VI.- CENTRALES TERMOSOLARES

ORIENTACIÓN DE HELIOSTATOS

pfernandezdiez.es

VI.1.- INTRODUCCIÓN

Las centrales de potencia termosolares de alta temperatura, para la transformación de la energía solar en eléctrica, mediante un ciclo termodinámico, consisten en general, en un adecuado ordenamiento de espejos, llamados heliostatos, situados sobre un terreno, ordenados y orientados automáticamente, para que en todo momento reflejen la radiación solar directa que incide sobre ellos, en un receptor situado a gran altura sobre el terreno en el que van ubicados los espejos, de forma que toda la energía se transporte al mismo tiempo por radiación.

En el diseño de una central de energía solar para la obtención de electricidad mediante un ciclo termodinámico recorrido por vapor de agua, se pueden considerar dos partes perfectamente diferenciadas:

- *El concentrador de energía solar*
- *El receptor de energía que se comporta como caldera del ciclo termodinámico*

La característica más notable de las centrales de potencia de energía solar, radica posiblemente, en que todos sus subsistemas utilizan tecnologías conocidas; así, el subsistema de conversión de la energía térmica del vapor en energía cinética de rotación en la turbina, y en electricidad en el alternador, son de tipo convencional, evitándose así la necesidad de un trabajo de investigación, al tiempo que se reduce la posibilidad de un error.

VI.2.- RECEPTORES

El receptor puede ir instalado en el centro del campo especular, o bien, desplazado hacia el

Sur, dando lugar a los campos Norte de heliostatos; el receptor debe estar situado en el campo visual de los espejos, lo cual se cumplirá tanto mejor, cuanto más elevado se encuentre, minimizándose así los problemas de interferencia y solapamiento entre espejos vecinos.

Desde el punto de vista de la absorción de energía, los receptores pueden ser de dos tipos:

- *De cavidad*
- *De recepción energética exterior*

Los receptores de ***cavidad*** pueden ser de eje vertical o de eje horizontal, tienen una abertura por la que penetran los rayos solares reflejados, que deben tener unas dimensiones mayores que las de los espejos más alejados, teniendo presente la dispersión de la luz reflejada. Dentro de la cavidad se puede conseguir una absorción de luz de hasta un 95%, y relaciones de concentración comprendidas entre 300 kW/m^2 y 3500 kW/m^2; esta absorción se puede lograr mediante una conveniente disposición de tubos negros, por cuyo interior circula un fluido que se quiere calentar, que deben adaptarse lo mejor posible a la forma de la cavidad, para evitar pérdidas de energía al exterior.

Los receptores de cavidad de eje horizontal, parecen ofrecer mayores ventajas para cuando la altura de la torre sea pequeña; en cambio, cuando los heliostatos estén muy próximos a la torre, se utilizan cavidades de eje vertical.

Los receptores que no son de cavidad, y que por lo tanto absorben la energía solar por su parte exterior, se diseñan generalmente como volúmenes de revolución, pudiendo ser su eje de simetría vertical u horizontal, dependiendo ésto de la forma del campo de heliostatos. Los tubos absorbentes se disponen externamente, formando la superficie lateral del receptor; su principal inconveniente radica en que las pérdidas térmicas al exterior, por convección y radiación, son mucho mayores que en los receptores de cavidad, pudiéndose paliar en parte, con una adecuada preparación de los tubos absorbentes, en los que el fluido motor se calienta, aumenta su entalpía, y podrá vaporizarse o no; si no se vaporiza, se le lleva a un intercambiador de calor, en donde en contracorriente se vaporiza otro fluido a expensas del calor cedido en la refrigeración del primero que procede del receptor.

Si el fluido que circula por los tubos absorbentes se vaporiza y recalienta en ellos, podrá utilizarse directamente en una turbina apropiada, acoplada convenientemente a un alternador.

El vapor condensará a la salida de la turbina y mediante un sistema de bombeo se introduce de nuevo al fluido en el receptor, cerrándose así un ciclo termodinámico. De esta forma pueden lograrse vapores recalentados a presiones comprendidas entre 100 Atm y 150 Atm, y temperaturas del orden de 550°C, como en cualquier central térmica convencional.

El receptor puede diseñarse de forma que sus tubos absorbentes de energía cumplan condiciones parecidas a las que soportarían en la cámara de combustión y radiación de una central térmica.

La liberación de calor durante la conversión termodinámica presenta un problema especial, y es el de la refrigeración, por cuanto por cada 100 MW de potencia obtenida, se necesitarían 20.000 m^3 de agua de refrigeración por hora; como es muy probable que las futuras centrales de potencia solares se instalen en desiertos o en tierras semiáridas, se comprende la necesidad de obtener este caudal de agua, lo cual restringirá notoriamente la elección de estos lugares.

VI.3.- EL CAMPO CONCENTRADOR

El campo concentrador está conformado por los heliostatos, que están formados por una serie de espejos planos, dispuestos convenientemente sobre una estructura soporte; pueden tener diversas geometrías, dependiendo fundamentalmente del tipo de receptor; en todo momento deben seguir el movimiento aparente del Sol, bien en forma individual mediante células ópticas, o en forma colectiva mediante ordenador, en el que su programa puede ser modificado diariamente, permitiendo a su vez seguir al Sol aún con cielo nublado.

La energía consumida para la dirección y orientación de los heliostatos es relativamente baja, ya que para un solo heliostato de 50 m^2 de superficie especular y 2 Tm de peso medio, se ha calculado son suficientes 60 W.

El concentrador de energía se puede diseñar de muchas formas, pero una muy cómoda es la de corona circular, en la que los heliostatos irían dispuestos según un ordenamiento a base de anillos concéntricos; en principio se pueden suponer de forma que no dejasen entre sí ningún espacio vacío, dando por lo tanto, en todo momento, la sensación de un campo especular continuo, es decir, la superficie de los espejos sería igual a la del terreno sobre la que iría ubicado el concentrador, solución que daría lugar a un rendimiento máximo desde el punto de vista energético, pero no del económico. Por lo tanto, los heliostatos deben ir en una disposición que mantenga entre ellos unas distancias determinadas, fijadas por un factor de rendimiento especular y de utilización del campo.

Para que toda la energía solar que llegue a este terreno pueda ser reflejada por el concentrador, existe el inconveniente de que la superficie especular del mismo no se puede utilizar al máximo, debido a fenómenos de solapamiento de sombras de unos heliostatos sobre otros; el modelo de campo continuo tiene la ventaja fundamental, de que todos los cálculos relativos a las propiedades del concentrador, y a las densidades de energía reflejadas por el mismo, pueden hacerse por integración; sin embargo ésto no supone ninguna restricción a los demás campos, que perfectamente pueden simular su funcionamiento mediante ordenador.

