

X.- CONFIGURACION GEOMETRICA DE RECEPTORES DE CENTRALES TERMOSOLARES

X.1.- FACTOR DE DISPERSION ANGULAR DEL CONO SOLAR REFLEJADO POR UN HELIOSTATO

Las dimensiones de un receptor de potencia de una central termosolar vienen condicionadas por una serie de factores que comprenden el ángulo, $2\theta = 32'$, del cono solar incidente, los errores de fabricación de los espejos que conforman los heliostatos, que representamos por un ángulo θ_E , y los errores en el enfoque automático de los mismos resumidos en un ángulo θ_D ; estos factores los comprendiamos en un único factor de dispersión angular θ .

El receptor se puede considerar, en principio, como un sólido con geometría cualquiera, con la única restricción de tener un eje de simetría vertical.

Los heliostatos se pueden suponer como superficies especulares de sección cuadrada, de dimensiones $(l \cdot l)$ viniendo localizados en el concentrador por la expresión,

$$r = H \sec \theta_t$$

siendo H la distancia sobre el terreno del punto de enfoque de los heliostatos, r es la distancia entre un heliostato y el punto focal F , y θ_t es un ángulo acimutal que sitúa sobre el concentrador al anillo sobre el que va ubicado un heliostato cualquiera; en la la Fig X.1, se ha hecho una representación de la posición de este heliostato, relacionándolo con el punto focal F sobre el eje de simetría del receptor; como la distancia (EF) es muy grande comparada con las dimensiones del receptor, consideraremos que r es la distancia desde el espejo E al plano tangente al receptor en un punto P sobre el mismo.

Teniendo en cuenta lo dicho, el diámetro de la imagen solar D sobre este plano tangente, a la distancia r y normal a la dirección (EF) es,

$$D = 2 \left(\frac{r}{H} + \frac{D}{2H} \right) + 1 = 2 \frac{r}{H}$$

y el factor de dispersión angular ξ_r ,

$$\xi_r = \frac{2 \left(\frac{r}{H} + \frac{D}{2H} \right) + 1}{2} = 1 + \frac{r}{H} + \frac{D}{2H} = 1 + \frac{r}{H} + \frac{1}{2} \cos \theta_t$$

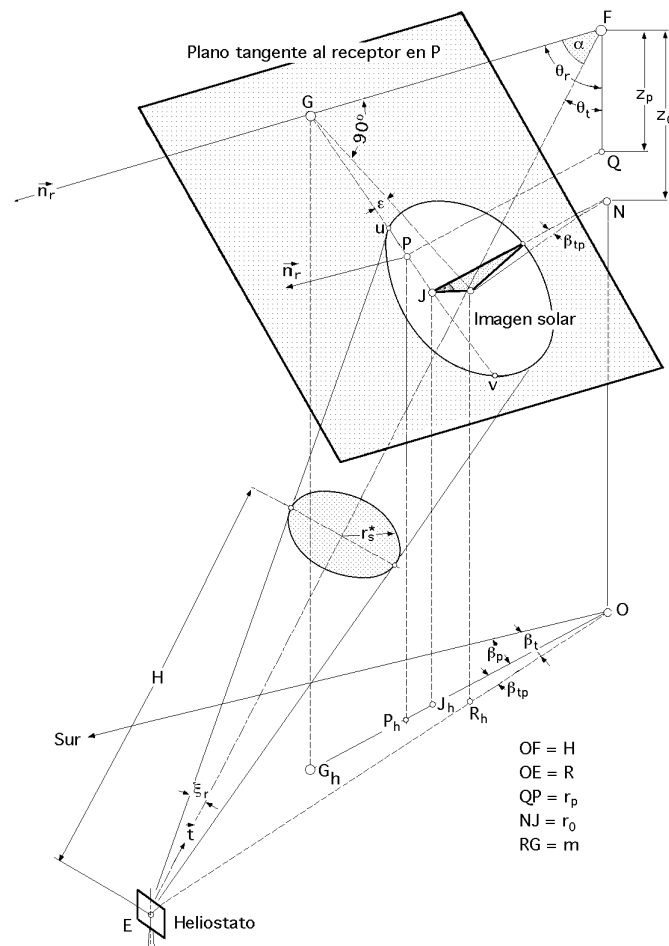


Fig X.1.- Imagen solar sobre un plano tangente al receptor

en las que,

ξ es el ángulo mitad del cono solar incidente $\approx 16'$ ó $4,65 \times 10^{-3}$ rad

ξ_r es el ángulo mitad del cono solar reflejado por los espejos

ν_E es el ángulo que compendia los defectos de construcción de los espejos, y que permite errores máximos de tratamiento de superficies que provoquen una dispersión del haz reflejado no superior a 10 minutos, $2,9 \times 10^{-3}$ radianes)

ν_D es el ángulo que tiene en cuenta los errores de dirección de los espejos, de forma que el servomecanismo encargado de la orientación de los mismos, se tiene que diseñar para no cometer errores superiores a, $0,1 \xi$, $0,465 \times 10^{-3}$ radianes

Asimismo, debido a las dimensiones de los espejos, el diámetro de la imagen solar plana a la distancia del espejo sobre el receptor, se incrementa en el término,

$$\frac{1}{2H} \cos \theta$$

que depende de la posición del espejo dada por θ , de la altura H de la torre, y de las dimensiones del espejo.

Cuando se trabaje en condiciones ideales, el factor de dispersión angular valdrá la unidad; en condiciones reales, el valor de β es,

$$\beta = 1 + \frac{2,90 + 0,465}{4,65} + \frac{1 \cos \theta}{2 \times 4,65 \cdot 10^{-3} H} = 1,7236 + 107,5269 \frac{1 \cos \theta}{H}$$

observándose que es un valor que no permanece constante, por cuanto depende del anillo de heliostatos definido por θ .

