VIII.- CONCENTRADORES CIRCULARES CON RECEPTOR CENTRAL SIMÉTRICO

pfernandezdiez.es

VIII.1.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CONCENTRADORES CONTINUOS DE HELIOSTATOS

Podemos definir un *concentrador continuo* de energía solar como una disposición del campo de heliostatos que permita obtener el máximo aprovechamiento de la energía solar incidente, o lo que es lo mismo, un límite superior de sus propiedades; un concentrador discontinuo, más real que el anterior, sería aquél en el que el terreno del campo estuviese ocupado parcialmente por los heliostatos.

Para el concentrador continuo tienen que cumplirse las siguientes condiciones:

a) Los heliostatos constituyen un conjunto plano, cerrado y continuo, dispuestos de tal forma que, en cada instante, cumplan con las condiciones de dirección, al tiempo que reflejan el máximo flujo solar hacia el receptor, teniendo presentes en todo momento los fenómenos de sombra solar y apantallamiento del receptor. Los heliostatos, dadas sus pequeñas dimensiones frente a las del campo concentrador, se pueden considerar como pequeñas superficies especulares, perfectamente individualizados y dispuestos según un ordenamiento circular, con centro en la base de la torre, en cuya cima se encuentra ubicado el receptor.

Por lo que respecta a sus inclinaciones, estarán ordenados alrededor del nodo (único punto del campo en el que en cada instante hay un espejo horizontal), coincidiendo en cada momento con las líneas de igual acimut del concentrador; esta disposición puede aplicarse igualmente a los campos discontinuos, ya que las curvas de igual inclinación son independientes de la presencia o no de espejos en cada punto del campo.

El objeto de obtener el máximo rendimiento implica a su vez el conseguir las máximas exposicio-

nes especulares y, por lo tanto, el tener cubierto el campo con el mayor número posible de heliostatos; en el modelo de concentrador continuo éstos deberán estar separados el mínimo espacio posible, Fig VIII.1, dando en todo momento la sensación de continuidad especular, es decir, la superficie del terreno coincide con la superficie especular.

b) El campo de heliostatos, en principio, se puede considerar como una corona circular, cuyo centro es la base de la torre.

El radio mínimo interior del campo así definido viene dado por:

$$R_{máx} = H\ tg\ \theta_{tM} = R_M$$

en la que θ_{tM} es el ángulo máximo formado por el rayo reflejado por el punto central de cualquiera de los heliostatos situados en la periferia del campo y el eje de la torre.

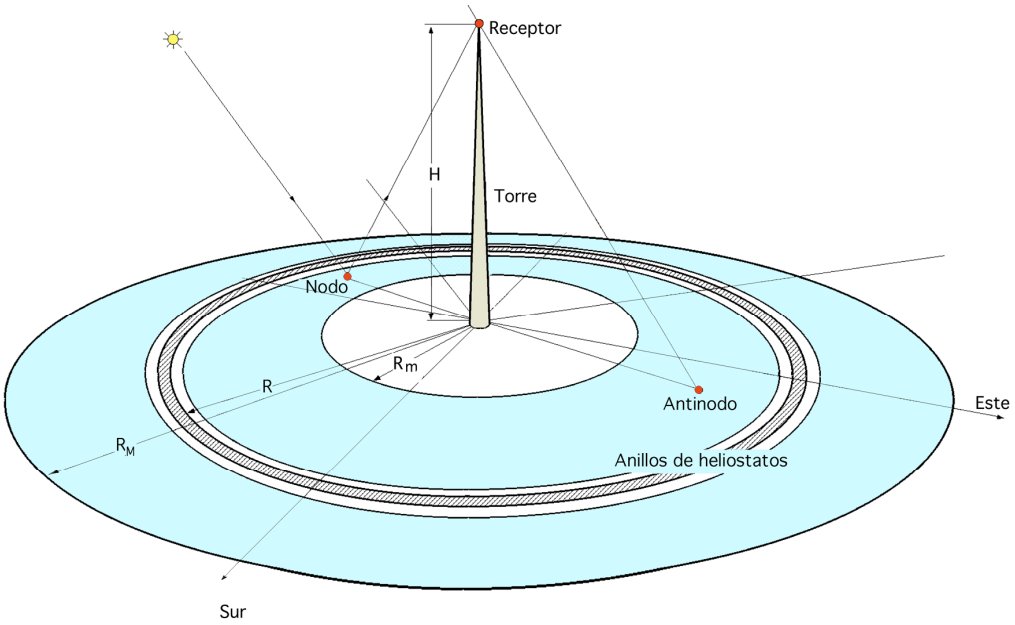

Fig VIII.1.- Modelo de concentrador continuo con receptor puntual

El radio mínimo interior del campo lo definimos como:

$$R_{mín} = H\ tg\ \theta_{tm} = R_m$$

en la que θ_{tM} es el ángulo mínimo definido por el rayo reflejado por el punto central de cualquier heliostato situado en el borde interior del concentrador y el eje de la torre.

Cuando todo el campo esté cubierto de heliostatos, el valor de $R_m = 0$

c) El terreno donde va ubicado el concentrador se puede suponer horizontal, sin ningún tipo de obstáculos o accidentes que puedan introducir efectos de sombra y/o apantallamiento secundarios. Sin embargo, la formulación por anillos que se va a desarrollar se puede aplicar a aquellos casos en

que los espejos estén ubicados por franjas de anillos a distintos niveles sobre el terreno, con lo que no se impone por ésto ninguna restricción; los días se considerarán despejados, con Sol brillante.

VIII.2.- RECEPTOR PUNTUAL

Los efectos de sombra y apantallamiento predominantes permiten dividir al campo en dos regiones perfectamente diferenciadas Fig VII.1, separadas por una circunferencia de radio R_c de valor:

$$R_C = H\ tg\ \theta_s$$

que en todo momento pasa por el nodo correspondiente, es decir, este radio critico coincide con la sombra de la torre sobre el terreno; dentro de esta circunferencia crítica se cumple la ecuación:

$$cos\ \theta_s < cos\ \theta_t \quad ; \quad \theta_s < \theta_t$$

de forma que $\eta_s > 1$, por lo que predominarán los efectos de sombra solar sobre el apantallamiento, mientras que fuera de ella se cumple $\eta_s < 1$ predominando los efectos de apantallamiento sobre los de sombra solar.

Si el nodo cae dentro de la zona circular comprendida entre la base de la torre y la circunferencia interior del concentrador, todos los espejos experimentan, como sabemos, efectos de apantallamiento por cuanto el Sol estará casi en la vertical del campo.

Por el contrario, si el nodo cae fuera del concentrador por la parte exterior del círculo de radio R_M, el concentrador estará influenciado por efectos de sombra solar.

Superficie especular efectiva.- Se define el área efectiva del concentrador S_{ef} como aquella que tiene que interceptar en un tiempo dado el máximo flujo solar, y que incluirá efectos de sombras y apantallamientos mínimos. Para ello consideraremos un elemento especular anular diferencial, de área dA´, Fig VIII.2, que se verá afectado por su posición respecto del nodo, lo cual a su vez permite introducir el efecto coseno k_s ó k_t, según predominen los efectos de sombra o apantallamiento.

$$dA' = 2\ \pi R\ dR = 2\ \pi H^2 sen\ \theta_t\ sec^3\theta_t\ d\theta_t$$

Dada la posición del nodo respecto al concentrador, se pueden obtener tres tipos de expresiones para el valor del área efectiva:

1) Cuando el nodo esté situado entre la base de la torre y la parte interna del concentrador, se verifica que $\theta_s \leq \theta_{tm}$ y por lo tanto, los espejos estarán expuestos a efectos de apantallamiento y habrá que utilizar el efecto coseno k_t.