Para tener una idea de la energía reflejada, consideraremos el campo colector de espejos, como una disposición de anillos planos concéntricos, planteando los siguientes modelos de concentrador:

- *Modelo especular continuo de espejos infinitesimales,* en el que el campo colector consiste en un círculo especular, de centro la base de la torre, hasta un ángulo máximo que define la circunferencia

del círculo; cada espejo está perfectamente individualizado para que pueda cumplir con las leyes de la reflexión.

- *Modelo especular de dimensiones finitas,* considerando espejos planos cuadrados, dispuestos en anillos circulares; cada anillo estará formado por un conjunto de heliostatos, de forma que cuando todos estén horizontales, las distancias entre sus bordes serán nulas, constituyendo un campo continuo de espejos. Con esta disposición consideraremos dos casos:

Campo continuo desde la base de la torre hasta un ángulo periférico máximo

Campo continuo, para dos ángulos cenitales, comprendido entre los círculos de radios R_m y R_M respectivamente

- *Modelo especular discontinuo de anillos de heliostatos* en los que la distancia radial r entre anillos es mayor que la anchura l de cada uno

- *Se pueden considerar también concentradores formados por bandas de anillos especulares, que se corresponda con la anchura de un heliostato*

Según sea la posición del Sol, los heliostatos pueden interferirse mutuamente, en el sentido de que uno de ellos puede servir de pantalla de la radiación solar directa a uno o más que estén detrás, produciendo un efecto de sombra, o bien, bloquear la radiación solar reflejada por los heliostatos contiguos posteriores, reduciendo de esta forma la energía que es posible enviar sobre el receptor. Para reducir estos efectos conviene situar el receptor lo más alto posible sobre el terreno horizontal, que contiene al campo de heliostatos, al tiempo que los heliostatos se distancian entre sí.

VI.4.- CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS

Como el receptor va colocado a una cierta altura sobre el plano del concentrador, en el eje de simetría vertical del mismo, debe cumplir a su vez una serie de requisitos, que determinarán su forma y sus propiedades. Se puede considerar que la forma del concentrador tiene que imponer una simetría al receptor, que permita considerarle como un volumen de revolución. Su forma y tamaño, a su vez, dependerán de la distancia a que se encuentren los heliostatos de la base de la torre sobre la que iría ubicado el receptor.

Lo ideal sería que la normal a la superficie exterior del receptor, coincidiese en todo momento con la dirección de los rayos solares reflejados por los heliostatos, lo cual, para todo el concentrador, se conseguiría únicamente con un receptor semiesférico; cuando el ángulo cenital formado por los rayos reflejados fuese pequeño, se impondría el que el receptor tuviese forma de disco plano horizontal; si se aumenta este ángulo medio, la forma ideal sería la de un tronco de cono invertido, y para ángulos grandes, se impondría la forma de un cilindro vertical.

Para determinar los diversos parámetros que intervienen en una central termosolar conviene es-

tudiar por separado el concentrador y el receptor, obteniendo sus propiedades individualmente, pero con la condición de que la energía reflejada por el concentrador, tiene que ser la misma que intercepte el receptor, y de ahí poder obtener, no sólo las densidades energéticas correspondientes a diversos campos concentradores y tipos de receptores, sino su distribución sobre el receptor, para diversos grupos de anillos, y para el campo total, así como las propiedades comunes del conjunto concentrador-receptor.

Las características teóricas de un modelo de concentrador-receptor son numerosas y generales, por cuanto pueden ampliarse a otras formas de concentradores, por ejemplo, a sectores de corona circular, manteniendo o no el tipo de receptor, y utilizando la misma formulación, variando únicamente los límites de integración. Además, se puede aplicar también a receptores de cavidad de cualquier tipo, sustituyendo la superficie lateral de revolución del receptor, por su plano tangente.

Con medios informáticos se pueden simular el movimiento diurno aparente del Sol, y su proyección estereográfica sobre la superficie terrestre. A la hora de su aplicación se tendrán en cuenta los datos de insolación propios del lugar donde esté ubicado el campo concentrador presentando valores estadísticos sobre horas de insolación diarios, mensuales e incluso anuales

En la simulación por ordenador de los diversos modelos de campo concentrador, habrá que tener en cuenta que se les puede considerar como una disposición de espejos ordenados sobre el terreno según anillos circulares, con el terreno horizontal, aunque la formulación se puede ampliar a anillos circulares horizontales a diversos niveles, o sobre planos inclinados un ángulo y respecto a la horizontal; los anillos de espejos son concéntricos respecto a la base de la torre, en cuya cima va instalado el receptor, existiendo disposiciones rectangulares a las que también se puede aplicar lo mismo.

En cada instante, los heliostatos deberán tener una orientación muy concreta, ya que tendrán que seguir el movimiento aparente del Sol, reflejando la energía solar directa al receptor, por lo que la imagen solar reflejada estará en todo momento sobre el mismo, por lo tanto, podemos considerar el campo de espejos como un gigantesco campo móvil parabólico, en el que en cada instante ninguno de los espejos tiene la misma inclinación que cualquiera de ellos, y en el que los espejos ocuparán las posiciones de los planos tangentes a la familia de paraboloides de revolución, de eje la dirección de los rayos solares incidentes, y de foco, el receptor situado en lo alto de la torre, en los puntos en que esta familia corta al plano horizontal del terreno.

El sistema de seguimiento del movimiento aparente del Sol lo será por el método de orientación según dos ejes, vertical acimutal-horizontal de elevación (Alt-acimut), mediante un servomecanismo impulsado por motores eléctricos; cuando el modelo de receptor sea puntual, todos los espejos enfocarán a un punto único; si el modelo de receptor es cilíndrico vertical, los heliostatos enfocarán, bien por anillos, o bien por bandas de anillos, a puntos situados por encima o por debajo del punto focal F, obteniéndose una distribución de energía lo más uniforme posible sobre el receptor.

Los modelos que se desarrollan llevan asociados una serie de consideraciones prácticas de tipo general. Así, cada heliostato está constituido por un conjunto de espejos, de superficie de sección cuadrada; ésto se realiza así para abaratar su precio, tanto el de coste e instalación, como el de mantenimiento. Asimismo se tendrán en cuenta los errores de construcción y de dirección más característicos para la puesta a punto de los heliostatos, como:

- *Deformación del haz reflejado debido a la acción del viento sobre la estructura*
- *Errores en la cadena cinemática de dirección de espejos*
- *Errores constructivos en la perpendicularidad del eje*
- *Imperfecciones de las superficies reflectantes*
- *Errores de dirección de los espejos*

En consonancia con los modelos de concentradores consideraremos los siguientes modelos de receptor:

- Receptor puntual, para el modelo de campo de espejos infinitesimales, que permite concentraciones energéticas máximas

- Receptores en forma de cuerpo de revolución, cuyo eje coincidirá con el vertical de la torre, y que funcionan como auténticos intercambiadores de calor.

VI.5.- REALIDADES Y PROYECTOS

De entre los proyectos que en la actualidad están en desarrollo, bien en funcionamiento, o en período de construcción, citaremos algunos como:

La central solar Eurelius, en Adrano (Sicilia), proyecto patrocinado por la CEE, con una potencia de 1 MW; consta de 182 espejos, con 6.216 m^2 de superficie especular, y una torre de 55 m de altura.