X.2.- IMAGEN SOLAR SOBRE UN PLANO TANGENTE AL RECEPTOR REPLEJADA POR UN ESPEJO CUALQUIERA

La energía solar que llegará al receptor, reflejada por un espejo cualquiera del campo concentrador, será la misma que interceptará el plano tangente al receptor en un punto P del mismo, tal, que la línea que une este punto con el de intersección del eje del haz solar reflejado con dicho plano tangente, esté contenida en un plano vertical. Si queremos hallar la influencia de los demás espejos sobre este plano tangente, procederemos a determinar el tamaño y situación de la imagen solar plana reflejada por cualquier otro espejo sobre dicho plano tangente al receptor; para ello consideraremos al receptor como una superficie de revolución, con la única condición de que su eje de simetría coincida con el eje de la torre. El heliostato elegido deberá estar en todo momento enfocando al punto F situado en lo alto de la torre a la altura H sobre el terreno, Fig X.2.

A la imagen solar reflejada sobre el plano tangente en P se la puede considerar como intersección del cono solar reflejado por el espejo E de ángulo, 2θ , con dicho plano tangente; tanto su tamaño como su situación los estableceremos en función de unos parámetros característicos que vendrán definidos por el espejo E y el punto P, lo cual a su vez nos permitirá comprender bajo qué condiciones el punto P permanecerá activo respecto al espejo E.

Según la Fig X.3, esta actividad se manifestará siempre que el punto P esté contenido dentro de la elipse imagen solar plana, y para ello deberá venir localizado entre los puntos u y v , que serán la intersección de la elipse imagen solar plana con la línea (PG), que llamaremos línea imagen, de forma que el punto G sea a su vez la intersección de la normal al plano tangente en P que pasa por el punto focal F, con el propio plano tangente, y que definiremos como \bar{n}_r .

El centro R de la elipse coincidirá con el punto de intersección de la línea (FE) y el plano tangente al receptor en P, y le determinaremos mediante coordenadas cilíndricas definidas por (z_0, r_0, θ) , tomando el punto F como origen. El ángulo que forma la línea (EF) con la normal (FG) al plano tangente en P le llamaremos α ; el eje mayor de la elipse coincidirá con la línea (RG), que forma un

ángulo con la línea imagen (PG).

Como el punto P tiene que ser visualizado desde el espejo E, y a la vez tiene que estar comprendido entre los puntos u y v , tendremos que hallar la intersección de la imagen solar plana con la línea imagen (PG); para ello definimos unos ejes (x,y) con centro en R, a los que haremos coincidir con los ejes mayor y menor de la elipse imagen solar plana, cuya ecuación es, Fig X.1,

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

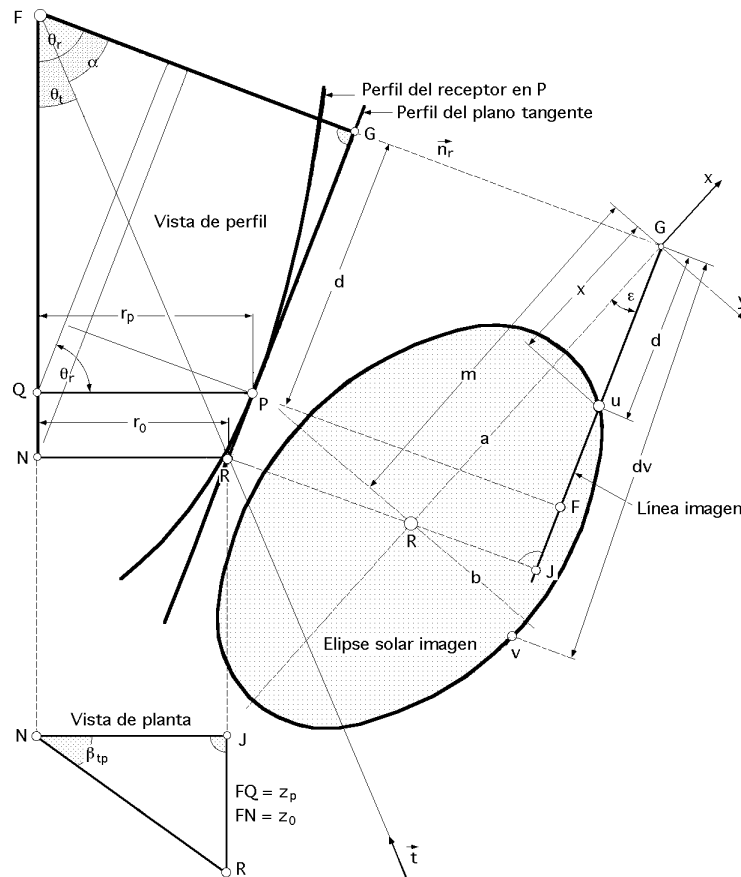


Fig X.2.- Elipse solar sobre un plano tangente al receptor

y la ecuación de la línea imagen (PG) referida a los mismos ejes, por,

$$y = c x + q = \begin{cases} \text{Para, } x = 0 ; y = q = m \operatorname{tg} \\ \text{Para, } y = 0 ; x = m ; c = \frac{q}{m} = \operatorname{tg} \end{cases} = -x \operatorname{tg} + m \operatorname{tg} = (m - x) \operatorname{tg}$$

El valor de m se calcula a partir de,

$$m = \overline{RG} = \overline{FG} \operatorname{tg} = \begin{cases} \overline{FG} = z_p \cos r + r_p \operatorname{sen} r \\ = z_0 \cos r + r_0 \operatorname{sen} r \end{cases} = (z_0 \cos r + r_0 \operatorname{sen} r) \operatorname{tg}$$

