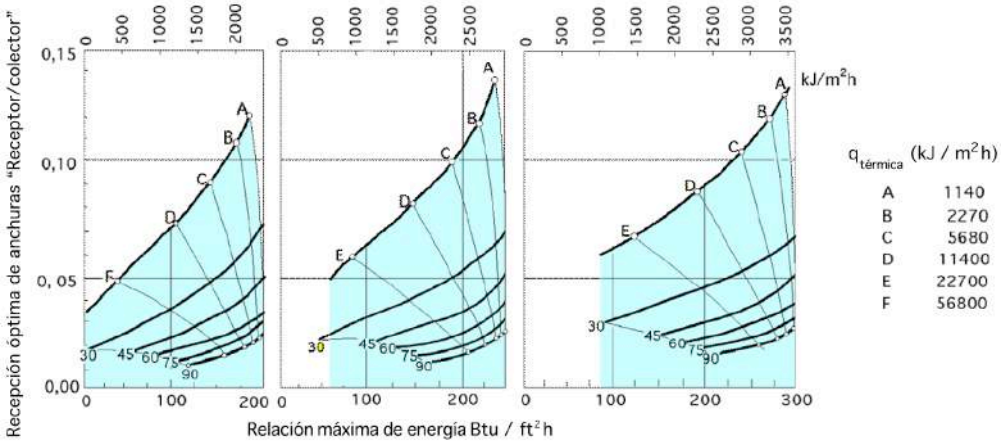


Fig IV.35.- Generación máxima de energía para diversos tipos de pérdidas térmicas

En las Fig IV.35 se indican los máximos de las curvas correspondientes a sistemas de concentración cilíndricos y de revolución, para una gama de valores de cada parámetro que describe la calidad óptica del conjunto, observándose que también se podrían utilizar otros parámetros que describiesen la calidad óptica del sistema, pudiendo hacer combinaciones de modelos de reflectores y de receptores diversos, que proporcionen determinadas distribuciones del flujo sobre la superficie del receptor.

Para un $\left\{ \begin{matrix} \textit{reflector cónico y} \\ \textit{receptor cilíndrico} \end{matrix} \right.$ la intensidad de flujo en el receptor varía con el cuadrado de la distancia desde su extremo inferior.

Con receptores adecuados y con reflectores parabólicos teóricamente perfectos, se podrían conseguir distribuciones de flujo sobre el receptor casi uniformes.

Otros sistemas geométricos de interés práctico, se corresponden con geometrías del *reflector-re-*

ceptor que requieren de dispositivos que permitan hacer un seguimiento mínimo del movimiento aparente del Sol; estos reflectores estacionarios, pueden ajustar su inclinación a intervalos de una semana, para compensar la declinación y consisten simplemente en un reflector cilíndrico circular montado sobre un eje Este-Oeste, con un receptor de sección transversal triangular, lográndose así pequeños índices de concentración, del orden de tres.

También se pueden desarrollar sistemas similares que requieren, por ejemplo, un ajuste del seguimiento del Sol a lo largo del día, lográndose así índices de concentración del orden de 10.

IV.12.- MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN DE LOS REFLECTORES

La construcción del reflector incluye una serie de problemas que hacen conveniente dividirle en dos partes, $\begin{cases} \textit{el revestimiento de la superficie reflectora} \\ \textit{la estructura soporte y de orientación} \end{cases}$.

Los tipos de revestimiento de la superficie reflectora y sus características, ya se han tratado; hay que utilizar materiales de reflexión con una reflectancia especular máxima durante el periodo de funcionamiento del colector compatible con los costes de fabricación y mantenimiento; también hay que tener en cuenta la posibilidad de renovar el revestimiento de reflexión, aplicando, por ejemplo, una nueva capa de película de plástico reflectivo, como Mylar aluminizado, o por sustitución de las placas o volviendo a metalizar, si la ganancia de energía útil adicional justifica el desembolso.

El cuerpo y la estructura soporte tienen una gran importancia en su influencia sobre el factor de interceptación F_{φ} ; el funcionamiento correcto del colector depende de la capacidad de la estructura de mantener la forma de la superficie reflectora y de su orientación, que son factores críticos a la hora de hacer un diseño, en donde habrá que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

a) El cuerpo y la estructura deben tener un soporte que permita obtener las diversas posiciones de orientación, sin que ello provoque una distorsión significativa de la superficie del reflector debida a su propio peso

b) Deben funcionar y no distorsionarse de forma significativa con los vientos que, normalmente soplen en el lugar, ya que la carga del viento limita el tamaño de cada concentrador

c) Tienen que resistir daños estructurales provocados por vientos fuertes y tormentas; en estas circunstancias se les situará en una posición fija y adecuada que permita eludir tales fenómenos