En Estados Unidos destacan los proyectos a todos los niveles de los Laboratorios Sandia en los desiertos de New México, y sobre todos, la central solar de Barstow en California, con una potencia inicial de 10 MW y 1.816 heliostatos, dispuestos según un ordenamiento circular de radio máximo 400 m, con una superficie especular de 70.300 m^2, distribuidos en 0,4 km^2 de terreno; la altura de la torre es de 91 m, la temperatura máxima del vapor de 480°C, el coste estimado de 140 millones de dólares (1990) y puede abastecer de electricidad a una comunidad de 6.000 personas.

Otros proyectos son el Temis francés, con una potencia de 2 MW, o la central solar de Shikoku en Japón, con 1 MW de potencia.

En España, en la localidad almeriense de Tabernes, existen en funcionamiento varias centrales:

- El proyecto CESA I de 1 MW de tecnología totalmente española, con ciclo termodinámico de vapor de agua recalentado a 525°C y 110 atm y 300 heliostatos con una superficie especular de 12.000 m^2 dispuestos

sobre un campo con forma de sector circular; con la torre ubicada en el centro del círculo correspondiente y el receptor de cavidad de eje horizontal

- El proyecto SSPS promovido por la CEE; consta de dos centrales de 0,5 MW cada una, de las que una es de colector central, que utiliza sodio líquido como fluido motor, y campo rectangular de heliostatos, 95 en total, mientras que la otra es un sistema de concentración lineal, con una superficie colectora instalada de 5.600 m^2

En la actualidad existen en España, en funcionamiento, otras centrales de potencia de energía solar, como:

- Planta PS10 de 11 MW en Sanlúcar la Mayor, Sevilla 2007 (Abengoa); consta de 634 heliostatoa de 121 m^2 de superficie reflectante cada uno, torre de 114 m de altura y receptor con calderín

- Planta PS20 de 20 MW, en la misma zona anterior; consta de 1200 heliostatos de 121 m^2, y receptor en lo alto de una torre de 165 m.

- Central solar Gemasolar de 20 MW, que utiliza un sistema de almacenamiento térmico de sales fundidas, que permite generar electricidad durante 15 horas en ausencia de Sol. Ubicada en Sevilla, tiene 2650 heliostatos de 120 m^2, con el receptor ubicado a 140 m de altura.

Las posibilidades de ejecución de estos concentradores, desde un punto de vista teórico, son factibles, pudiéndose lograr potencias de varios cientos e incluso miles de MW; sin embargo, su elevado costo para proporcionar energías de este orden, les hacen prohibitivos e imposibles de llevar a la práctica, por cuanto en la actualidad, la energía eléctrica obtenida a partir de la energía solar mediante ciclos termodinámicos, se estima está en una relación 12/1 frente al coste en una central nuclear. Sin embargo, es de esperar que en unos pocos años se pueda reducir esta relación, y empezar a considerarla barata, ya que el precio de la materia prima, la energía solar directa, es gratuito, y sus reservas, inagotables.

El futuro en este campo, a pesar de los actuales avances en otras formas de energías alternativas, como la eólica, no ha hecho más que comenzar, y es de esperar que en un plazo más o menos corto, gran parte de las ciudades situadas en ciertos lugares estratégicos, como pudieran ser las proximidades de un desierto, sobre todo en países del Tercer Mundo, con muchas horas diarias de insolación, encontrarán en la energía solar la solución a sus problemas energéticos.

VI.6.- ORIENTACIÓN DE HELIOSTATOS

Los concentradores de energía solar formados por campos de heliostatos se deben diseñar para que funcionen en condiciones de máxima eficacia; en todo momento los heliostatos se orientan de forma que, para cualquier posición del Sol, los rayos que reflejen se dirijan a un punto fijo situado a una cierta altura sobre el nivel del campo concentrador. Las relaciones fundamentales que regulan la dirección de cada uno de estos heliostatos tienen que satisfacer las leyes de la reflexión y, por lo tanto, los ángulos de los rayos solares incidentes y reflejados, respecto a la normal a cada superficie

especular, tienen que ser iguales, estando situados los vectores que los definen, en cada instante, en un mismo plano.

La dirección de los rayos solares incidentes se define por un vector unitario $\vec{s}$

La dirección de los rayos solares reflejados hacia el foco puntual situado en lo alto de la torre por un vector unitario $\vec{t}$.

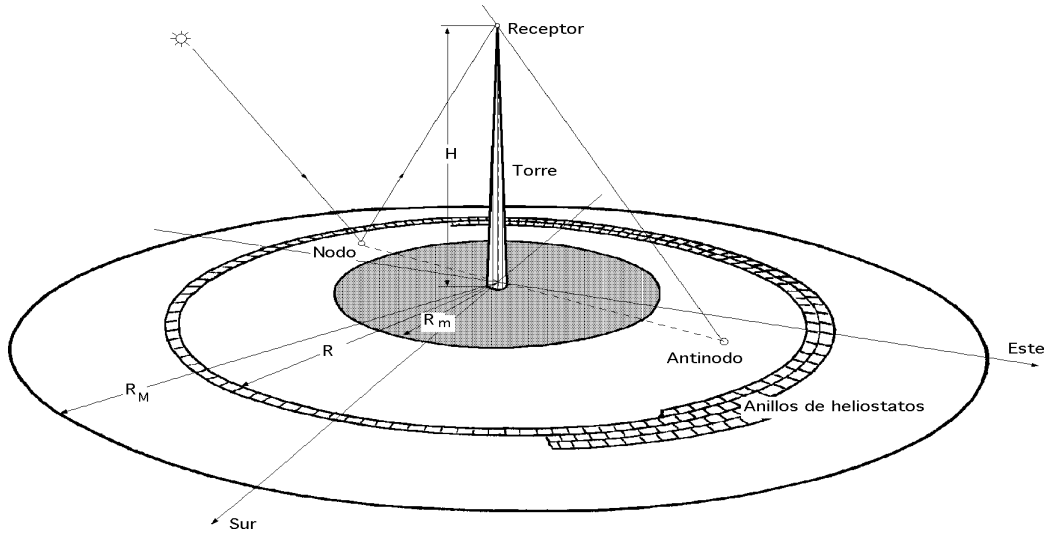

Fig VI.1.- Esquema de central termosolar

La normal al espejo en el centro geométrico del mismo, viene definida por un vector unitario $\vec{n}$; la posición del Sol en el instante dado viene fijada por el vector $\vec{s}$ apuntando hacia el centro del disco solar. Un espejo cualquiera E viene localizado en el concentrador por el vector $\vec{t}$, tomando como referencia el foco puntual F en el que se supone colocado el receptor de energía.