El área efectiva tiene por expresión:

$$S_{ef} = 2\ \pi\ H^2 \int_{\theta_{tm}}^{\theta_{tM}} sen\ \theta_t\ sec^3\theta_t\ d\theta_t\ k_t = 2\ \pi\ H^2\ (sec\ \theta_{tM} - sec\ \theta_{tm}\ )$$

Con esta ecuación se obtiene el límite energético superior que sería posible concentrar, ya que para ella, el Sol estará en las posiciones más elevadas sobre el horizonte.

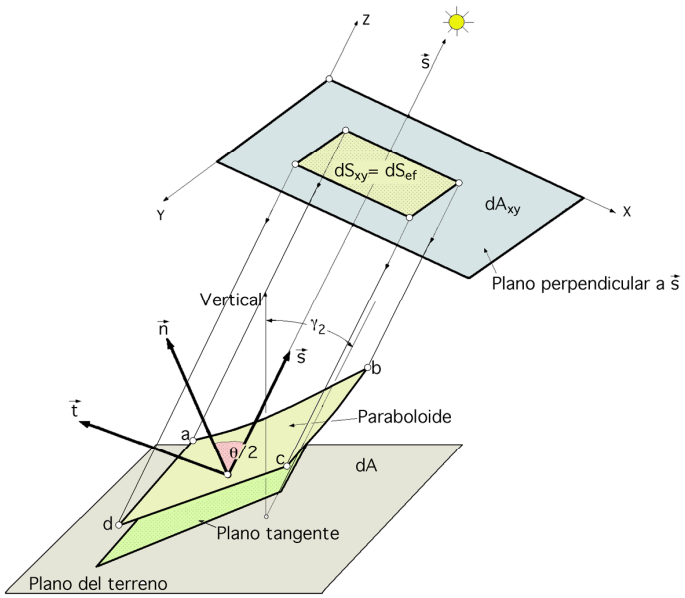

Fig VIII.2.- Elementos especulares anulares diferenciales

2) Cuando el nodo cae dentro de los límites del concentrador se verifica $\theta_{tm} < \theta_s < \theta_{tM}$, por lo que:

- *Entre los valores* $\theta_{tm} < \theta_s$ *prevalecerán los efectos de sombra con,* $k_S = cos\ \theta_s$

- *Entre* $\theta_s < \theta_{tM}$ *prevalecerán los de apantallamiento con,* $k_t = cos\ \theta_t$

El área efectiva toma la expresión:

$$S_{ef} = 2\ \pi\ H^2\ (\int_{\theta_{tm}}^{\theta_s} sen\ \theta_t\ sec^3\theta_t\ cos\ \theta_s\ d\theta_t + \int_{\theta_s}^{\theta_{tM}} sen\ \theta_t\ sec^3\theta_t\ cos\ \theta_t\ d\theta_t\ ) =$$

$$= \pi\ H^2\ (\ 2\ sec\ \theta_{tM} - cos\ \theta_s\ sec^2\theta_{tm} - sec\ \theta_s\ )$$

3) Cuando el nodo cae fuera del concentrador por su parte exterior, prevalecerán los efectos de sombra y habrá que tener en cuenta el efecto coseno k_s.

El área efectiva es:

$$S_{ef} = 2\ \pi\ H^2 \int_{\theta_{tm}}^{\theta_{tM}} sen\ \theta_t\ sec^3\theta_t\ cos\ \theta_s\ d\theta_t = \pi\ H^2\ (tg^2\theta_{tM} - tg^2\theta_{tm}\ )\ cos\ \theta_s$$

Con estas consideraciones se puede determinar la energía teórica máxima, en cada circunstancia, que llegaría al receptor puntual en condiciones ideales, multiplicando las áreas efectivas anteriores por la constante solar I_0.

Rendimiento del concentrador con receptor puntual.- Como el área del terreno sobre el cual va ubicado el concentrador es:

$$A = \pi H^2 \, (tg^2\theta_{tM} - tg^2\theta_{tm})$$

se puede definir el rendimiento del concentrador con receptor puntual como la relación existente en el área total especular efectiva y el área del terreno ocupado por los heliostatos, en la forma:

$$\eta_{cp} = \frac{S_{ef}}{A} = \frac{S_{xy}}{A} = \frac{S\,\eta_e}{A} = F_u \;\eta_e = \eta_e$$

que evaluaremos mediante las ecuaciones anteriores, de acuerdo con los tres casos que se pueden dar, resultando:

$$\textit{Para:} \begin{cases} \theta_s \le \theta_{tm} \quad ; \quad \eta_{cp} = \dfrac{2}{\sec\theta_{tM} - \sec\theta_{tm}} \\ \theta_s \ge \theta_{tm} \quad ; \quad \eta_{cp} = \cos\theta_s \\ \theta_{tm} < \theta_s < \theta_{tM} \quad ; \quad \eta_{cp} = \dfrac{2\sec\theta_{tM} - \cos\theta_s \sec^2\theta_{tm} - \sec\theta_s}{tg^2\theta_{tM} - tg^2\theta_{tm}} \end{cases}$$

Se puede expresar el área efectiva en forma adimensional A^*, utilizando como base de normalización el área πH^2, correspondiente a un círculo de radio H; las ecuaciones que proporcionan la superficie efectiva quedarán en la forma:

$$\begin{cases} A^* = 2\,(\sec\theta_{tM} - \sec\theta_{tm}) \\ A^* = 2\sec\theta_{tM} - \cos\theta_s \sec^2\theta_{tM} - \sec\theta_s \\ A^* = 2\,(tg^2\theta_{tM} - tg^2\theta_{tm})\cos\theta_s \end{cases}$$

observándose en ellas un detalle común, y es que como los efectos coseno no son función de ningún ángulo acimutal, los distintos valores de A^* y de η_{cp} son también independientes de estos ángulos acimutales, siendo sólo función de las distancias radiales.

La superficie efectiva quedará entonces en la forma $S_{ef} = \pi H^2 A^*$, que permite obtener las relaciones de concentración de energía solar, para el caso en que el receptor tenga una forma y geometría determinadas que, frente a las dimensiones del concentrador, podamos interpretarle como puntual.

VIII.3.- CARACTERÍSTICAS IDEALES DE LOS CONCENTRADORES DE ENERGÍA SOLAR CIRCULARES Y CONTINUOS, CON RECEPTOR PUNTUAL

Consideraremos en primer lugar que los límites geométricos del campo vienen definidos por

$\theta_{tm} = 0^o$ y por θ_{tM} lo que permite obtener unos resultados que serán los máximos posibles, por cuanto el terreno se ha cubierto totalmente con superficie especular.

