

MÉTODO DEL CAMPO UNIVERSAL PARA EL CÁLCULO DE CAMPOS DE HELIOSTATOS DE CENTRALES TERMOELÉCTRICAS HÍBRIDAS BAGACERAS-SOLARES

Por Luis Bérriz Pérez*

* Presidente de la Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto ambiental, Cubasolar.

Resumen

El trabajo trata sobre la determinación de las características que debe tener un campo de heliostatos de una planta de generación de electricidad híbrida de bagazo y solar, como variante independiente del uso de las fuentes renovables de energía en el contexto cubano actual por el desarrollo sostenible.

Las centrales termoeléctricas solares del tipo de «torre» no se consideran entre las instalaciones de mayores perspectivas en la sustitución de las fuentes de energía convencionales, precisamente por su alto costo.

Pero en el caso de las centrales eléctricas bagaceras, la parte de las turbinas y generadores de electricidad se construyen y quedan libres durante buena parte del año. O sea, solo es necesario considerar la parte generadora de vapor en estas centrales solares, esto es, el campo de heliostatos. Una variante económicamente ventajosa a considerar es la construcción de una central termoeléctrica híbrida a partir del bagazo y la radiación solar como fuentes renovables de energía.

Por este motivo se ha procedido, en este trabajo, a la optimización de la forma y el movimiento de cada heliostato del campo, además de su posición más adecuada dentro del terreno con relación a la caldera, previamente seleccionada. Este método se diferencia por esto de los métodos actualmente utilizados, los cuales seleccionan en primer lugar, el tipo de heliostato y realizan solamente optimizaciones parciales del sistema. Si se tiene en cuenta que un campo está compuesto generalmente por miles de heliostatos, con un costo de miles de pesos cada uno, se podrá comprender la necesidad de trabajar con los parámetros optimizados. Al final del trabajo se dan los datos de optimización tanto del campo como de los heliostatos.

Palabras clave: Bioeléctrica, planta termoléctrica solar, heliostato, campo de heliostatos, alternativas de integración; biomasa cañera; cogeneración; esquemas energéticos; generación de electricidad.

UNIVERSAL FIELD METHOD FOR CALCULATING HELIOSTAT FIELDS OF BAGACERAS-SOLAR HYBRID THERMOELECTRIC PLANTS

Abstract

The work deals with the determination of the characteristics that a heliostat field must have of a plant for the generation of hybrid electricity from bagasse and solar, as an independent variant of the use of renewable energy sources in the current Cuban context for sustainable development.

Solar thermal power plants of the «tower» type are not considered among the facilities with the greatest prospects for replacing conventional energy sources, precisely because of their high cost.

But in the case of bagasse power plants, part of the turbines and electricity generators are built and free for much of the year. That is, it is only necessary to consider the steam generating part in these solar power plants, that is, the heliostat field. An economically advantageous variant to consider is the construction of a hybrid thermoelectric plant from bagasse and solar radiation as renewable sources of energy.

For this reason, we have proceeded, in this work, to optimize the shape and movement of each heliostat in the field, in addition to its most appropriate position on the ground in relation to the boiler, previously selected. This method differs by this from the methods currently used, which first select the type of heliostat

and only perform partial system optimizations. If one takes into account that a field is generally composed of thousands of heliostats, with a cost of thousands of pesos each, the need to work with optimized parameters can be understood. At the end of the work the optimization data of both the field and the heliostats are given.

Keywords: Bioelectric, solar thermoelectric plant, heliostat, heliostat field, integration alternatives; cane biomass; cogeneration; energy schemes; electricity generation.

Introducción

En el período de transición de una política energética dependiente y contaminante hacia una independiente y que garantice el desarrollo sostenible, cobra una importancia relevante la organización energética basada en las redes locales con el uso de los recursos energéticos locales y muy especialmente los residuales agropecuarios junto con la radiación solar, el viento y el agua. Por definición, las redes energéticas locales son híbridas pues aprovechan todas las posibles fuentes energéticas locales económicamente disponibles.