La orientación de este heliostato la especificaremos por su normal unitaria $\vec{n}$, Fig VI.1, de la forma:

$$\vec{n} = \frac{\vec{s} + \vec{t}}{\left| s + t \right|}$$

Esta ecuación constituye la relación básica de dirección para un heliostato cualquiera, viniendo definida en función del tiempo por cuanto $\vec{s}$ varía en cada instante, y en función del espacio por cuanto $\vec{t}$ relaciona el espejo E con el foco situado en lo alto de la torre.

Al ser los ángulos de incidencia y reflexión iguales se cumplirá además que:

$$\vec{n}\,\vec{s} = \vec{n}\,\vec{t} = \frac{N}{2}$$

Si se define un vector $\vec{N}$ de la forma:

$$\vec{N} = \vec{s} + \vec{t} \quad \Rightarrow \quad \vec{n} = \frac{\vec{N}}{N}$$

y premultiplicamos por $\vec{n}$ *la ecuación:* $\vec{N} = \vec{s} + \vec{t}$*, se obtiene:*

$$\vec{n}\, N = \vec{n}\, \vec{n}\, N = \vec{n}\, \vec{s} + \vec{n}\, \vec{t} = 2\, \vec{n}\, \vec{s} = 2\, \vec{n}\, \vec{t} \quad \Rightarrow \quad N = 2\, \vec{n}\, \vec{s} = 2\, \vec{n}\, \vec{t}$$

El vector $\vec{t}$ viene especificado por:

$$\vec{t} = \vec{N} - \vec{s} = \vec{n}\, N - \vec{s} = \vec{n}\, 2\, (\vec{n}\, \vec{s}) - \vec{s}$$

Movimiento aparente del Sol.- El movimiento aparente del Sol respecto a un lugar cualquiera de la superficie terrestre se puede determinar mediante los parámetros siguientes:

- *Posición del Sol*
- *Día del año*
- *Hora del día*

que a su vez se pueden definir mediante tres ángulos que representan la latitud λ del lugar donde está el concentrador, la declinación media del día δ y el ángulo horario τ.

La localización del Sol viene determinada por el vector $\vec{s}$ que definiremos mediante otros dos ángulos, $\begin{cases} \textit{cenital } \theta_s \textit{ respecto a la vertical del campo} \\ \textit{acimutal } \beta_s \textit{ respecto a la dirección (Norte-Sur), Fig VI.2} \end{cases}$

El valor de θ_s se obtiene mediante la ecuación de Benford y Bock, de la forma:

$$\cos\theta_s = \operatorname{sen}\delta\ \operatorname{sen}\lambda\ \cos\psi - \operatorname{sen}\delta\ \cos\lambda\ \operatorname{sen}\psi\ \cos\beta + \cos\delta\ \cos\lambda\ \cos\psi\ \cos\tau + \\ + \cos\delta\ \operatorname{sen}\lambda\ \operatorname{sen}\psi\ \cos\beta\ \cos\tau + \cos\delta\ \operatorname{sen}\psi\ \operatorname{sen}\beta\ \operatorname{sen}\tau$$

en la que ψ es el ángulo que forma el terreno con la horizontal; en nuestro caso $\psi = 0$, por lo que:

$$\cos\theta_s = \operatorname{sen}\delta\ \operatorname{sen}\lambda + \cos\delta\ \cos\lambda\ \cos\tau$$

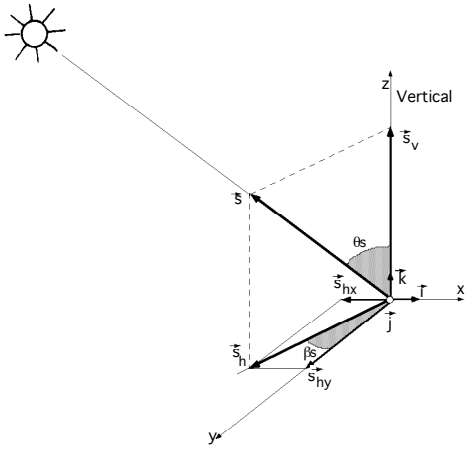

Fig VI.2.- Componentes del vector $\vec{s}$

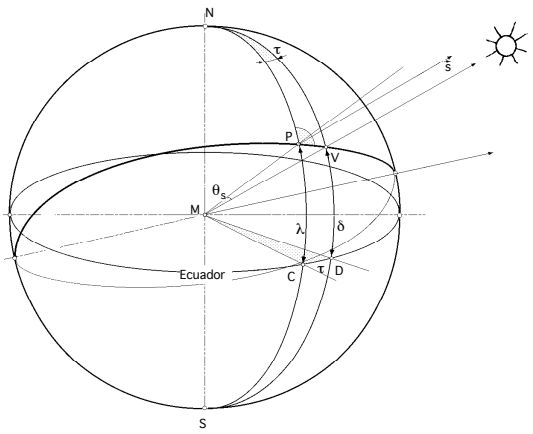

Fig VI.3

siendo τ el ángulo horario, 15° por hora, que viene medido en la Fig VI.3 por el arco (CD) sobre el Ecuador, y es el ángulo que tiene que girar la Tierra para colocar el meridiano que pasa por el punto P directamente debajo del Sol.

El ángulo de salida o puesta del Sol τ_s se obtiene haciendo en la ecuación anterior, $\theta_s = 90°$:

$$\cos \tau_s = - tg\ \lambda\ tg\ \delta$$

Para la declinación δ *se puede tomar el valor medio diario, al mediodía*, dado por la ecuación:

$$\delta = 23{,}45\ sen\ (360\ \frac{284 + Z}{365})$$

en la que Z es el día del año contado a partir del 1 de enero.

El valor de β_s se obtiene teniendo en cuenta la Fig VI.3 y la formulación de Bessel de trigonometría esférica; por el Teorema de Proporcionalidad de los senos:

$$sen\ \beta_s = \frac{sen\ \tau\ cos\ \delta}{sen\ \theta_s}$$

A su vez:

$$cotg\ (90 - \delta)\ sen\ (90 - \lambda) = cos\ (90 - \lambda)\ cos\ \tau + sen\ \tau\ cotg\ \beta_s$$

$$cotg\ \beta_s = \frac{tg\ \delta\ cos\ \lambda - sen\ \lambda\ cos\ \tau}{sen\ \tau}$$