Curvas de igual rendimiento especular.- La relación existente entre el rendimiento del concentrador η_{cp} y el ángulo θ_{tM} para distintos valores del ángulo cenital solar, viene representada en la Fig VIII.3; como cuando el Sol está en la vertical del campo, sólo pueden existir efectos de apantallamiento, la curva correspondiente comprenderá a todas las demás y, por lo tanto, será la de máximo rendimiento para un ángulo θ_{tM} dado. A medida que el Sol va tomando otras posiciones más bajas, comienzan a aparecer efectos de sombra, que en principio estarán comprendidos dentro del apantallamiento; el rendimiento comenzará a disminuir, se observa la existencia de una zona en la que el rendimiento permanece constante, correspondiéndose con $\theta_s < \theta_{tM}$

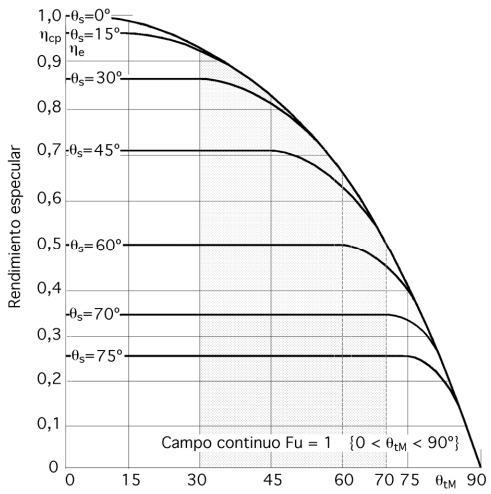

Fig VIII.3.- Curvas de igual rendimiento especular

Sin embargo, en las demás regiones del campo en las que se cumpla que $\theta_s > \theta_{tM}$ y en las que el nodo cae fuera del concentrador, las curvas del rendimiento caen rápidamente debido a que en estas zonas los efectos que predominan son los de sombra solar, y al tomar el efecto coseno k_s valores muy pequeños, por ser θ_s grande, se reduce el área efectiva del campo.

Una consecuencia lógica es la de que cuanto más pequeño sea θ_s los anillos que más contribuirán a la obtención de un rendimiento máximo serán los más próximos a la base de la torre en los que se sabe no existirán fenómenos de sombra siempre que $\theta_s > \theta_{tM}$.

Para ángulos $\theta_{tM} > 15^o$ comenzarán a aparecer fenómenos de sombra y para θ_{tM} del orden de 90°, el rendimiento η_{cp} se reducirá a cero.

Si θ_s aumentando se observa que para $\theta_s > \theta_{tM}$ se cumple la ecuación

$$\eta_{cp} = cos\ \theta_s$$

que es la que proporciona el plano horizontal; en el momento en que se tenga $(\theta_{tm} < \theta_s < \theta_{tM})$, y dado que hemos partido de $\theta_{tM} = 0^o$, resulta que para $\theta_s < \theta_{tM}$ las curvas comienzan a descender.

Si se supone un campo continuo particular definido por $\theta_{tm} = 0^o$ y $\theta_{tM} = 70^o$, el rendimiento del campo aumenta desde la salida del Sol hasta $\theta_s = 70^o$ es $(0 \leq \eta_{cp} \leq 0{,}34)$; todo el campo estará so-

metido a sombra solar predominante, pues el nodo cae fuera del concentrador y, en consecuencia, toda la energía solar que le llega podrá reflejarla al receptor, existiendo en este caso un exceso de superficie especular.

Al seguir ascendiendo el Sol y entrar el nodo dentro de los límites del concentrador, se observa la aparición de fenómenos de apantallamiento entre el nodo y la periferia del campo, por lo que la eficiencia de los espejos periféricos aumentará, hasta cortar a la curva límite con $\eta_{cp} = 0,5$; este rendimiento permanecerá ya invariable hasta que, al atardecer, el Sol vuelva a tomar posiciones menores de $\theta_s = 70^o$; los espejos situados hacia el interior del campo contribuirán a aumentar su η_{cp} a medida que el Sol asciende y, al mediodía, los que alcanzan un η_{cp} superior serán los más próximos a la base de la torre; estos espejos son los más interesantes en los receptores de cavidad de eje vertical, con abertura paralela al concentrador, para los que el campo concentrador tiene un θ_{tM} muy pequeño, con rendimientos comprendidos entre $0,7 \le \eta_{cp} = 0,1$ que se corresponden con ángulos cenitales solares entre 45° y 0° respectivamente.

Para un receptor cilíndrico vertical, los anillos interiores más próximos a la base de la torre carecen de interés y de ahí el que se puedan considerar campos con, $\theta_{tm} > 0^o$

Al analizar el campo comprendido entre $(30^o \le \theta_{tm} \le 70^o)$ se encuentra que la distribución de los anillos periféricos es la misma que para cuando $(\theta_{tm} = 0^o)$ mientras que el η_{cp} de los anillos interiores llega a valer 0,866 para ángulos cenitales solares comprendidos entre 0° y 30°; la curva límite para $(\theta_s = 0^o)$ irá por debajo de la correspondiente al campo continuo que para $(\theta_{tm} = 30^o)$ estaba en 0,928.

En el concentrador formado por anillos de espejos circulares perfectamente individualizados y de dimensiones finitas, se observa que cuando todo él está sometido a sombra solar, la energía reflejada no depende de la altura a la que se encuentra el receptor, pero si de la anchura de los anillos, cuando ésta sea menor que la diferencia entre los radios medios correspondientes a dos anillos consecutivos. Si lo que prevalece es el apantallamiento, la energía reflejada si va a depender de la altura a que se encuentre el receptor, y de la anchura de los espejos.

Sin embargo, aumentando la altura de la torre, a partir de una cierta posición, no se mejora notoriamente el rendimiento, sucediendo otro tanto cuando se mantiene constante la altura focal y se modifican las dimensiones del concentrador.

Curvas de igual superficie efectiva normalizada.- Si se estudia la relación existente entre el área efectiva normalizada A^* y los ángulos cenitales solares para diversos valores de θ_{tM} se obtiene, para una amplia gama de valores de $(\theta_s < \theta_{tM})$ que el valor de A^* permanece prácticamente

constante, lo mismo que sucede con η_{cp}

Cuando comienzan a aparecer fenómenos de sombra, y predominan sobre el apantallamiento, se producirá la caída de las curvas, región que viene dada por las siguientes ecuaciones:

Para el intervalo $(0 \le \theta_s \le \theta_{tM})$ resulta:

$$A^*_{\theta_s} = 2 \sec \theta_{tM} - \sec^2\theta_{tm} - 1 - 2 \sec \theta_{tM} + \cos \theta_s \sec^2\theta_{tM} + \sec \theta_s = - \sec^2\theta_{tm} - 1 + \cos \theta_s \sec^2\theta_{tM} + \sec \theta_s$$

y para $(\theta_{tm} = 0) \Rightarrow A^*_{\theta_s} = \cos \theta_s + \sec \theta_s - 2$