En Cuba, una de las fuentes renovables disponibles es el bagazo, un producto residual en la fabricación de azúcar y que pudiera convertirse en un gran problema de contaminación o en la solución de muchos problemas, en dependencia de los que decidan sobre su uso. Un uso es en la producción de electricidad. Pero la zafra es de solo tres a cinco meses como máximo.

Una de las ventajas de las termoeléctricas bagaceras es que pueden ser concebidas con acumulación en este caso, de bagazo y calor, y entregar dentro de determinado rango la electricidad en dependencia de sus necesidades. Pero en todo caso la planta trabajaría con bagazo solamente menos de la mitad del tiempo anual. El tiempo restante de la termoeléctrica con los generadores de vapor y electricidad sería tiempo muerto.

Una de las variantes que se han considerado es el uso del marabú, el cual ha infestado nuestros campos. De esta manera, dichos campos quedarían libres para poder sembrar de nuevo caña de azúcar. Otra variante es sembrar alguna planta energética, por ejemplo, caña energética, y así poder trabajar el año entero o la mayor parte del tiempo.

Otra variante a considerar es hacer una termoeléctrica bagacera solar, ya que dentro de las plantas solares una de las partes que más cuesta son las turbinas y los generadores eléctricos y en este caso ya existen, lo que pueden hacer a la planta que trabaje con la radiación solar económicamente ventajosa. Puede considerarse la variante de generar 50 % del vapor diario con radiación solar y el otro con bagazo y extender el uso del bagazo el año entero.

En todo caso se hace necesario saber las características del campo de heliostatos a utilizar en las condiciones de Cuba. Este trabajo va específicamente dedicado a ese propósito.

Descripción del método del campo universal para el cálculo de campos de heliostatos de centrales termoeléctricas solares

Como primer paso se selecciona el receptor o caldera de tal forma que la relación entre el área definida por la proyección de la misma sobre la superficie perpendicular a la dirección del heliostato y el área total de captación de la mis-

ma, sea máxima. Por este motivo se ha seleccionado una caldera circular plana, cuya relación es la más alta posible.

Como segundo paso se procede a seleccionar el plano del campo de heliostatos. En los métodos tradicionales se calcula un campo de heliostatos particular para las condiciones específicas de un lugar, teniendo en cuenta la latitud y las características del terreno, especialmente la inclinación. Ahora bien, considerando que la radiación solar cae sobre la superficie de la Tierra en forma de rayos relativamente paralelos, se ha tomado un plano independiente de la latitud, perpendicular a la radiación solar al mediodía en los días de equinoccio, lo que equivale a un plano horizontal en el Ecuador. En este plano, la declinación del Sol al mediodía solar es máxima en los días de solsticio, tomando valores límites de $\pm 23,45^\circ$. Los cálculos efectuados para este plano, llamado «plano universal de referencia U», pueden ser utilizados para el proyecto de un campo de heliostatos en cualquier lugar de la Tierra y para cualquier inclinación del terreno, mediante unas transformaciones que se dan más adelante.

El tercer paso es el estudio de los heliostatos, su cinemática y mecanismos y el desarrollo de un esquema cinemático tal que permitiera optimizar tanto la forma como el movimiento de cada heliostato del campo. Por medio de las ecuaciones desarrolladas se estudiaron los distintos tipos de montaje de heliostatos, tales como el mecanismo altacimutal, el polar, el polar trasladado y diferentes modelos de heliostato horizontal. Se llegó a la conclusión de que para poder optimizar el movimiento y la forma de cada heliostato, es necesario la introducción de un nuevo tipo de montaje, el cual se le llamó «heliostato direccional». El mecanismo de heliostato direccional (Fig. 1) se caracteriza por tener su eje principal de rotación situado en el mismo plano vertical donde está situado el vector $\mathbf{c}$ que apunta el receptor, esto es, en el mismo plano formado por el vector $\mathbf{c}$ y el cenit.