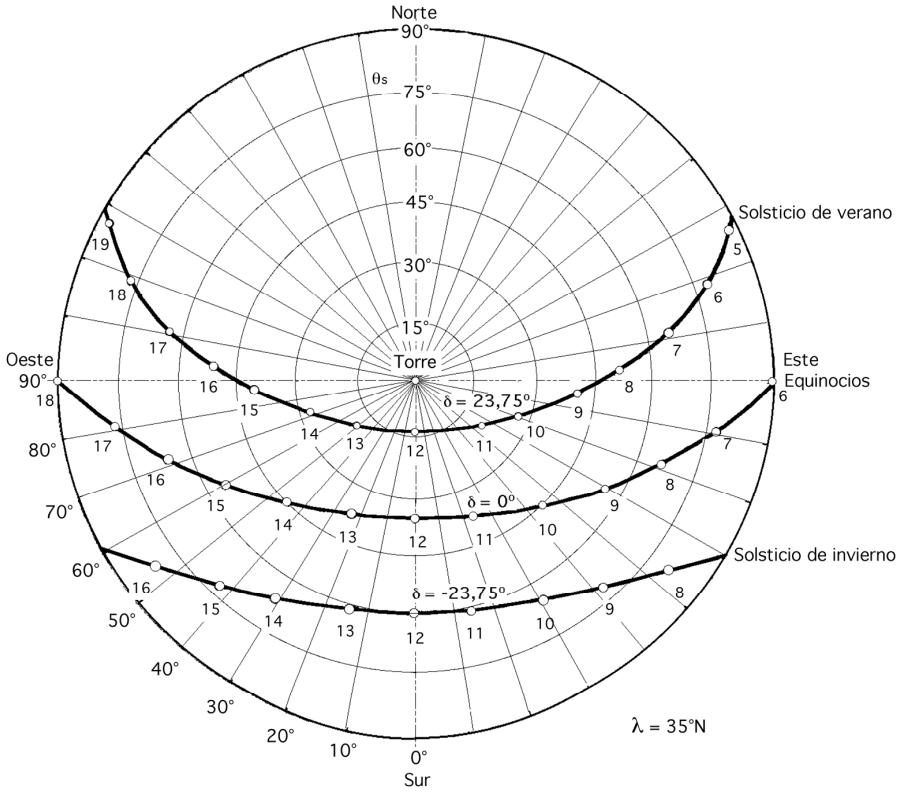

Fig VI.4.- Proyecciones estereográficas del movimiento aparente del Sol

Para el ángulo horario τ se obtiene:

$$cotg\ \theta_s\ sen\ (90 - \lambda) = cos\ (90 - \lambda)\ cos\ \beta_s + sen\ \beta_s\ cotg\ \tau \quad \Rightarrow \quad cotg\ \tau = \frac{cotg\ \theta_s\ cos\ \lambda - sen\ \lambda\ cos\ \beta_s}{sen\ \beta_s}$$

Combinando los pares de valores (θ_s, β_s) se obtienen unas gráficas que representan la proyección estereográfica del movimiento aparente del Sol sobre el terreno en el que se ha situado el campo concentrador, Fig VI.4.

La importancia de estas proyecciones solares radica en que, en cada instante, uno y sólo uno de los espejos que conforman el campo, va a coincidir con dicha proyección, lo cual a su vez implica el que ese espejo en concreto tenga su normal vertical en ese instante; a lo largo del día, el lugar geométrico de la proyección estereográfica del movimiento aparente del Sol sobre el terreno permitirá conocer qué espejos son los que en ese día, van a coincidir con dicho lugar geométrico, y por lo tanto, los que a lo largo del mismo van a permanecer durante un instante en posición horizontal.

Al espejo que en dicho instante cumpla con esta condición le llamaremos *nodo*, y todos los demás espejos del concentrador vendrán orientados respecto a éste.

El vector $\vec{s}$ en coordenadas cartesianas, de acuerdo con la Fig VI.2, viene dado por la ecuación:

$$\vec{s} = (-\ sen\ \theta_s\ sen\ \beta_s)\ \vec{i} + (-\ sen\ \theta_s\ cos\ \beta_s)\ \vec{j} + cos\ \theta_s\ \vec{k}$$

en la que sus componentes dependen únicamente de los ángulos θ_s y β_s.

Localización de los espejos en el concentrador.- La localización de un espejo cualquiera E viene dada por el vector $\vec{t}$ que sabemos coincide con la dirección de los rayos solares reflejados hacia el punto F situado en lo alto de la torre, que por la simetría del campo, supondremos ubicado en el centro geométrico del mismo.

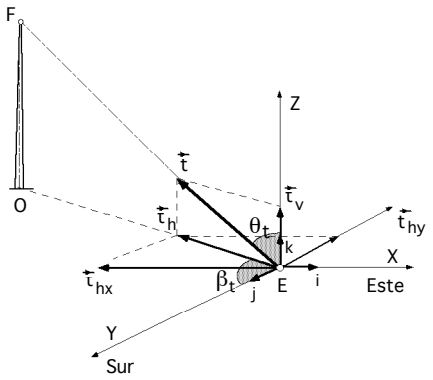

Fig VI.5.- Componentes del vector $\vec{t}$

El vector $\vec{t}$, Fig VI.5, viene definido por los ángulos θ_t y β_t

θ_t es un ángulo cenital, que se corresponde con una distancia radial sobre el plano del terreno dada por:

$$R = H\ tg\ \theta_t$$

siendo $\begin{cases} - R \text{ el radio de la circunferencia que con centro en la base de la torre, que pasa por el espejo E} \\ - H \text{ la altura a la que se encuentra el punto F respecto al plano del concentrador} \end{cases}$

β_t es el ángulo acimutal que forma la proyección horizontal τ_h de los rayos solares reflejados, respecto a la dirección Norte-Sur

Con esta nomenclatura, todos los espejos cuyos centros geométricos se encuentren sobre una circunferencia de radio R y centro O, formarán un anillo de espejos, y tendrán el mismo valor de θ_t; un espejo perteneciente a este anillo tendrá un valor de β_t único, que le diferenciará de los demás espejos, con lo que quedará perfectamente situado en el conjunto del concentrador, por lo que:

$$\vec{t} = (-\,sen\ \theta_t\ sen\ \beta_t)\,\vec{i} + (-\,sen\ \theta_t\ cos\ \beta_t)\,\vec{j} + cos\ \theta_t\ \vec{k}$$

VI.7.- ORIENTACIÓN DE LOS ESPEJOS

Cada espejo viene definido por su normal $\vec{n}$ que, a su vez, como se indica en la Fig VI.6, se puede poner también en función de dos ángulos $\begin{cases}\theta_n \text{ cenital que el vector } \vec{n} \text{ forma con la vertical del campo}\\ \beta_n \text{ acimutal que el vector } \vec{n} \text{ forma con la dirección Norte - Sur}\end{cases}$

Así, las componentes del vector $\vec{n}$, en coordenadas cartesianas son:

$$\vec{n} = (-\,sen\ \theta_n\ sen\ \beta_n)\,\vec{i} + (-\,sen\ \theta_n\ cos\ \beta_n)\,\vec{j} + cos\ \theta_n\ \vec{k}$$

de manera que los vectores $\vec{s}$, $\vec{t}$ y $\vec{n}$ conforman la siguiente matriz:

$$\begin{pmatrix} \vec{s} \\ \vec{t} \\ \vec{n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\,sen\,\theta_s\ sen\,\beta_s & -\,sen\,\theta_s\ cos\,\beta_s & cos\,\theta_s \\ -\,sen\,\theta_t\ sen\,\beta_t & -\,sen\ \theta_t\ cos\,\beta_t & cos\,\theta_t \\ -\,sen\,\theta_n\ sen\,\beta_n & -\,sen\ \theta_n\ cos\,\beta_n & cos\,\theta_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{pmatrix}$$