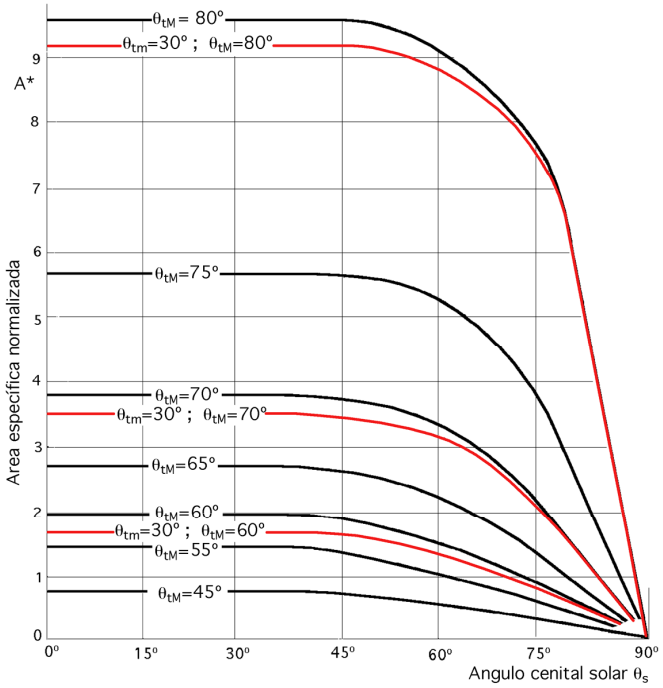

Fig VIII.4.- Curvas de igual superficie efectiva normalizada en función del ángulo cenital solar

Cuando $(\theta_s \ge \theta_{tM})$, Fig VIII.4, las curvas inician un descenso debido a que predominarán los efectos de sombra solar.

Si se considera $\begin{cases} \theta_{tm} = 30° \\ \theta_{tM} = 70° \end{cases}$, se observa que, con respecto al campo con $\theta_{tM} = 80°$, existe una gran diferencia en el área efectiva, lo cual se debe al gran número de anillos comprendidos en el intervalo $(70° < \theta_{tM} < 80°)$ siendo el área efectiva 2,6 veces superior para una misma altura de torre; también se observa que un aumento en la altura de la torre, mejora notoriamente el área efectiva de los anillos, aumentando, por lo tanto, la potencia del concentrador.

Para un concentrador definido por $\begin{cases} \theta_{tm} = 30^o \\ \theta_{tM} = 60^o \end{cases}$, el área efectiva máxima para $\theta_s = 0^o$, es 2,1 veces menor que para el campo definido por $\begin{cases} \theta_{tm} = 30^o \\ \theta_{tM} = 70^o \end{cases}$, quedando reducida su potencia a la mitad.

Conocidas las áreas efectivas totales, para determinar la cantidad de energía disponible en el receptor, las multiplicamos por la constante solar I_0, pudiendo interpretar el área efectiva como una densidad de energía por unidad de superficie, referida al área πH^2, por lo que la energía solar total reflejada por el concentrador sobre el receptor puntual se puede expresar como:

$$Q_T = \pi H^2 A^* I_0$$

El valor de I_0 depende, fundamentalmente, de θ_s lo cual lleva implícito el lugar donde está ubicado el concentrador (latitud), día de año (declinación media), hora del día (ángulo horario) y, en gran manera, el ángulo de dispersión de los rayos solares reflejados, en donde se incluyen los errores de construcción de los espejos, el grado de acabado de los mismos y los errores de dirección y enfoque de los heliostatos.

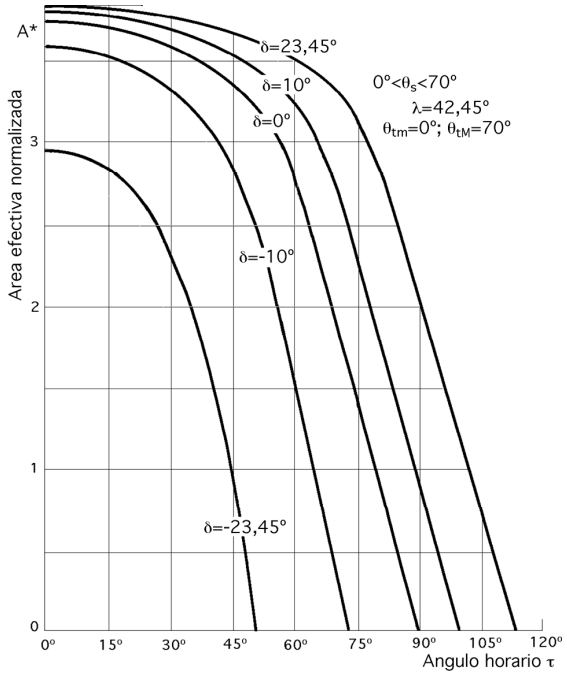

Fig VIII.5.- Curvas de igual superficie efectiva normalizada en función del tiempo

Curvas de igual superficie efectiva en función del tiempo.- Si se relaciona el valor de A^* con el ángulo horario correspondiente a un determinado día del año, mediante el valor de $cos\ \theta_s$, definido por su declinación media, a una latitud dada, para distintos valores de θ_{tm} y θ_{tM} se obtienen las siguientes ecuaciones:

a) Para, $\theta_s \leq \theta_{tm} \quad \Rightarrow \quad A^* = 2\,(sec\ \theta_{tM} - sec\ \theta_{tm})$

que no se modifica y que, en consecuencia, proporciona el tramo horizontal.

b) Para, $\theta_{tm} < \theta_s < \theta_{tM}$

$$A^* = 2 \sec \theta_{tM} - (\operatorname{sen} \lambda \operatorname{sen} \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos \tau) \sec^2 \theta_{tm} - \frac{1}{\operatorname{sen} \lambda \operatorname{sen} \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos \tau}$$

c) Para, $\theta_s > \theta_{tM} \quad \Rightarrow \quad A^* = (tg^2 \theta_{tM} - tg^2 \theta_{tm})(\operatorname{sen} \lambda \operatorname{sen} \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos \tau)$

que se han representado en la Fig VIII.5.

VIII.4.- CONSIDERACIONES SOBRE RECEPTORES PUNTUALES

La relación existente entre la energía enviada al receptor y la altura de la torre, para diversos valores de R_M y para el caso particular $\theta_{tM} = 0^o$, se determina por la ecuación:

$$S_{ef} = 2 \pi H^2 (\sec \theta_{tM} - \sec \theta_{tm})$$

Su representación se ha realizado en papel semilogarítmico, Fig VIII.6, y en ella el valor de θ_{tM} depende de la relación (R_M/H) observándose la variación de la energía reflejada por un determinado concentrador definido por su radio R_M, en función de la altura H de la torre. Para un R_M determinado, la energía enviada al receptor permanece prácticamente constante a partir de una cierta altura H de la torre, por lo que sería absurdo, en principio, construir torres de altura superior manteniendo el radio R_M.