obteniéndose,

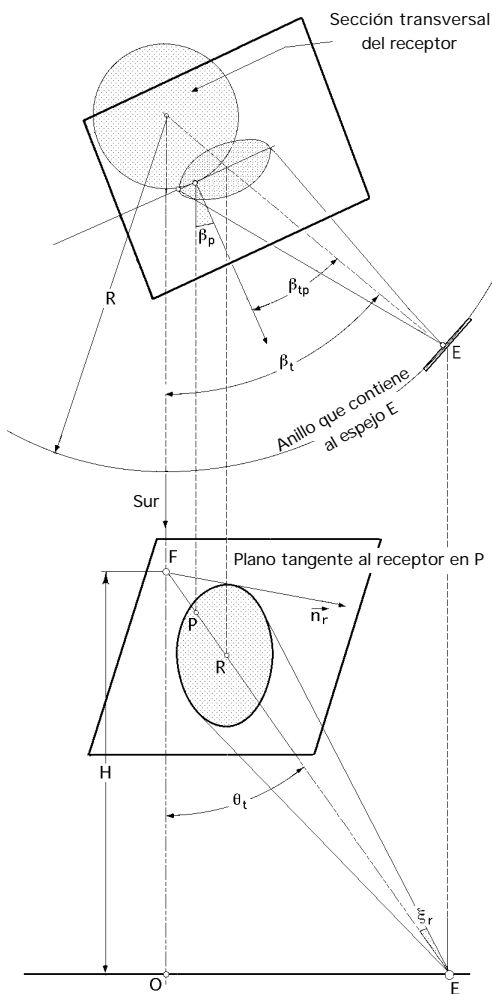


Fig X.3.- Imagen solar sobre el plano tangente a un receptor de revolución

$$d_u - d_v = \sec \frac{2 a \sqrt{Z - \frac{m^2}{b^2} \operatorname{tg}^2}}{Z}$$

que para $\theta_t = 0$, vale $2 a$; y valdrá 0 cuando se cumpla que, $\operatorname{tg} \theta_t = \pm \frac{b}{\sqrt{m^2 - a^2}}$

Para determinar los ángulos θ_t y ϕ_r en función de los parámetros que definen el espejo E y el punto P, haremos uso de las vistas de perfil del plano tangente en P, Fig X.3, en las que definiremos θ_{tp} como un ángulo relativo acimutal, que se corresponderá con la proyección horizontal del punto P, la base de la torre O, y la proyección horizontal del punto R. Cuando $\theta_{tp} = 0$, los puntos R y P estarán alineados con G.

Para calcular d_u partiremos de los triángulos (FGR) (FNR), obteniéndose,

Triángulo (FGR), $\overline{FG} = \overline{RF} \cos \theta_t$

$$\overline{RF} = \overline{FG} \sec \theta_t = z_0 \sec \theta_t$$

Triángulo (FNR), $\overline{RF} \cos \theta_t = z_0$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(m - x)^2 \operatorname{tg}^2}{b^2} = 1$$

cuyas soluciones serán las proyecciones de los puntos u y v sobre el eje mayor de la elipse, que a su vez nos determinarán las distancias d_u y d_v sobre la línea imagen (GP).

Para obtener estas distancias definiremos un nuevo origen de coordenadas G, tal que,

$$x' = m - x$$

por lo que, $d = x \sec \theta_t$, y la ecuación anterior queda en la forma,

$$(m - x')^2 + \frac{a^2}{b^2} x'^2 \operatorname{tg}^2 - a^2 = 0$$

de la que despejando x' , se obtiene para valor de $d_{u,v}$ lo siguiente,

$$d_{u,v} = \sec \theta_t \frac{m \pm a \sqrt{1 + \frac{\operatorname{tg}^2}{b^2} (a^2 - m^2)}}{1 + \frac{a^2 \operatorname{tg}^2}{b^2}} = \left| Z = 1 + \frac{a^2 \operatorname{tg}^2}{b^2} \right| = \sec \theta_t \frac{m \pm a \sqrt{Z - \frac{m^2}{b^2} \operatorname{tg}^2}}{Z}$$

y teniendo en cuenta el valor de (FG) quedará,

$$\cos = \frac{z_0 \cos_r + r_0 \operatorname{sen}_r}{z_0 \sec_t} = \left(\cos_r + \frac{r_0}{z_0} \operatorname{sen}_r \right) \cos_t$$

A su vez, en los triángulos (NJR) y (FNR) se cumple,

$$\overline{RN} = r_0 \sec_{tp} = z_0 \operatorname{tg}_t$$

y sustituyendo en la anterior se obtiene,

$$\cos = \cos_r \cos_t + \operatorname{sen}_r \operatorname{sen}_t \cos_{tp}$$

Para calcular partimos de,

$$\operatorname{sen} = \frac{\overline{RJ}}{\overline{RG}} = \left| \frac{\overline{RG} \cos = \overline{JG} = z_0 \operatorname{sen}_r - r_0 \cos_r}{\overline{JG}} \right| = \frac{r_0 \operatorname{tg}_{tp} \cos}{\overline{JG}}$$

$$\operatorname{sen} = \frac{r_0 \operatorname{tg}_{tp}}{z_0 \operatorname{sen}_r - r_0 \cos_r} = \frac{\operatorname{sen}_{tp} \operatorname{tg}_t}{\operatorname{sen}_r - \cos_r \operatorname{tg}_t \cos_{tp}}$$

que hay que sustituir en $d_{u,v}$.

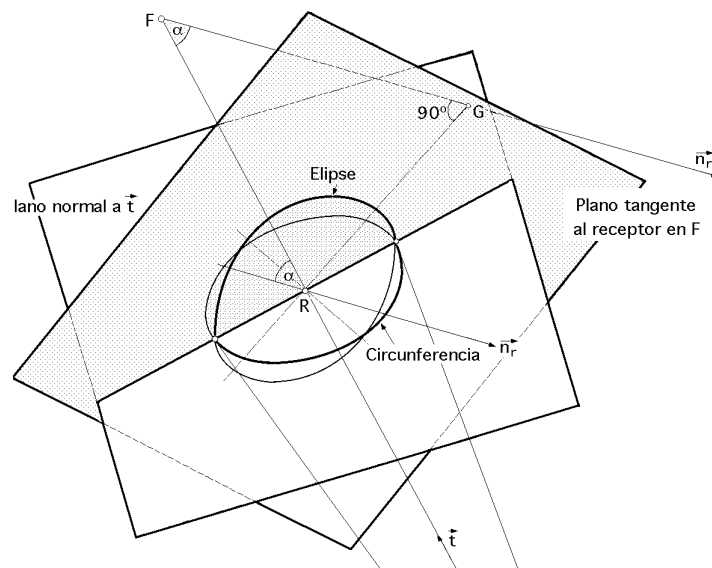


Fig X.4

La relación entre los semiejes de la elipse solar imagen plana sobre el plano tangente en P, se determina a partir de la Fig X.4, en la que se observa que esta elipse se proyecta según una circunferencia sobre el plano perpendicular a (RF), con centro en R.