Una visión de los ángulos y vectores así definidos, la hemos representado en la Fig VI.7; de acuerdo con ella se tiene para valor de θ_n lo siguiente:

$$N\ cos\ \theta_n = \vec{s}_h + \vec{t}_h = cos\ \theta_s + cos\ \theta_t$$

$$tg\ \theta_n = \frac{\sqrt{N^2 - (cos\ \theta_s + cos\ \theta_t)^2}}{N\ cos\ \theta_n} = \frac{\sqrt{sen^2\theta_s + sen^2\theta_t + 2\ sen\ \theta_s\ sen\ \theta_t\ cos\ (\beta_t - \beta_s)}}{cos\ \theta_s + cos\ \theta_t}$$

y el valor de β_n se obtiene a partir de:

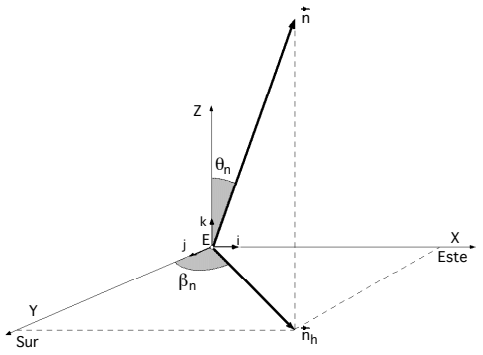

Fig VI.6.- Componentes del vector $\vec{n}$

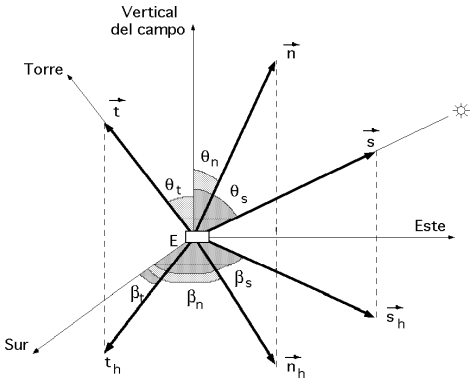

Fig VI.7.- Ángulos y vectores unitarios

$$\vec{N} = \vec{s} + \vec{t} = \vec{n}\, N =$$

$$= (-\,sen\ \theta_s\ sen\ \beta_s - sen\ \theta_t\ sen\ \beta_t)\ \vec{i}\ + (-\,sen\ \theta_s\ cos\ \beta_s - sen\ \theta_t\ cos\ \beta_t)\ \vec{j}\ + (cos\ \theta_s + cos\ \theta_t)\ \vec{k}$$

$$\vec{n}\, N = \{(-\,sen\ \theta_n\ sen\ \beta_n)\ \vec{i}\ - (sen\ \theta_n\ cos\ \beta_n)\ \vec{j}\ + (cos\ \theta_n)\ \vec{k}\}\ N$$

$$\left.\begin{array}{l} sen\ \beta_n = \dfrac{sen\,\theta_s\ sen\,\beta_s + sen\,\theta_t\ sen\ \beta_t}{N\ sen\,\theta_n} \\ cos\ \beta_n = \dfrac{sen\,\theta_s\ cos\,\beta_s + sen\,\theta_t\ cos\,\beta_t}{N\ sen\,\theta_n} \end{array}\right\} \Rightarrow \quad tg\ \beta_n = \frac{sen\,\theta_s\ sen\,\beta_s + sen\,\theta_t\ sen\,\beta_t}{sen\ \theta_s\ cos\,\beta_s + sen\,\theta_t\ cos\,\beta_t}$$

$$\frac{sen\ \theta_s}{sen\ \theta_t} = \frac{sen\ (\beta_t - \beta_n)}{sen\ (\beta_n - \beta_s)} = \frac{sen\ \beta_{t-n}}{sen\ \beta_{n-s}}$$

ecuaciones que permiten desarrollar una primera interpretación de las características ideales espacio-tiempo de los espejos, considerando en lo que sigue, al campo especular como una función del espacio e intentar ver qué es lo que sucede con los espejos que cumplen unas condiciones en un instante fijo y determinado, y también como una función del tiempo, teniendo perfectamente localizadas las posiciones de los espejos sobre el concentrador.

VI.8- ORIENTACIÓN ESPACIAL DE LOS ESPEJOS

Para estudiar la orientación espacial de los espejos hay que considerar un instante fijo del día, especificado por el vector solar $\vec{s}$; esta orientación se visualiza mediante dos tipos de gráficas:

- *Líneas de igual acimut, o líneas* $\beta_n = Cte$
- *Líneas de igual ángulo cenital, o líneas* $\theta_n = Cte$

que se pueden representar en función de θ_t y β_t obteniéndose un tipo de curvas que son función, únicamente, del ángulo cenital solar θ_s cuyos valores oscilan entre -90° < θ_s < +90°; la representación más sencilla será aquella en la que el Sol se encuentre en su posición máxima que, teóricamente, se corresponderá con $\theta_s = 0^o$, encontrándose:

$$tg\ \theta_n = \frac{sen\ \theta_t}{1 + cos\ \theta_t} = tg\ \frac{\theta_t}{2} \quad ; \quad \theta_n = \frac{\theta_t}{2}$$

$$tg\ \beta_n = tg\ \beta_t \quad ; \quad \beta_n = \beta_t$$

lo cual quiere decir que para $\theta_s = 0^o$, (el Sol en la vertical del campo), la representación de las líneas de igual β_n son líneas radiales que se cortan en el punto O, centro del concentrador, y las líneas de igual inclinación θ_n son círculos concéntricos de centro O, lo que implica que el espejo colocado en O

coincide con el nodo.

Sin embargo, ésto no sucede en realidad, por cuanto θ_s no alcanza nunca el valor cero y, por lo tanto, el nodo N estará situado en un punto sobre la proyección sobre el terreno de los vectores $\vec{s}$ y $\vec{t}$, contenidos en un plano vertical, de forma que se cumpla en todo momento que $\theta_n = 0^o$, lo cual permite hacer constar que al tratar al nodo como un punto singular de la distribución especular del concentrador, en cada instante, siempre se podrá visualizar la variación de los ángulos de inclinación de los espejos, respecto del tiempo, observando la variación de la posición de nodo.

Como el lugar geométrico de las posiciones del nodo es idéntico a la intersección con el plano del terreno de los rayos solares incidentes que cumplan con la condición $\theta_s = \theta_t$ se podrá obtener una distribución completa de las inclinaciones de los espejos, junto con sus posiciones, haciendo coincidir, en todo instante, la proyección estereográfica del movimiento aparente del Sol sobre el terreno, con el nodo correspondiente a la posición aparente del Sol en ese instante.