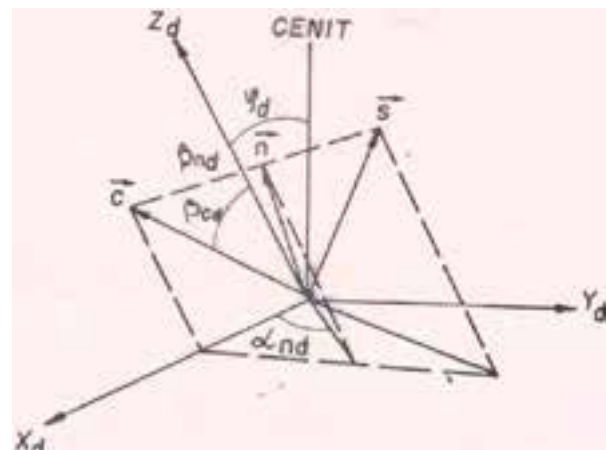


Fig.1. Sistema direccional.

Sea un sistema X_d, Y_d, Z_d tal que el eje Z_d esté en la dirección del eje principal de rotación del heliostato y tanto Z_d como X_d estén en el mismo plano que forma el vector c con el cenit. El sistema $X_d Y_d Z_d$ se representa con relación al sistema polar, por los ángulos de Euler ϑ, ψ, φ . En este caso, el ángulo de precesión es igual al complemento de la latitud y como la latitud en el plano universal es cero, entonces, $\psi = (\pi/2) - \phi = \pi/2$. El ángulo de nutación es igual al ángulo acimutal de la dirección al receptor c , representado por ϑ . El ángulo ϑ está formado por la dirección Sur y la proyección del vector c sobre el plano horizontal. El ángulo de rotación φ puede tomar cualquier valor y según esto definir las distintas variantes de este modelo de mecanismo.

En el sistema direccional descrito, el vector unitario s que apunta siempre al Sol se puede representar por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}x_{sd} &= (l_{1d} \cos \omega + m_{1d} \sin \omega) \cos \delta + n_{1d} \sin \delta \\y_{sd} &= (l_{2d} \cos \omega + m_{2d} \sin \omega) \cos \delta + n_{2d} \sin \delta \\z_{sd} &= (l_{3d} \cos \omega + m_{3d} \sin \omega) \cos \delta + n_{3d} \sin \delta\end{aligned}$$

donde:

l_{1d}	$-\cos \phi \sin \varphi_d + \cos \vartheta_a \sin \phi \cos \varphi_d$
m_{1d}	$+\sin \vartheta_a \cos \varphi_d$
n_{1d}	$-\sin \phi \sin \varphi_d - \cos \vartheta_a \cos \phi \cos \varphi_d$
l_{2d}	$-\sin \vartheta_a \sin \phi$
m_{2d}	$+\cos \vartheta_a$
n_{2d}	$+\sin \vartheta_a \cos \phi$
l_{3d}	$\cos \phi \cos \varphi_d + \cos \vartheta_a \sin \phi \sin \varphi_d$
m_{3d}	$\sin \vartheta_a \sin \varphi_d$
n_{3d}	$\sin \phi \cos \varphi_d - \cos \vartheta_a \cos \phi \sin \varphi_d$

En este mismo sistema, el vector unitario c que apunta al receptor está dado por las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}x_{cd} &= \sin \beta_{cd} \\y_{cd} &= 0 \\z_{cd} &= \cos \beta_{cd}\end{aligned}$$

donde β_{cd} es el ángulo formado por el eje Z_d y el vector c .