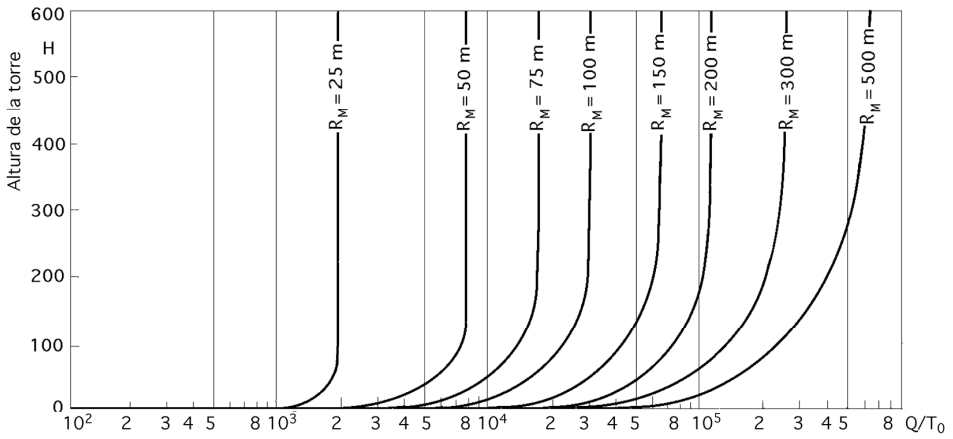

Fig VIII.6.- Representación de la ecuación, $Q_T = 2\pi H^2 I_0 (\sec \theta_{tM} - 1)$*, para diversos valores de* R_M

La ecuación anterior es la más favorable por cumplirse cuando el Sol está en sus posiciones más elevadas y de ahí el que no pueda ser representativa de lo que pueda suceder en el concentrador cuando intervengan las ecuaciones:

$$S_{ef} = \pi H^2 (2 \sec \theta_{tM} - \cos \theta_s \sec^2 \theta_{tm} - \sec \theta_s)$$

$$S_{ef} = \pi H^2 (tg^2 \theta_{tM} - tg^2 \theta_{tm}) \cos \theta_s$$

en las que las sombras y apantallamientos van a influir en la energía reflejada al receptor.

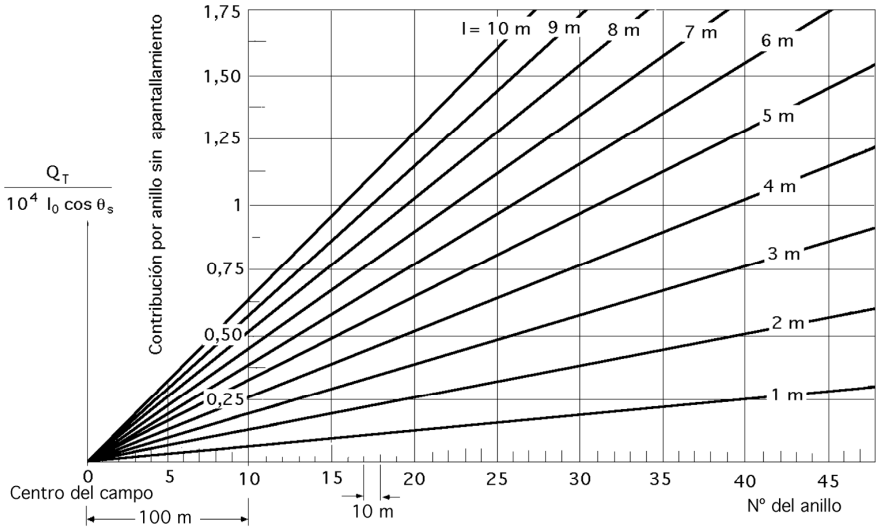

Fig VIII.7.- Anillos sometidos sólo a sombra solar

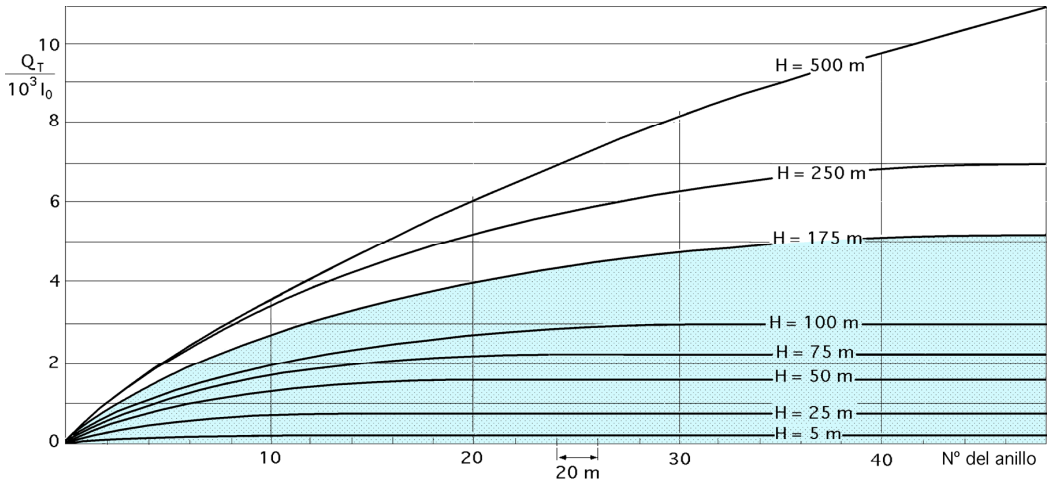

Fig VIII.8.- Anillos sometidos sólo a apantallamiento, l = 5 m

En la Fig VIII.7 se ha hecho una representación de la energía que podría enviar al receptor cada anillo de espejos continuo, sometido únicamente a los efectos de sombra solar.

Un resultado muy interesante es aquel en el que la energía reflejada no depende para nada de la altura de la torre, y sí únicamente de la anchura *l* del anillo especular; se ha dispuesto una distancia entre centros de anillos única igual a 10 m, y anchuras de anillos comprendidas entre 1 y 10 m, observándose que la energía enviada al receptor, en cada caso, es proporcional a la anchura del anillo. Cuando la anchura de los anillos sea de 10 m, se estará en el caso de campo continuo, por ser la distancia entre anillos también de 10 m y, en consecuencia, se tendrá la máxima energía que será posible enviar al receptor; la energía reflejada varía linealmente, aumentando con el radio del anillo.

En las Fig VIII.8 y 9 se ha realizado una representación análoga a la anterior, pero sólo para el caso en que los anillos estén expuestos a efectos de apantallamiento. En este caso, la energía envia-

da al receptor por cada anillo continuo sí depende de la altura H de la torre, siendo mayor cuanto mayor sea dicha altura.

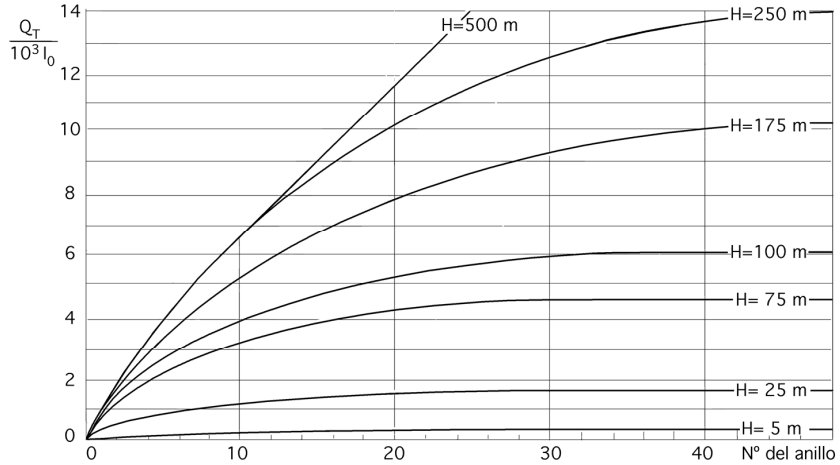

Fig VIII.9.- Anillos sometidos sólo a apantallamiento, l = 10 m

Para una altura dada, la energía radiada por cada anillo sería proporcional a la anchura del mismo; sin embargo, para cuando los anillos tengan una misma anchura, esta energía reflejada aumentará con el radio del anillo considerado, pero no linealmente como sucedía en el caso de la sombra solar.