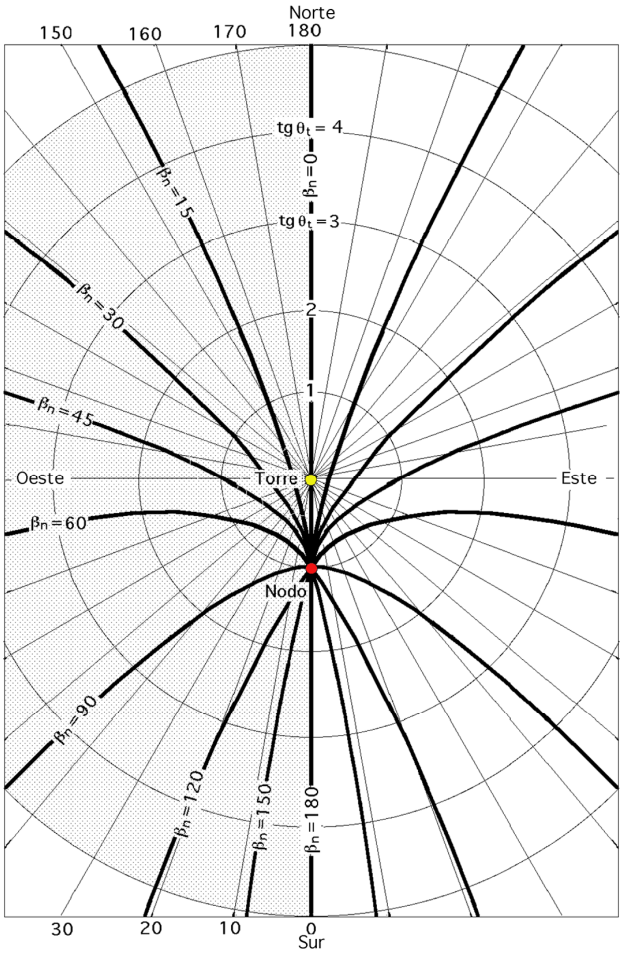

Fig VI.8.- Líneas de igual ángulo acimutal β_n

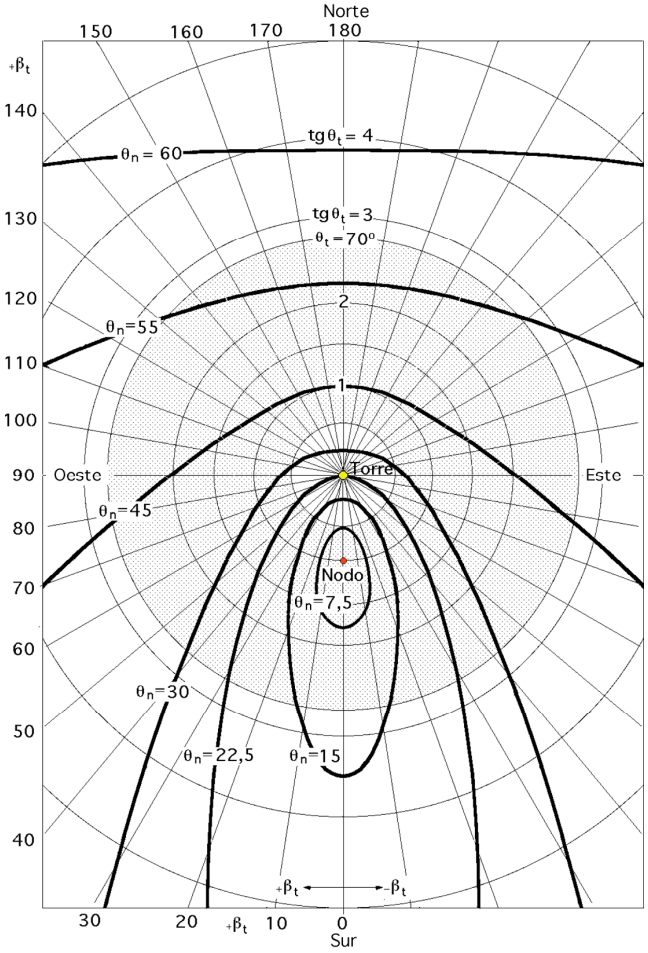

Fig VI.9.- Líneas de igual ángulo cenital θ_n

Para completar la orientación espacial de los espejos hay que trazar las curvas de $\beta_n = Cte$; se puede simplificar el cálculo haciendo que $\beta_{n-s} = \beta_n$ lo cual supone que el eje de simetría le hemos hecho coincidir con $\beta_s = 0$, es decir, con la proyección sobre el plano del terreno del plano vertical formado por los vectores $\vec{s}$ y $\vec{t}$ que cumplan tal condición, Fig VI.9.

Para un instante cualquiera del día determinado por su θ_s fijo, al dar a θ_t un valor, se obtienen las componentes correspondientes a β_n y β_t.

Haciendo $\beta_t = 0$, se tiene: $\beta_{n-s} = \beta_n = 0^o$, que se corresponde con un valor de β_t que coincide con el nodo. Para cualquier otro valor de θ_t siempre que $\beta_{t-s} = \beta_t = 0^o$ las curvas de igual acimut pasarán por el mismo punto, el nodo. En las Fig VI.8 y 9 se ha hecho una representación para un ángulo $\theta_s = 45^o$, habiendo considerado $tg\ \theta_t$, en lugar de θ_t ; para hallar los ángulos de inclinación cenital y acimutal de un espejo determinado, no hay más que situar éste en el campo y de acuerdo con la posición de la torre, que se tomará como origen de coordenadas, hallar las líneas que pasan por él.

El espejo diametralmente opuesto al nodo, sobre el mismo anillo de radio R, también tiene $\theta_s = \theta_t$ pero en este caso, este espejo es el único perpendicular a los rayos solares incidentes y a los rayos reflejados, por lo que los vectores $\vec{n}$, $\vec{s}$ y $\vec{t}$ coincidirán; dicho en otras palabras, este espejo estaría en la posición de la sombra proyectada por el punto focal F sobre el terreno.