Entonces, el vector n , normal al plano del heliostato está representado por:

$$\begin{aligned}x_{nd} &= \frac{1}{2}(x_{sd} + x_{cd}) \\y_{nd} &= \frac{1}{2}(y_{sd}) \\z_{nd} &= \frac{1}{2}(z_{sd} + z_{cd})\end{aligned}$$

Los valores de los ángulos α_{nd} y β_{nd} con los cuales se puede determinar la rotación del vector n alrededor de los ejes de rotación principal y secundario, están dados por las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}\tan \alpha_{nd} &= y_{nd} / x_{nd} \\ \tan \beta_{nd} &= (x_{nd}^2 + y_{nd}^2)^{1/2} / z_{nd}\end{aligned}$$

y por lo tanto, los ángulos de rotación alrededor del eje principal α_{nd} y secundario β_{nd} , así como las respectivas velocidades angulares $\dot{\alpha}_{nd}$ y $\dot{\beta}_{nd}$ dependen del ángulo φ_d , el cual define la posición del eje principal de rotación, lo que significa que se puede seleccionar para cada heliostato, el ángulo φ_d más ventajoso que permita el mejor aprovechamiento del área especular de cada heliostato del campo.

El cuarto paso consiste en la optimización de movimiento y la forma del heliostato en el campo universal de referencia. El montaje óptimo de un heliostato es aquel que en dependencia de su posición relativa con respecto al receptor y también con respecto a la forma de este, el área especular del heliostato tenga la máxima eficiencia. A cada montaje óptimo le corresponde un «área ideal» del heliostato. Para determinar esa área ideal es necesario conocer la proyección del área captadora del receptor sobre el plano del heliostato, es decir, la proyección del haz de rayos necesarios para alimentar completamente al receptor, sobre la superficie especular del heliostato. Esta proyección varía con el tiempo, según el movimiento relativo del Sol en la esfera celeste. Este es uno de los pasos más importantes en el diseño de la forma y el movimiento del heliostato.

La proyección del receptor sobre el plano del heliostato

Sea $X_f Y_f Z_f$ un sistema de coordenadas fijo al plano del heliostato, de tal manera que el eje Z_f tenga la misma dirección que la normal n ; el eje Y_f esté en la dirección del eje secundario de rotación y que tanto Y_f como X_f estén en el mismo plano reflector del heliostato (Fig. 2).

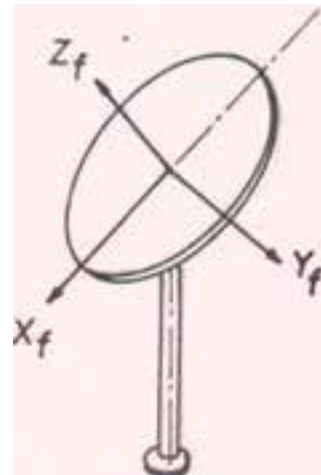


Fig. 2. Sistema fijo al heliostato.

La proyección, en cada momento, del receptor sobre el plano del heliostato está dada por:

$$\begin{aligned}x_{Rf} &= x'_R \cos \gamma - y'_R \sin \gamma \\y_{Rf} &= x'_R \sin \gamma + y'_R \cos \gamma\end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned}x'R &= R(\cos\beta_u \cos\alpha_n \cos\varepsilon + \sin\alpha_n \sin\varepsilon) / \cos\beta_n \\y'R &= R(\cos\alpha_n \sin\varepsilon - \cos\beta_u \sin\alpha_n \cos\varepsilon)\end{aligned}$$

donde ε es un parámetro variable de 0 a 2π

$$\begin{aligned}\sin\gamma &= \sin(\beta_u - \varphi_u) \sin\alpha_{nd} / \sin\beta_n \\ \cos\gamma &= \cos\alpha_n \cos\alpha_{nd} + \sin\alpha_n \sin\alpha_{nd} \cos(\beta_u - \varphi_u)\end{aligned}$$

donde (Fig.3):

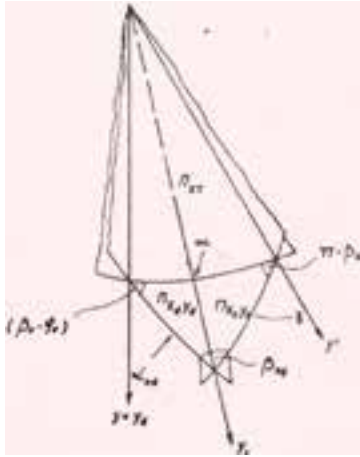


Fig. 3. Relación entre los planos XY, $X_d Y_d$ y $X_f Y_f$.