Si se supone un concentrador de radio R_M fijo, (por ejemplo R_M = 500 m), la relación Q_T/I_0, comienza a ser uniforme para H = 1500 m; el intentar construir torres de esta altura sería absurdo, aunque una solución pudiera ser el aprovechar alguna montaña ideal, en cuya cima se instalase el receptor, y el concentrador estuviese dispuesto alrededor de su base; esta solución implicaría, para, I_0 = 1 kW/m^2, un valor de, Q_T = 765 MW.

Si se reduce la altura de la torre, por ejemplo a 300 m, manteniendo el R_M, resulta Q_T = 535 MW, que indica que una torre cinco veces más pequeña implica sólo una reducción de la energía enviada al receptor de aproximadamente 1,4 veces la correspondiente a, H = 1.500 m.

Si se reduce aún más la altura de la torre, por ejemplo a H = 100 m para R_M = 500 m, supondría que Q_T fuese del orden de 260 MW, es decir, 2,9 veces menos energía que para H = 1.500 m, equivalente a la de una modesta central térmica para la generación de electricidad. Esta solución es más lógica y factible que cualquiera de las anteriores.

Modificando el radio del concentrador, manteniendo fija la altura de la torre, por ejemplo H = 150 m, se obtienen los siguientes resultados:

R_M	*75 m*	*150 m*	*300 m*	*500 m*
Q_T	*17 MW*	*57 MW*	*170 MW*	*350 MW*

observándose que la relación Q_T/R_M disminuye a medida que R_M se hace más pequeña, pero no proporcionalmente.

VIII.5.- RECEPTORES NO PUNTUALES

Para estudiar los receptores no puntuales definiremos un factor de concentración C, como la relación entre la superficie efectiva reflectora del concentrador, y la superficie lateral del receptor Ω, para cuando éste sea una superficie geométrica.

Se puede suponer que el receptor posee simetría de revolución respecto al eje de la torre, que sus dimensiones son mucho más pequeñas que las del concentrador, y que éste es continuo, aunque esta condición no es estrictamente necesaria.

El ángulo de dispersión de los rayos solares reflejados debe ser tal que el perfil del receptor, visto desde el anillo más alejado de la base de la torre, en condiciones ideales, esté dado por la intersección del cono solar reflejado y la superficie lateral del mismo; supondremos también que la reflectancia y acabado de los espejos es perfecta.

Analizaremos cuatro tipos de geometrías receptoras que se pueden considerar como las más típicas:

Disco plano horizontal.- Supondremos que el disco está dispuesto como se indica en la Fig VIII.10, en la que el radio *r* del mismo dependerá del radio R_M del anillo periférico, de forma que los rayos solares reflejados limiten el contorno del disco.

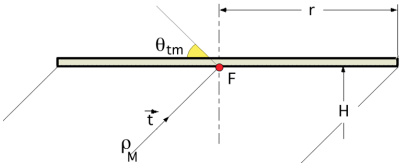

Fig VIII.10.- Receptor disco plano horizontal

Con estas condiciones se tiene:

$$\rho_M \, \xi = r \cos \theta_{tM}$$

y como: $\rho_M = \dfrac{H}{\cos \theta_{tM}} \quad \Rightarrow \quad \dfrac{r}{H} = \dfrac{\xi}{\cos^2 \theta_{tM}}$

El área lateral del disco receptor expuesta al cono solar reflejado es:

$$\Omega = \pi r^2 = \pi \left(\frac{H \xi}{\cos^2 \theta_{tM}}\right)^2$$

El factor de concentración viene dado por: $C = \dfrac{S_{ef}}{\Omega} = \dfrac{A^* \cos^4 \theta_{tM}}{\xi^2} = \dfrac{A^*}{\left(\frac{r}{H}\right)^2}$

$$\text{Para: } \theta_{tM} = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} A^* = 2\,(\sec \theta_{tM} - 1), \text{ para: } \theta_s \le \theta_{tm} \\ A^* = 2 \sec \theta_{tM} - \cos \theta_s - \sec \theta_s, \text{ para: } \theta < \theta_s < \theta_{tM} \\ A^* = tg^2 \theta_{tM} \cos \theta_s, \text{ para: } \theta_s \ge \theta_{tM} \end{cases}$$

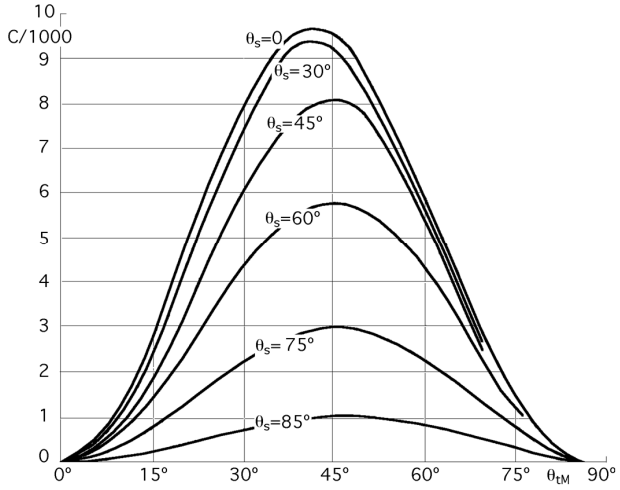

Fig VIII.11.- Factores de concentración para el receptor disco plano horizontal

que permiten encontrar las relaciones $(C,\ \theta_{tM})$, para diversos valores de θ_s, Fig VIII.11.

Se observa que los factores de concentración máximos se encuentran para $\theta_s = 0^o$, y valores de θ_{tM} del orden de 40°.

Para valores de $\theta_s \neq 0^o$ los máximos se encuentran comprendidos en el intervalo $(40^o < \theta_{tM} < 50^o)$

Semiesfera.- La formulación que se pueda obtener dependerá de la posición del centro de la semiesfera, respecto del punto focal F; supondremos que el cono solar reflejado por el anillo periférico definido por su θ_{tM} pasa por un punto A de la semiesfera y, a su vez, es tangente a la misma en el punto C, Fig VIII.12; el radio *r* de dicha semiesfera viene dado en la siguiente forma:

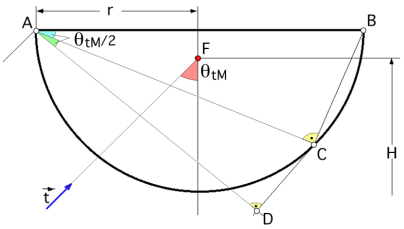

Fig VIII.12.- Receptor semiesférico

$$(AC) = (AB)\ \cos\frac{\theta_{tM}}{2} \quad ; \quad (AD) = (AC)\ \cos\frac{\theta_{tM}}{2}$$

$$(AB) = 2\ r = \frac{(AD)}{\cos^2\left(\frac{\theta_{tM}}{2}\right)} \quad ; \quad (AD) = 2\ \rho\ \xi = \frac{2\ H\ \xi}{\cos\ \theta_{tM}}$$

$$r = \frac{H\ \xi}{\cos\ \theta_{tM}\ \cos^2\left(\frac{\theta_{tM}}{2}\right)} = \frac{2\ H\ \xi}{\cos\ \theta_{tM}\ (1 + \cos\ \theta_{tM})}$$

La superficie lateral de la semiesfera es:

$$\Omega = 2\ \pi\ r^2 = 2\ \pi\ \frac{4\ H^2\ \xi^2}{\cos^2\theta_{tM}\ (1\ +\ \cos\ \theta_{tM})^2}$$

y el factor de concentración: $C\ =\ \dfrac{A^*\cos^2\theta_{tM}\ (1\ +\ \cos\ \theta_{tM})^2}{8\ \xi^2} = \dfrac{A^*}{2\left(\frac{r}{H}\right)^2}$

Las relaciones $(C,\ \theta_{tM})$ para diversos valores de θ_s vienen representados en la Fig VIII.13; se

observa que el factor de concentración máximo se encuentra para, $\begin{cases}\theta_s = 0^o \\ \theta_{tM} \cong 50^o\end{cases}$

A medida que aumenta el valor de θ_s los máximos se encuentran comprendidos en el intervalo definido por $(50^o < \theta_{tM} < 60^o)$.