La ecuación de la elipse solar imagen se puede poner en la forma,

$$y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}$$

y la ecuación

$$y^* = \sqrt{a^2 - x^2}$$

de la circunferencia concéntrica con esta elipse de radio a contenida en el plano perpendicular a (RF), formará un ángulo con la elipse, siendo,

$$y = y^* \cos \theta ; \quad \frac{y}{y^*} = \cos \theta = \frac{b}{a}$$

Se ha definido

$$r_s^* = r H$$

como el radio de la imagen solar plana circular reflejada sobre un plano perpendicular al vector \vec{t} , a la distancia H sobre la recta (EF) a partir del espejo E, siendo r el semiángulo de dispersión de la radiación reflejada, y r_s la distancia (BR); en consecuencia,

$$r = b \sin \theta ; \quad \frac{r_s^*}{H} = b \cos \theta ; \quad r_s^* = b H \cos \theta$$

por lo que los valores de los semiejes a y b de la elipse solar imagen plana serán de la forma,

$$b = r H \sec \theta$$

quedando así perfectamente definida la elipse sobre el plano tangente al receptor en el punto P.

X.3.- RECEPTOR DISCO PLANO HORIZONTAL

Cuando el receptor es un disco plano horizontal de radio r , y cuyo centro coincide con el punto de corte del disco con el eje de la torre, se pueden particularizar las ecuaciones anteriormente halladas, en la forma,

$$r = 0 ; \quad \theta = \theta_t ; \quad \tan \theta = -\tan \theta_{tp} ; \quad m = 0 ; \quad a = r H \sec^2 \theta_t ; \quad b = r H \sec \theta_t$$

y, por lo tanto,

$$d_{u,v} = \pm \frac{r H \sec \theta_{tp}}{\sqrt{Z} \cos^2 \theta_t} = \left| Z = 1 + \frac{a^2}{b^2} \tan^2 \theta = 1 + \sec^2 \theta_t \tan^2 \theta_{tp} \right| =$$

$$= \pm \frac{r H}{\cos \theta_t \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t \cos^2 \theta_{tp}}}$$

en la que a su vez si se define un factor \hat{r}^* de la forma:

$$\hat{r}^* = \frac{d_{u,v}}{r_s^*}$$

resulta para valor de $\cos \theta_{tp}$,

$$\cos \theta_{tp} = \frac{\pm \sqrt{1 - \frac{1}{\hat{r}^2} \cos^2 \theta_t}}{\sin \theta_t}$$

Cuando $d_{u,v}$ tome su valor máximo, $2r$, el máximo valor de $\cos \theta_{tp}$ será,

$$\cos \theta_{tp} = \frac{\pm \sqrt{1 - \frac{2}{r} \frac{H^2}{4 r^2 \cos^2 \theta_t}}}{\sin \theta_t} = \pm \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{2}{r}\right)^2 \frac{1}{4 \cos^2 \theta_t}}}{\sin \theta_t}$$

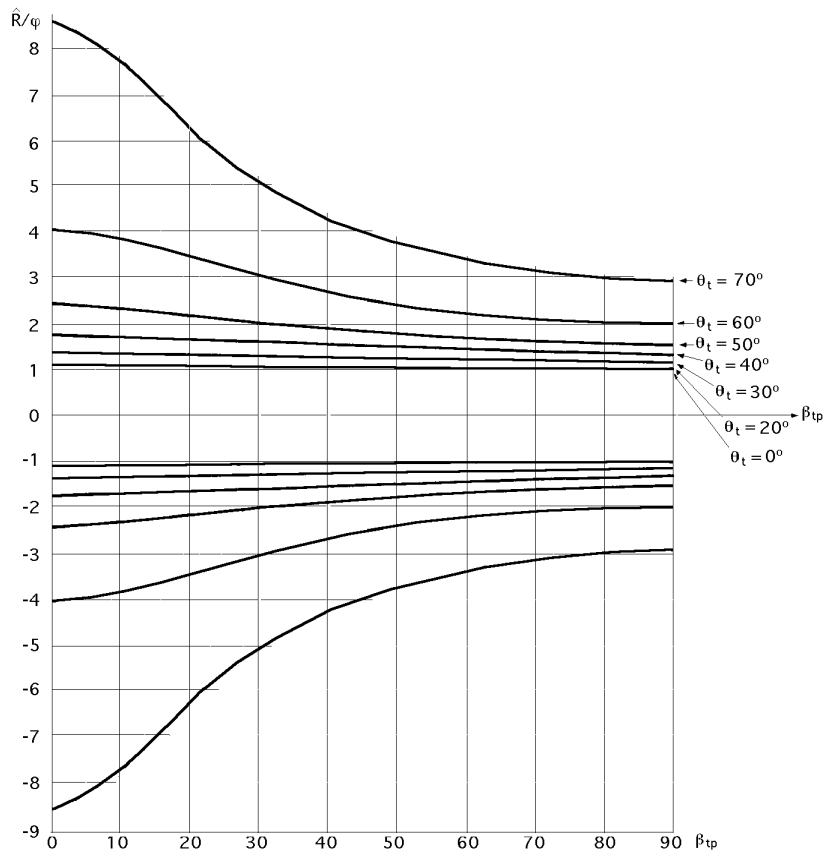


Fig X.5.- Curvas de influencia de los espejos respecto a un punto del receptor disco plano horizontal

A su vez, si dividimos la ecuación que da el valor de $d_{u,v}$ por r_s se tiene,

$$\frac{d_{u,v}}{r_s} = \pm \frac{r H}{r_s \cos \theta_t \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t \cos^2 \theta_{tp}}}$$

Llamando, $R = \frac{d_{u,v}}{r_s}$, y teniendo en cuenta que, $r H = r_s$, resulta:

$$\hat{R} = \pm \frac{1}{\cos \theta_t \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t \cos^2 \theta_{tp}}}$$

que permite hallar la zona de influencia de un espejo cualquiera respecto a una posición específica sobre el disco plano horizontal, y cuya representación hemos realizado en la Fig X.5, se observa que el ángulo θ_{tp} puede tomar cualquier valor entre 0° y 90° , por lo que cualquier punto sobre este receptor se podrá visualizar desde cualquier espejo del campo concentrador; para ángulos θ_t menores de 30° se obtienen, sobre el receptor, imágenes solares que prácticamente son circunferencias, para valores de $\frac{R}{r}$ comprendidos entre 1 y 1,3; para ángulos, $\theta_t > 30^\circ$, las imágenes solares planas sobre el receptor serán elipses.