α_n ángulo que forma la proyección de la normal n sobre el plano XY y el eje X

XYZ sistema de coordenadas direccional, donde el eje Z está en la dirección c

β_n ángulo formado por la normal n y el eje Z

α_{nd} ángulo que forma la proyección de la normal n sobre el plano $X_d Y_d$ y el eje X_d

$X_d Y_d Z_d$ sistema de coordenadas direccional donde el eje Z_d tiene la dirección del eje principal de rotación

β_{nd} ángulo formado por la normal n y el eje Z_d

j_u ángulo de rotación neta del sistema $Z_d Y_d Z_d$

b_u ángulo cenital del receptor en el campo U

g ángulo formado por la recta de intercepción de los planos XY y $X_f Y_f$ y la recta Y_f

Los valores de $\sin\alpha_n$, $\cos\alpha_n$, $\sin\beta_n$, $\cos\beta_n$, $\sin\alpha_{nd}$, $\cos\alpha_{nd}$ vienen dados por:

$$\begin{aligned}\sin\alpha_n &= y_n / (x_n^2 + y_n^2)^{1/2} & \sin\alpha_{nd} &= y_{nd} / (x_{nd}^2 + y_{nd}^2)^{1/2} \\ \cos\alpha_n &= x_n / (x_n^2 + y_n^2)^{1/2} & \cos\alpha_{nd} &= x_{nd} / (x_{nd}^2 + y_{nd}^2)^{1/2} \\ \cos\beta_n &= z_n^{-1} & \sin\beta_n &= (1 - z_n^2)^{1/2}\end{aligned}$$

El heliostato óptimo

Por medio de un programa de cálculo se demostró que el montaje óptimo de un heliostato que alimenta una caldera central está definido por el valor:

$$\varphi_{OPT} = \beta_u \pm \pi/2$$

Donde b_u es el ángulo cenital del vector c de cada heliostato en el campo universal U. Entonces, si $Z_o Y_o Z_o$ es el sistema de coordenadas que define el mecanismo óptimo, se tiene:

$$\begin{aligned}\tan\alpha_{no} &= y_{no} / x_{no} \\ \cos\beta_{no} &= z_{no} / x_{no}^{-1}\end{aligned}$$

El ángulo α_{no} define la rotación del heliostato alrededor del eje principal Z_o y el ángulo β_{no} define la rotación del heliostato alrededor de su eje secundario. Las velocidades de rotación alrededor de cada eje son:

$$\begin{aligned}\alpha'_{no} &= (x_{no} y'_{no} - y_{no} x'_{no}) / (x_{no}^2 + y_{no}^2) \\ \beta'_{no} &= (x'_{no} z_{no} - z'_{no} x_{no}) / 2x_{no} (x_{no}^2 - z_{no}^2)^{1/2}\end{aligned}$$

$$\text{donde: } x_{no} = \frac{1}{2}[(\cos\beta_u \cos\omega + \sin\beta_u \sin\omega) \cos\delta - \cos\vartheta_u \sin\beta_u \sin\delta + 1]$$

$$y_{no} = 1(\cos j_u \sin\omega \cos\delta + \sin j_u \sin\delta)$$

$$z_{no} = 1[(\sin b_u \cos\omega - \sin\vartheta_u \cos\beta_u \sin\omega) \cos\delta + \cos\vartheta_u \cos b_u \sin\delta]$$

Debido a que el eje de rotación principal es perpendicular a la dirección c , las velocidades de rotación son mínimas comparadas con otros mecanismos de heliostato. Por medio de las fotografías obtenidas en el programa, el área ideal de cada heliostato del campo está definido por:

$$A_i = \pi R^2 \cos\beta_u / \cos\beta_{n\text{MÍNIMO}}$$

Donde R es el radio del área captadora del receptor y $(\beta_n)_{\text{MIN}}$ es el menor ángulo formado por el vector c y el vector n durante el trabajo del heliostato i . A_i da la mayor cantidad de energía que puede dar un heliostato en la posición i , sin que el haz de rayos se sobresalga del receptor.