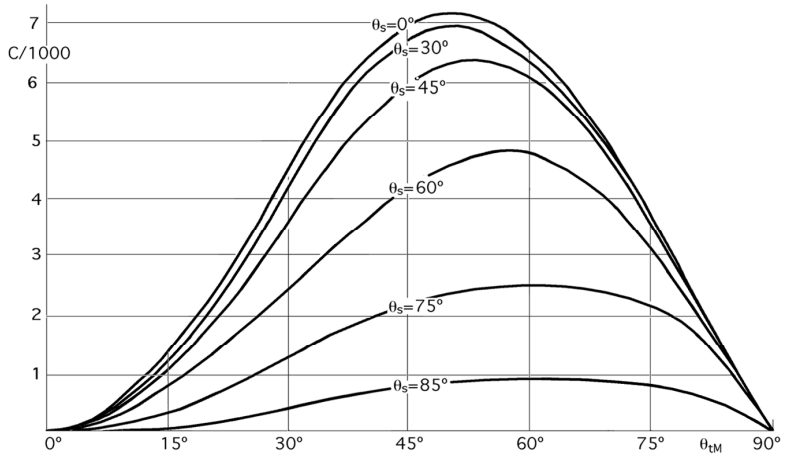

Fig VIII.13.- Factores de concentración para el receptor semiesférico

Tronco de cono invertido.- En este caso se puede suponer que la generatriz del cono es igual al radio de la base *(g = r)*; a su vez, los rayos solares reflejados por el anillo periférico incidirán normalmente sobre la superficie lateral del mismo, Fig VIII.14, pudiéndose poner:

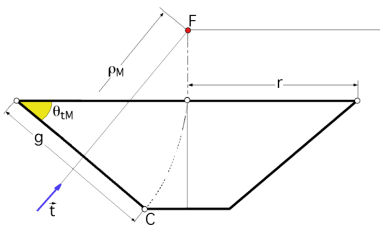

Fig VIII.14.- Receptor troncocónico

$$r = 2\ \rho_M\ \xi = \frac{2\ H\ \xi}{\cos\ \theta_{tM}}$$

y si se supone además que el radio menor del tronco de cono es mucho más pequeño que el radio r de la base mayor, se podrá despreciar, por lo que la superficie lateral será:

$$\Omega = \pi\ r\ g = \pi\ r^2 = \frac{4\ \pi\ H^2 \xi^2}{\cos^2 \theta_{tM}}$$

y el factor de concentración: $C = \dfrac{A^* \cos^2 \theta_{tM}}{4\ \xi^2} = \dfrac{A^* H^2 \cos^2 \theta_{tM}}{4\ r_s^2} = \dfrac{A^*}{(\frac{r}{H})^2}$

Se han representado algunas relaciones entre $(C,\ \theta_{tM})$ en la Fig VIII.15, observándose que el factor de rendimiento máximo se da para $\begin{cases}\theta_s = 0^o \\ \theta_{tM} = 60^o\end{cases}$, encontrándose otros máximos para $\theta_s \neq 0^o$ comprendidos en el intervalo $(60^o < \theta_{tM} < 80^o)$.

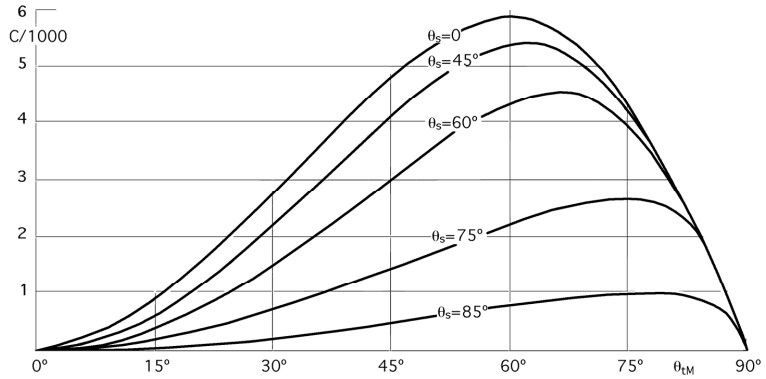

Fig VIII.15.- Factores de concentración para el receptor troncocónico

Cilindro vertical.- Si se supone que el cilindro tiene un radio r y altura h, de acuerdo con la Fig VIII.16 se tiene:

$$(AD) = 2\,\rho\,\xi = \frac{2\,H\,\xi}{\cos\,\theta_{tM}} = h\,sen\,\theta_{tM} \quad \Rightarrow \quad h = \frac{4\,H\,\xi}{sen\;2\,\theta_{tM}} \quad ; \quad \Omega = 2\,\pi\,r\,h = \frac{8\,\pi\,r\,H\,\xi}{sen\,2\theta_{tM}}$$

$$C = \frac{A^*}{\dfrac{8\,r\,\xi}{H\,sen\;2\,\theta_{tM}}} = \frac{A^*\,H^2\;sen\;2\,\theta_{tM}}{8\,r\,r_s^2} = \left| \begin{array}{l} r = r_s\;\hat{r} \\ r_s = \xi\,H \end{array} \right| = \frac{A^*\,sen\;2\theta_{tM}}{8\,\hat{r}\,\xi^2} = \frac{A^*}{\dfrac{r}{H}\;\dfrac{2\,h}{H}}$$

Dando valores a h se obtienen los factores de concentración:

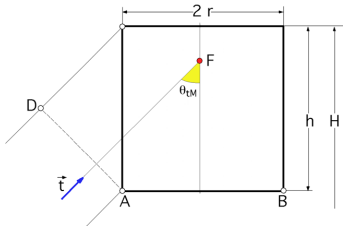

Fig VIII.16.- Receptor cilíndrico vertical

$$Para \begin{cases} h = 2\,r \quad ; \quad C = \dfrac{A^*}{4\,(r/H)^2} = \dfrac{A^*\,sen^2(2\,\theta_{tM})}{16\,\xi^2} \\ h = 2{,}5\,r \quad ; \quad C = \dfrac{A^*}{5\,(r/H)^2} = \dfrac{A^*\,sen^2(2\,\theta_{tM})}{12{,}8\,\xi^2} \\ h = 3\,r \quad ; \quad C = \dfrac{A^*}{6\,(r/H)^2} = \dfrac{A^*\,sen^2(2\,\theta_{tM})}{10{,}67\,\xi^2} \end{cases}$$

que son relaciones interesantes para este tipo de receptores verticales, por lo que sacaremos algunas conclusiones; su representación viene expuesta en la Fig VIII.17, en la que se observa que:

- Los factores de concentración máximos se encuentran para $\theta_s = 0^o$, y valores de $\theta_{tM} \approx 40^o$

- Para valores de $\theta_s \neq 0^o$, los máximos se encuentran en el intervalo $(70° < \theta_{tM} < 75°)$

Asimismo, para los anillos de espejos más interiores, el factor de concentración se observa es más pequeño comparado con el obtenido en las geometrías anteriores, lo cual viene a decir que, para receptores cilíndricos verticales, los anillos comprendidos entre 0° y 30°, prácticamente no contribuyen energéticamente.