X.4.- RECEPTOR CILINDRICO VERTICAL. CALCULO DE β_{tp}

Para el caso en que el receptor tenga forma de cilindro vertical, de radio r y altura h , y cuyo eje coincida con el de la torre, la línea imagen estará situada sobre el plano tangente al cilindro, y como \hat{n}_r es perpendicular al plano imagen, el punto G estará a la misma altura que el F, es decir, G es la proyección perpendicular sobre el plano tangente en P del punto focal F, siendo por lo tanto la imagen de F sobre este plano. Además $\theta_r = 90^\circ$ y, en consecuencia, se tiene,

$$\cos \theta_r = \sin \theta_t \cos \theta_{tp} \quad ; \quad \operatorname{tg} \theta_r = \sin \theta_{tp} \operatorname{tg} \theta_t$$

La localización sobre el receptor del centro R de la elipse solar imagen, la determinaremos por la distancia m desde G hasta R, de la forma,

$$m = \overline{RG} = r \operatorname{tg} \theta_r = r \frac{\sqrt{Z}}{\operatorname{tg} \theta_t}$$

siendo los semiejes a y b de la elipse solar plana sobre el plano tangente,

$$b = r_s^* \sec \theta_t$$

$$a = \frac{r_s^* \sec \theta_t}{\sin \theta_t \cos \theta_{tp}} \quad ; \quad \cos \theta_r = \sqrt{Z} \cos \theta_{tp}$$

que proporcionan el siguiente valor de $d_{u,v}$,

$$d_{u,v} = \frac{1}{\sin \theta_t} \sqrt{r \cos \theta_t \cos \theta_{tp} \pm \left(\frac{r_s^{*2}}{\cos^2 \theta_t} - r^2 \sin^2 \theta_{tp} \right)}$$

en la que $d_{u,v}$ tiene que estar comprendido entre d_u y d_v .

Este resultado permite determinar las zonas de visibilidad del receptor para un espejo cualquiera E, de forma que una posición d sobre el receptor podrá ser visible desde una parte de un anillo concreto, localizado a una distancia de la base de la torre, definida por su θ_t ; despejando el valor

de θ_p resulta,

$$\cos \theta_p = \frac{-d \cos \theta_t \pm \sqrt{d^2 + r^2 - \frac{r_s^{*2}}{\cos^2 \theta_t}}}{r \cos \theta_t}$$

El máximo valor de este ángulo tiene que ser compatible con las dimensiones del cilindro receptor; a su vez, el máximo valor de d tendrá que coincidir con el máximo valor de la línea imagen, igual a la altura h del receptor, para que no se pierda energía, pudiéndose poner la anterior en la siguiente forma,

$$\cos \theta_{p(\text{máx})} = \frac{-h \cos \theta_t \pm \sqrt{h^2 + r^2 - \frac{r^2 H^2}{\cos^2 \theta_t}}}{r \cos \theta_t}$$

encontrándose así un arco de anillo en el que se hallan los heliostatos que en un momento determinado permanecen activos respecto a una línea imagen vertical sobre el plano tangente al receptor en el punto considerado P.

Por comodidad pondremos el valor de $d_{u,v}$ en forma adimensional, para lo cual, las longitudes tomadas sobre el receptor las normalizaremos respecto a la longitud, $r_s = H$, que es, como sabemos, el radio del disco perfecto del Sol a la distancia H del heliostato.

Teniendo en cuenta los valores del factor de dispersión angular del haz de radiación solar reflejado a la distancia H del heliostato, el radio del disco solar reflejado sabemos es r_s^* por lo que dividiendo la ecuación que proporciona $d_{u,v}$ por r_s , y como,

$$r_s^* = r H = H = r_s$$

resulta,

$$\frac{d_{u,v}}{r_s} = \frac{1}{\sin \theta_t} \sqrt{\frac{r}{r_s} \cos \theta_t \cos \theta_p \pm \frac{1}{\cos^2 \theta_t} - \left(\frac{r}{r_s}\right)^2 \sin^2 \theta_p}$$

Introduciendo el cambio, $\frac{d_{u,v}}{r_s} = \hat{h}$; $\frac{r}{r_s} = \hat{r}$, se obtiene,

$$\hat{h} = \frac{1}{\sin \theta_t} \sqrt{\hat{r} \cos \theta_t \cos \theta_p \pm \frac{1}{\cos^2 \theta_t} - (\hat{r})^2 \sin^2 \theta_p}$$

Para hallar la zona de influencia de un espejo cualquiera respecto a una posición específica sobre el cilindro receptor, construimos las curvas que relacionan \hat{h} con θ_p en función de θ_t , para valores fijos de \hat{r} . En la Fig XI.6 se ha hecho la representación para, $\hat{r} = 3$.

A cada valor de β_{tp} le corresponderán dos de \hat{h} para cada anillo, dentro de los límites definidos por β_{tp} ,

$$\frac{1}{\cos^2 \theta_t} - \left(\frac{\hat{r}}{\hat{r}_s}\right)^2 \sin^2 \theta_t = 0$$

que hacen mínima la relación $\frac{\hat{h}}{\beta_{tp}}$; el valor de $\beta_{tp} = 0$, será el que haga máxima la función $\frac{\hat{h}}{\beta_{tp}}$.

Para una zona del receptor definida por ejemplo por $\frac{\hat{h}}{\beta_{tp}} = 1,5$, se encuentra que todos los heliostatos situados en la región del campo para valores de $\theta_t < 40^\circ$, permanecen inactivos respecto a la zona del receptor especificada, quedando oculta para estos espejos.

Los demás heliostatos, situados en anillos con, $\theta_t > 40^\circ$, permanecerán activos respecto a esta zona sobre el receptor, siempre que estén dentro de los límites definidos por β_{tp} .