Caracterización energética del campo de heliostatos

La cantidad de radiación instantánea enviada por el heliostato i al receptor es calculada por la ecuación:

$$E_{ti} = \rho \cdot \gamma_i \cdot A_i \cdot p_{l_o} \cdot \cos\beta_n \cdot \tau_i \cdot \sigma_i$$

Donde: ρ coeficiente de reflexión de la superficie especular

γ_i coeficiente de captación

A_i área del heliostato en la posición i

p_{l_o} radiación directa instantánea que cae sobre la superficie perpendicular al haz de rayos

$\cos\beta_n$ factor coseno instantáneo

τ factor de sombra

σ factor de bloqueo

La eficiencia geométrica del heliostato está definida como la relación entre la energía que envía el heliostato y la máxima energía que pudiera enviar.

Entonces, la eficiencia instantánea está dada por:

$$\eta_t = \cos\beta_n \cdot t \cdot s$$

El factor coseno se determina por la ecuación:

$$\cos\beta_{nm} = \{(\cos\beta_u \cos\omega + \sin\vartheta_u \sin\beta_u \sin\omega) \cos\delta_m - \cos\vartheta_u \sin\beta_u \sin\delta_m + 1\}^{1/2}$$

La eficiencia diaria del heliostato i en un día cualquiera del año está dado por el valor de:

$$h_d = \int p l_o h_t dt / \int p l_o dt$$

Para el diseño óptimo de un campo de heliostatos, uno de los datos más importante es el valor de la energía solar que envía cada heliostato i del campo al receptor durante un año de trabajo. Este valor viene dado por:

$$E_{ai} = A_i \sum_m n_m \sum_n \rho_m \gamma_m \tau_m \sigma_m \cos \beta_{nm} t_m (p l_o)_m$$

Para su uso en el cálculo se definió como «factor de concentración potencial» del heliostato, el valor dado por la expresión:

$$C_{pi} = 4E_{ai} / 8760 \pi D^2$$

El factor de concentración potencial del campo está dado por:

$$C_{pc} = \sum C_{pi}$$

Este factor caracteriza al campo, ya que con él es muy fácil determinar todos los parámetros del campo de heliostatos para una potencia requerida. Así, para una CTS de una potencia de salida P y un factor de concentración potencial C_{pc} , el valor del diámetro del receptor está dado por:

$$D = (4P / \pi \eta_p C_{pc})^{1/2}$$

Donde η_p es la eficiencia de la estación generadora.

En la figura 4 se dan los valores de los factores de concentración promedio correspondientes a las zonas definidas por los ángulos β_u y ϑ_{ui} .



Fig. 4. Valor de CPC en el plano U.

Para una altura H_u del receptor sobre el campo universal U , el ángulo b_u define sobre el mismo plano una circunferencia. Así, a cada circunferencia del campo universal U

le corresponde una cónica (elipse) en el campo L dada por el corte del plano local L con el cono de vértice V y ángulo β_{ui} . La línea de intersección de los planos U y L está dada por el eje Y_L como se aprecia en la Fig. 5.

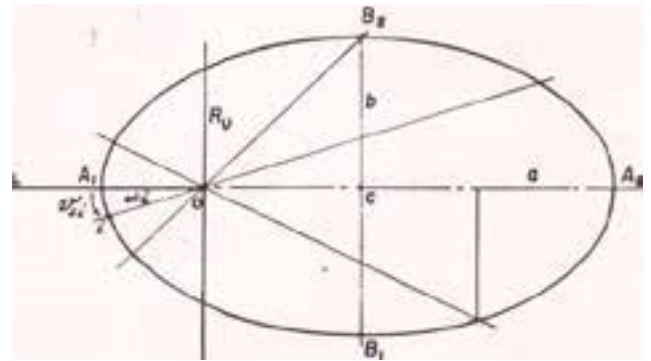


Fig. 5. Plano local L.