La representación gráfica de estos factores de concentración en función del ángulo θ_{tM} se mues-

tra en la Fig VIII.18, para $\theta_s = 0^o$ observándose que un aumento de la altura h del receptor, para r fijo, supone una mayor influencia del factor de concentración, sobre todo para ángulos comprendidos en el intervalo $(60° < \theta_{tM} < 75°)$

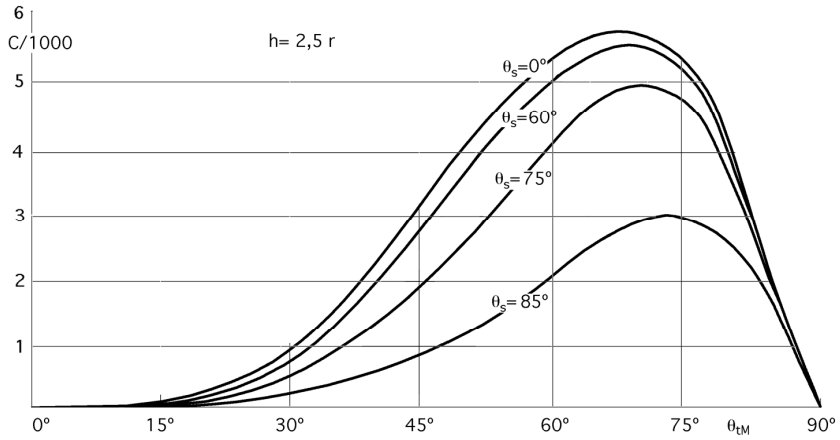

Fig VIII.17.- Factores de concentración para el receptor cilíndrico vertical

También se han representado los factores de concentración para $\theta_s = 0^o$ correspondientes a las geometrías analizadas, observándose un desplazamiento del factor de concentración máximo hacia valores de θ_{tM} crecientes, a medida que la superficie receptora va modificando su inclinación, desde la horizontal, correspondiente al disco plano, hasta la vertical de los receptores cilíndricos.

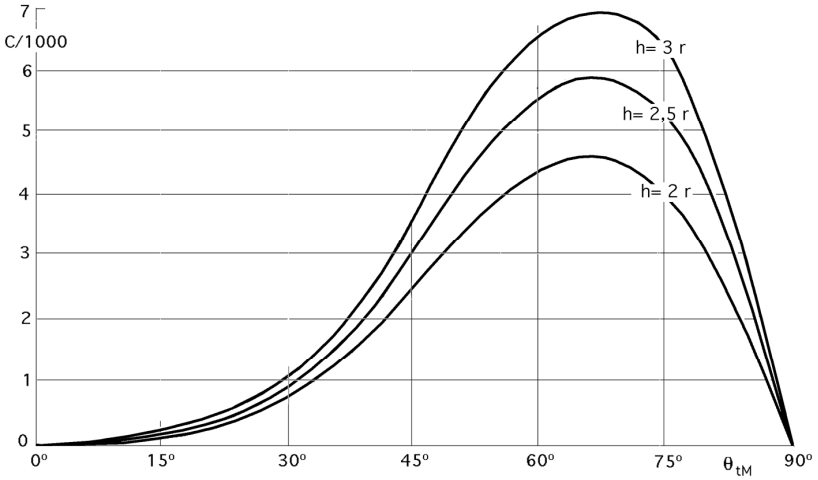

Fig VIII.18.- Factores de concentración para receptores cilíndricos

En la Fig X.19 se muestra la relación $(\frac{r}{H}, \theta_{tM})$ para cualquier valor de θ_s observándose que en el intervalo $(30° < \theta_{tM} < 70°)$ la relación permanece prácticamente uniforme para los receptores cilíndricos verticales.

En los modelos expuestos se introducen algunos errores en el receptor, por cuanto el punto focal F sólo viene definido por la altura H de la torre, y no por su posición relativa frente al receptor; sin

embargo, en primera aproximación se pueden despreciar, por considerar que las dimensiones del receptor son mucho más pequeñas que las del concentrador y que las distancias receptor-concentrador.

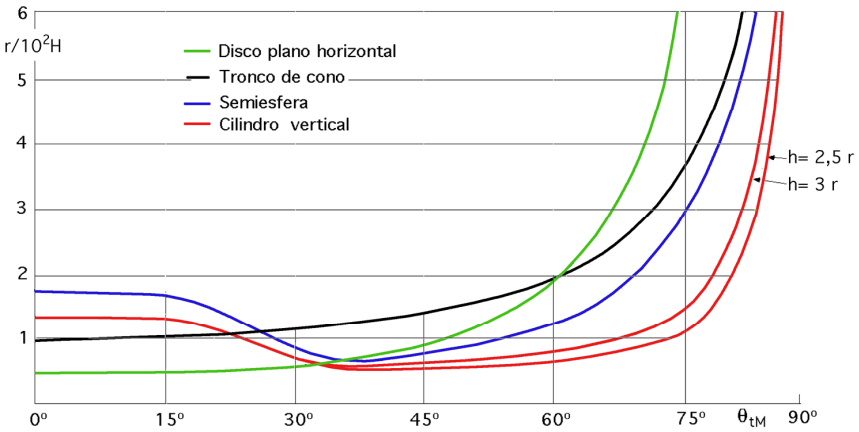

Fig VIII.19.- Relación entre r/H, y el ángulo q_{tm}

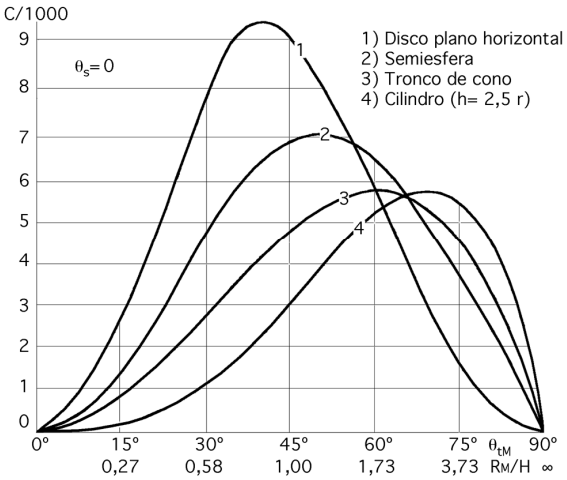

Fig VIII.20.- Factores máximos de concentración para distintas geometrías

En resumen, el estudio de receptores con formas geométricas diversas y el concepto de factor de concentración, permiten conocer las densidades de energía solar que interceptan, pero no su distribución sobre los mismos. Estas densidades de energía solar reflejada serían las máximas que se podrían conseguir, en condiciones ideales. Este modelo se puede aplicar a cualquier otro tipo de geometría receptora.