El valor de $d_{u,v}$ dado por,

$$d_{u,v} = \hat{h} r_s = \hat{h} \frac{r}{\hat{r}} = \frac{\hat{h}}{\hat{r}} \frac{r}{\hat{r}} = \frac{\hat{h}}{\hat{r}} \frac{r}{3}$$

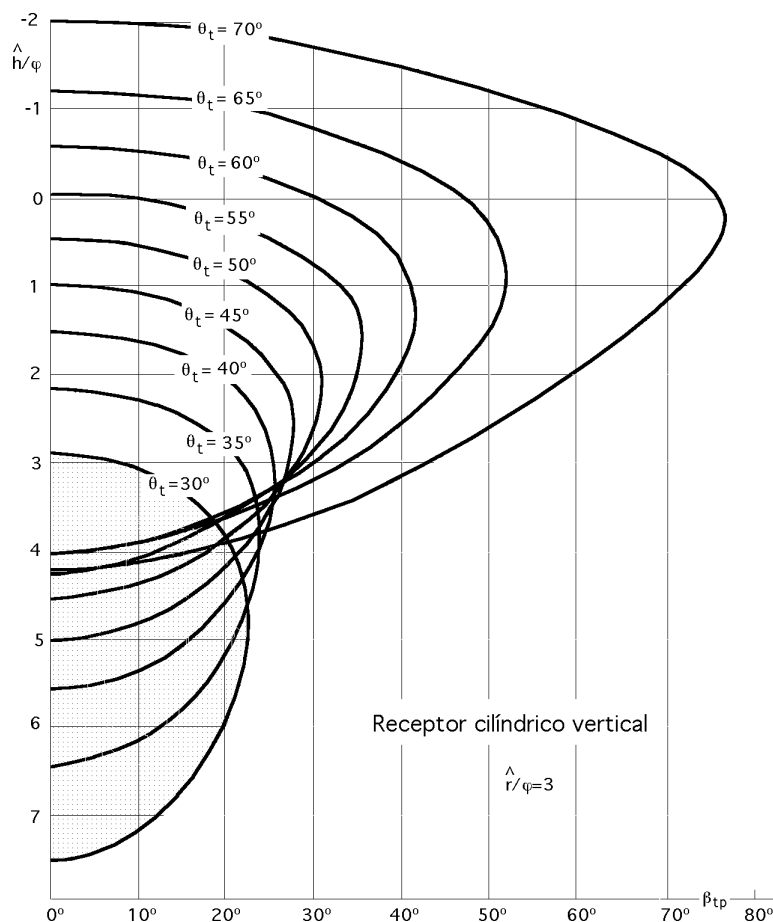


Fig X.6.- Curvas de visibilidad y de actividad de los espejos respecto a la línea imagen $\rho=0$

será máximo para $t_p = 0$, tomando para su cálculo el intervalo comprendido entre los valores de \hat{h} .

Cuando $t = t_M$ se obtiene el radio mínimo del receptor una vez fijada la altura h del mismo, y cuando t sea igual a t_m se obtiene la altura mínima h fijado el radio r .

Por estar los valores de $d_{u,v}$ relacionados con la altura h del receptor haremos, $d_{u,v} = h_{u,v}$, y la posición sobre el receptor de los valores \hat{h} , viene dada por:

$$h_{u,v} = \hat{h} r_s = \frac{\hat{h}}{H} \times 4,65 \cdot 10^{-3} (1,7236 + 107,5269 \frac{1 \cos t}{H}) H$$

pudiéndose obtener a partir de ella la altura mínima del receptor en función de la altura H de la torre, las dimensiones del campo, anchura del anillo, y el factor de dispersión angular de la luz solar reflejada por los espejos.

X.5.- DENSIDAD DE FLUJO ENERGETICO EN EL RECEPTOR

Teniendo en cuenta los efectos de sombra y apantallamiento, el área útil de un espejo infinitesimal situado en la posición E del campo, que forma parte de un anillo continuo de espejos, lo expresamos de la forma,

$$dS_u = k R dR d_t = k H^2 \sin^2 t \sec^3 t d_t d_{t_p}$$

ya que, $R = H \tan t$

La energía solar reflejada por este espejo infinitesimal es

$$dq' = I_0 dS_u$$

que supondremos se distribuye sobre la elipse imagen solar plana, de superficie efectiva

$$S_e = a b$$

Como r_s^* es el radio del círculo normal al vector \vec{t} , a la distancia H del espejo E , en donde se han incluido los fenómenos de dispersión, tendremos,

$$r_s^* = r H = H = r_s ; \quad \frac{r_s^*}{H} = \frac{b}{H} = \frac{b \cos t}{H}$$

obteniéndose,

$$S_e = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} H^2 \sec^2 t \sec$$

viniendo definida la densidad de energía solar elemental dq sobre el plano tangente al receptor en P , originada por este espejo infinitesimal, en la forma,

$$dq = \frac{I_0 dS_u}{S_e} = \frac{I_0 k}{2^2} \sin \theta_t \cos \theta_t d\theta_t d\theta_{tp}$$

que depende sólo de ángulos variables, θ_t , θ_{tp} , pero no de la altura H de la torre; hay que hacer notar que θ_t y θ_{tp} no están en el mismo plano.

X.6.- RECEPTOR DISCO PLANO HORIZONTAL

Sustituyendo en dS_u el valor de $\cos \theta$ dado por,

$$\cos \theta = \cos \theta_r \cos \theta_t + \sin \theta_r \sin \theta_t \cos \theta_{tp}$$

para el caso particular de, $\theta_r = 0^\circ$, ya que la normal por F al receptor coincidirá con el propio eje vertical del mismo, cumpliéndose que

$$\cos \theta = \cos \theta_t$$

por lo que la densidad de energía solar elemental incidente sobre el plano tangente al receptor en P, compatible con las condiciones de visibilidad del mismo será,

$$dq = \frac{I_0 k}{2^2} \sin \theta_t d\theta_t d\theta_{tp}$$

que integrada para todo el concentrador, para el caso en que predomine el apantallamiento, en que, $k = \cos \theta_t$, resultará,

$$q = \frac{I_0}{2^2} \int_{\theta_{t1}}^{\theta_{t2}} (\sin^2 \theta_t)_{\theta_s}^{t_m} d\theta_t d\theta_{tp}$$

ecuación que podrá aplicarse a un anillo individual, o a grupos de anillos continuos comprendidos entre los ángulos θ_{t1} y θ_{t2} , con la condición de que, $\theta_s < \theta_t$, resultando,

$$q = \frac{I_0}{2^2} \int_{\theta_{t1}}^{\theta_{t2}} (\sin^2 \theta_t)_{\theta_s}^{t_2} d\theta_t = C I_0$$

y como t_m es pequeño, resulta que esta ecuación se cumplirá muy pocas veces, dependiendo fundamentalmente de la latitud a la que se encuentre la central solar, por cuanto tiene que cumplirse que, $\theta_s < \theta_t$.