VI.9.- ORIENTACIÓN TEMPORAL DE LOS ESPEJOS

Las ecuaciones que definen a θ_n y β_n se pueden poner en función del ángulo horario mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} \cos\theta_n = \dfrac{1}{N\,(\cos\theta_s + \cos\theta_t)} = \dfrac{1}{N\,(sen\,\delta\ sen\,\lambda + \cos\delta\ \cos\lambda\ \cos\tau + \cos\theta_t)} \\ tg\,\beta_n = \dfrac{sen\,\tau\ \cos\delta + sen\,\theta_t\ sen\,\beta_t}{sen\,\theta_t\ \cos\beta_t + \cos\delta\,sen\,\lambda\cos\tau - \cos\lambda\ sen\,\delta} \end{cases}$$

en las que se ha tenido en cuenta que $\begin{cases} \cos\theta_s = sen\,\delta\ sen\,\lambda + \cos\delta\ \cos\lambda\ \cos\tau \\ sen\,\beta_s = \dfrac{sen\,\tau\ \cos\delta}{sen\,\theta_s} \end{cases}$

El valor de N se obtiene como sigue:

$$\vec{N} = \vec{s} + \vec{t} = \vec{n}\,N$$

$$\vec{n}\,N = \vec{n}\,\vec{s} + \vec{n}\,\vec{t} = 2\,\vec{n}\,\vec{s} = 2\,\vec{n}\,\vec{t} = N \quad \Rightarrow \quad \vec{n}\,\vec{s} = \vec{n}\,\vec{t} = \frac{N}{2}$$

$$\vec{t}\,N = \vec{t}\,\vec{s} + \vec{t}\,\vec{t} = \vec{t}\,\vec{s} + 1 = \vec{t}\,\vec{n}\,N = \frac{N^2}{2} \quad \Rightarrow \quad N = \sqrt{2\,(\vec{t}\,\vec{s} + 1)}$$

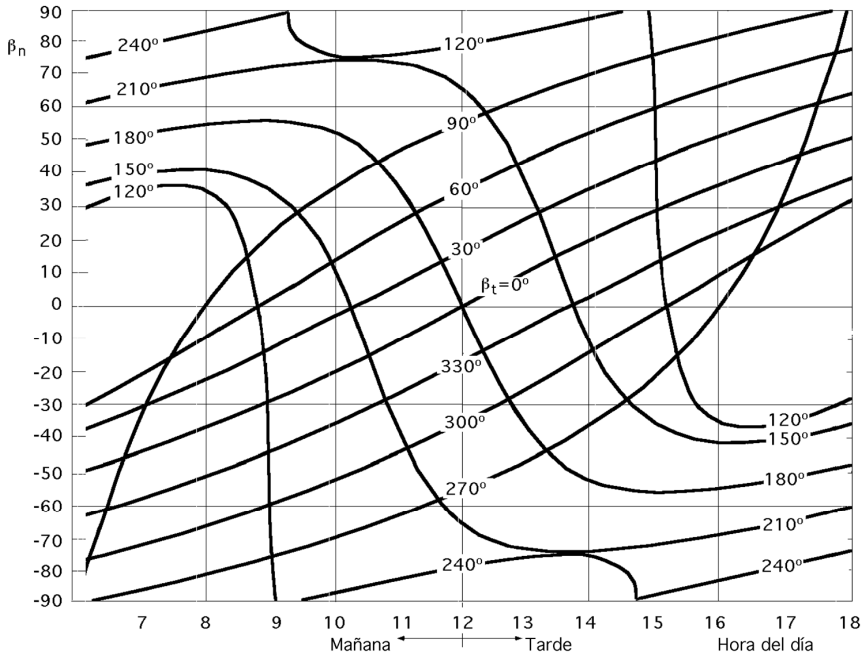

Fig VI.10.- Ángulos acimutales, θ_t = 60º ; δ = 0º ; λ= 35ºN

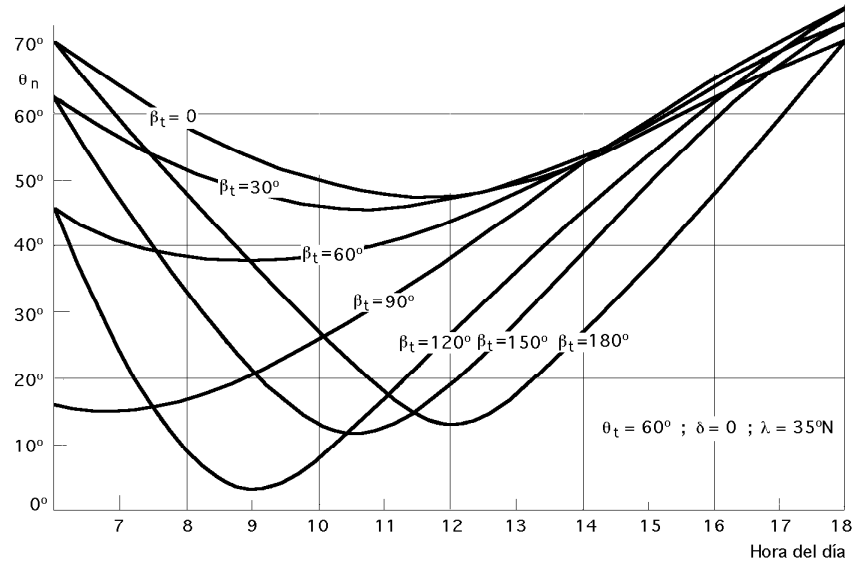

Fig VI.11.- Ángulos cenitales, θ_t = 60º ; δ = 0º ; λ= 35ºN

y teniendo en cuenta los valores de $\vec{s}$ y $\vec{t}$ se obtiene:

$$N = \sqrt{2\,(\cos\theta_s\ \cos\theta_t + \operatorname{sen}\theta_s\ \operatorname{sen}\theta_t\ \cos\beta_{t\text{-}s} + 1)} =$$

$$= \sqrt{2}\sqrt{1 + \cos\theta_t\{\operatorname{sen}\lambda\ \operatorname{sen}\delta + \cos\lambda\ \cos\delta\ \cos\tau + \operatorname{sen}\theta_t\ \operatorname{sen}\beta_t\ \cos\delta\ \operatorname{sen}\tau + \operatorname{sen}\theta_t \cos\beta_t(\operatorname{sen}\lambda\ \cos\delta\ \cos\tau - \cos\lambda\ \operatorname{sen}\delta)\}}$$

a aplicar en el cálculo de $\cos\theta_n$.

Con las ecuaciones anteriores se puede estudiar el comportamiento de los espejos de un anillo

cualquiera definido por su θ_t , en un determinado día del año fijado por su declinación media δ , en la latitud λ , y a una hora dada del día Z, definida por su ángulo horario τ en función de β_n . Dicho anillo tendrá un número finito de espejos, viniendo cada uno de ellos perfectamente localizado por su θ_t y β_t .

Conviene que un espejo vaya colocado en la posición $\beta_t = 0^o$ y, los demás dispuestos simétricamente respecto a la dirección Norte-Sur, y así poder analizar el comportamiento de tan solo la mitad de los espejos del anillo, por cuanto su funcionamiento por la mañana sería el mismo que el de los no estudiados por la tarde, y viceversa.

La posición del nodo queda fijada para $\theta_s = \theta_t$ obteniéndose el ángulo horario correspondiente con ayuda de la ecuación que proporciona el $cos\ \theta_s$; de igual manera se puede hallar su β_t teniendo en cuenta la ecuación que proporciona $tg\ \beta_n$, aplicando las condiciones impuestas por el punto nodal.

La representación que se hace en las Fig VI.10 y 11 se corresponde con los ángulos acimutales y cenitales que cada espejo irá tomando dentro del anillo correspondiente, definido por su θ_t común a todos los espejos del mismo y por el β_t propio de cada espejo.