Cuando predomine la sombra solar, $k = \cos \theta_s$, tendremos,

$$q = \frac{2 I_0 \cos \theta_s}{2^2} \int_{\theta_{t1}}^{\theta_{t2}} (\cos \theta_t)_{\theta_s}^{\theta_t} d\theta_t d\theta_{tp}$$

en la que θ_{tp} puede tomar cualquier valor, por cuanto no existe ninguna restricción a que un punto P sobre el disco plano horizontal pueda ser visible desde cualquier punto del concentrador, es decir,

haciendo, $d_{u,v} = 0$, resulta,

$$\frac{\sec}{Z} = 0 \quad ; \quad \cos \theta_s \cos^2 \theta_{tp} = 0 \quad ; \quad \cos \theta_{tp} = 0 \quad ; \quad \theta_{tp} = \pm 90^\circ$$

y al igual que para el caso anterior, este resultado se podrá aplicar a un anillo individual o a un grupo de anillos continuo, entre los ángulos θ_{t1} y θ_{t2} , con la condición de que $\theta_s < \theta_t$

$$q = \frac{2 I_0 \cos \theta_s}{2 \cos^2 \theta_{tp}} (\cos \theta_{tp})^2 = C I_0$$

que tiene aplicación en un más amplio campo de valores de θ_s .

La energía total Q que llegará al receptor disco plano horizontal será,

$$Q = r^2 q = r^2 C I_0 = \left(\frac{r}{Z}\right)^2 C^2 I_0$$

en la que hay que sustituir el valor de C^2 , dado por las ecuaciones anteriores.

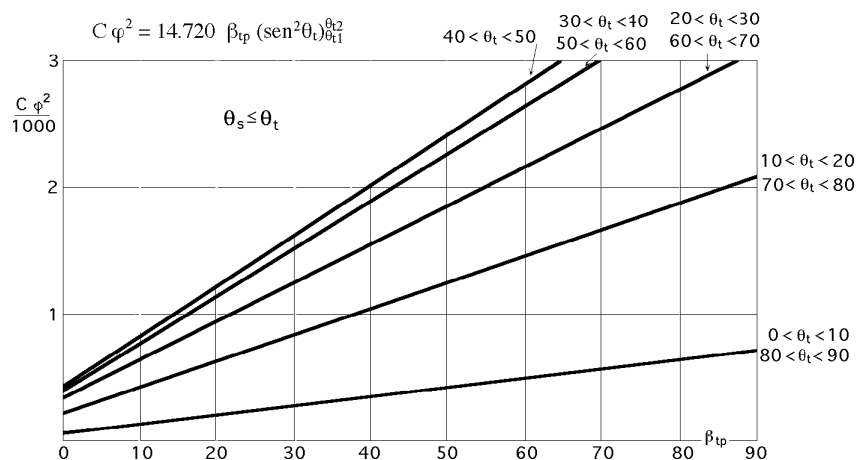


Fig X.7.- Valores de C^2 para el apantallamiento en un receptor disco plano horizontal

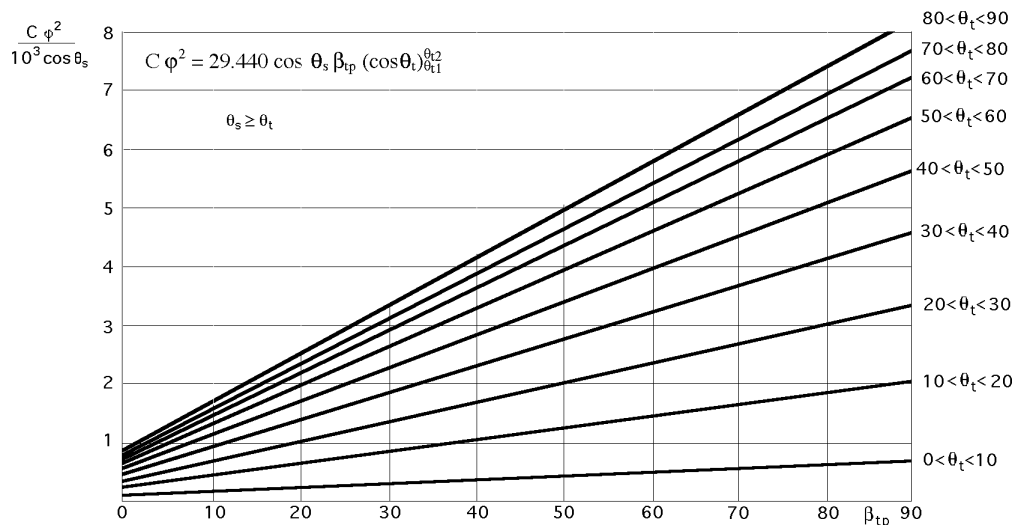


Fig X.8.- Valores de C^2 para la sombra solar en un receptor disco plano horizontal

Así, para el apantallamiento se tiene, $C^2 = 14720 \int_{t_1}^{t_2} (\sin^2 \theta) \cos^2 \theta_p d\theta d\theta_p$

cuya representación se corresponde con la Fig X.7, observándose que la franja de anillos que proporciona relaciones de concentración más elevadas corresponde a valores de θ comprendidos entre 40° y 50° .

Para la sombra solar, se tiene,

$$C^2 = 29440 \int_{s_1}^{s_2} (\cos^2 \theta) \sin^2 \theta_p d\theta d\theta_p$$

cuya representación se corresponde con la Fig X.8, para diversas franjas de anillos y valores de s determinados.

X.7.- RECEPTOR CILINDRICO VERTICAL

Para el caso de predominio del apantallamiento, la densidad de energía solar elemental reflejada por el concentrador viene dada por la ecuación,

$$dq = \frac{I_0}{2} \sin^2 \theta \cos \theta_p d\theta d\theta_p$$

que integrada para todo el campo de heliostatos proporciona,

$$q = \frac{2 I_0}{2} \sin \theta_p \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} \right) \Big|_{s_1}^{s_2}$$

y que se puede ampliar al caso en que consideremos un único anillo, o grupos de anillos continuos, entre los ángulos θ_1 y θ_2 , con la condición, $s < \theta$,

$$q = \frac{29440 I_0}{2} \sin \theta_p \left(\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} \right) \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} = C I_0$$

Para el predominio de sombra solar,

$$dq = \frac{I_0 \cos s}{2} \sin^2 \theta \sec \theta \cos \theta_p d\theta d\theta_p$$

$$q = \frac{2 I_0 \cos s}{2} \sin \theta_p \left\{ -\sin \theta + \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \right) \right\} \Big|_{\theta_1}^{\theta_2}$$

y al igual que para el apantallamiento, se podrá aplicar también a un anillo individual o a un grupo de anillos continuos comprendidos entre los ángulos θ_1 y θ_2 , con la condición de que, $s > \theta$, resultando

$$q = \frac{29440 I_0 \cos s}{2} \sin \theta_p \left\{ -\sin \theta + \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \right) \right\} \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} = C I_0$$

Estas ecuaciones nos dicen que mientras exista predominio de sombra solar sobre el apantallamiento, todos aquellos espejos situados en anillos para los que, $\theta_s > \theta_t$, estarán sometidos a sombra solar, mientras que para los demás valores en que, $\theta_s < \theta_t$, que comprenden al resto de los espejos, estarán sometidos a predominio del apantallamiento sobre la sombra solar; en ambos casos se observa que la densidad de energía solar es independiente del ángulo acimutal solar θ_s , y en cada instante la supondremos repartida sobre el receptor, según franjas de altura dh , pudiéndose interpretar como una energía por unidad de superficie que llega al receptor.

La representación gráfica de la ecuación anterior puede hacerse por franjas de anillos de anchura $\Delta\theta_t$; si consideramos por ejemplo, $\Delta\theta_t = 10^\circ$, obtendremos gráficas del tipo de las representadas en la Fig X.9.

La energía solar teórica y total Q que interceptará el receptor cilíndrico vertical, se puede determinar a partir de,

$$Q = 2 \int_0^{\beta_{tp}} r \int_{\hat{h}}^{\hat{r}} I_0 C dh = \left| \begin{matrix} r = \hat{r} r_s \\ h = \hat{h} r_s \end{matrix} \right| = \frac{2 \hat{r}}{(\hat{h})^2} I_0 C^2 d\left(\frac{\hat{h}}{r_s}\right)$$

en la que habrá que sustituir los valores de, C^2 , determinados anteriormente.

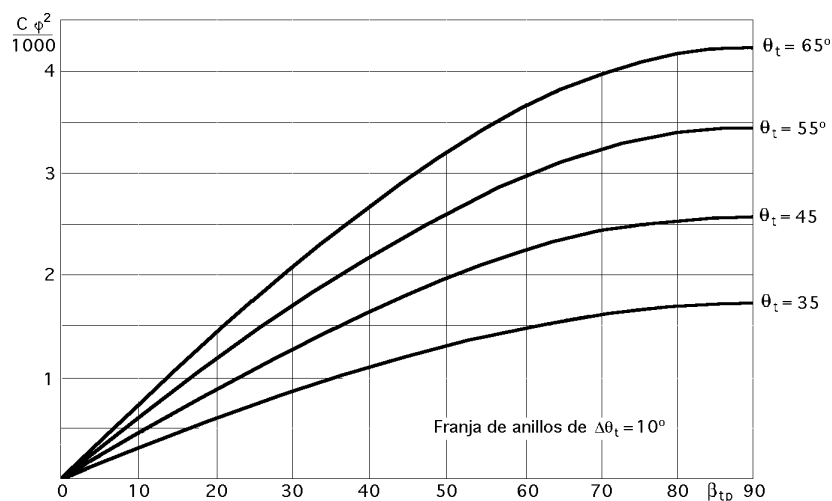


Fig X.9.- Relaciones de concentración de energía solar con apantallamiento sobre un receptor cilíndrico vertical

Para que el receptor capte todo el flujo solar reflejado por el campo especular, se debe cumplir que $\theta_{tp} = 0$, para cada espejo en particular, compatible con \hat{h} máximo, siendo θ_{tM} el caso más desfavorable. Teniendo en cuenta estas condiciones encontramos,

$$\hat{h} = \text{cosec } \theta_{tM} \left(\frac{\hat{r}}{r_s} \cos \theta_{tM} \pm \sec \theta_{tM} \right)$$

a partir de la cual se obtiene el valor de la altura mínima h del cilindro receptor de radio r , ya que,

$$h = r_s \hat{h} = H \hat{h} = \frac{\hat{h}}{H} \quad H$$

El radio mínimo del cilindro receptor se obtiene a partir de, $r = r_s \hat{r} = H \frac{\hat{r}}{\sin \theta}$

en la que \hat{r} tiene un valor determinado para cada anillo o grupos de anillos.

El valor de θ está comprendido entre los ángulos cenitales θ_{tm} y θ_{tM} que limitan el campo especular, para valores fijos de l y H . Todos los receptores cilíndricos verticales cuyo \hat{r} sea menor que el correspondiente a θ_{tM} , estarán sometidos a un flujo solar más pequeño, por cuanto no podrán interceptar todo el flujo solar reflejado por el concentrador, mientras que los que tengan \hat{r} superior al valor correspondiente a θ_{tm} , estarán sobredimensionados, aunque interceptarán todo el flujo solar reflejado por el concentrador.