Un parámetro importante en la construcción del campo equivalente L es el ángulo equivalente al ángulo acimutal ϑ_{ui} . El valor de este ángulo está dado por:

$$\tan \vartheta_{Li} = \tan \vartheta_{ui} \cos \phi$$

El radio de giro de la elipse en el sistema de coordenadas XL_YL está dado por el segmento OD y representado por:

$$d_i = H_u \sin \beta_{ui} / \cos(\beta_{ui} - \varphi_{Li})$$

donde φ_{Li} es un parámetro que está dado por la ecuación:

$$\varphi_{Li} = \arctan(\tan \beta_{ui} \cos \vartheta_{ui})$$

Con los valores ϑ_{ui} y d_i se puede situar cualquier punto i del campo universal de referencia en el campo local equivalente L .

En la Fig. 6 se aprecia un campo local equivalente para un valor de la latitud igual a 23° .

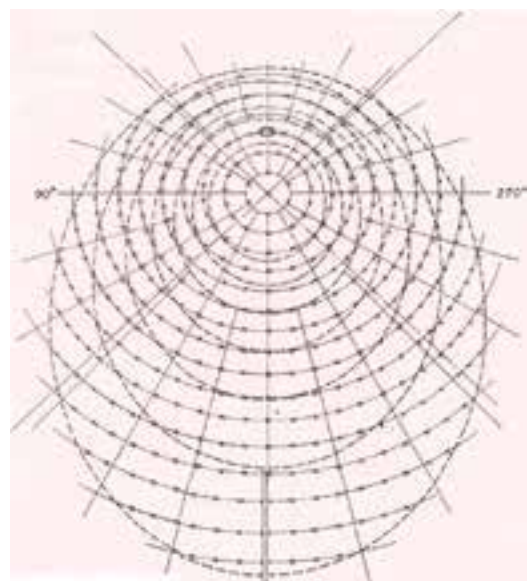


Fig. 6. Campo equivalente.

Por último, partiendo de los cálculos anteriores, se ha confeccionado un gráfico que permite generalizar el método para diferentes potencias de salida, +así como para distintas concentraciones en la caldera.

Utilizando el método anteriormente expresado y a manera de ejemplo, se ha efectuado el cálculo de un campo de heliostatos de una potencia uniforme de salida de 2 MW eléctricos durante 12 horas.

Tabla 1. Parámetros del campo local L

Concepto	Simbología	Unidad	Campo L
Cantidad de heliostatos	k	uno	380
Coefficiente de eficiencia geométrica	h_{ac}		0,86
Área del heliostato	A_i	m ²	91
Área especular total	A_c	m ²	34 552
Área del receptor	A_r	m ²	143
Altura del receptor	H_L	m	115
Área total del campo	A	m ²	117 938
Coefficiente de llenado	K_3		0,29
Potencia calórica ($I=0,77\text{kW/m}^2$)	E_{hc}	MW	16,7
Concentración	C_{tc}	kW/m ²	116,5

Conclusiones

Las velocidades de rotación del heliostato alrededor de sus ejes principal y secundario varían en dependencia del ángulo formado entre el eje principal de rotación y el vector que apunta al receptor. Si este ángulo es cero, las velocidades son máximas; si este ángulo es de 90°, las velocidades son mínimas.

El llamado efecto «gimbal lock», esto es que la velocidad de rotación tiende a infinito cuando la dirección al Sol coincide con el eje principal de rotación, no se presenta en los heliostatos como plantean algunos autores. Para que suceda el efecto mencionado es necesario, además, que el ángulo formado entre el eje principal de rotación y la dirección al receptor sea cero.

Solo un tipo de mecanismo tiene una velocidad alrededor de su eje principal de rotación constante e igual y contraria a la velocidad de rotación de la Tierra, independientemente de la posición del heliostato en el campo. Este es el mecanismo llamado «mecanismo polar trasladado». En este mecanismo, la velocidad alrededor del eje secundario es nula.

El eje motriz de un heliostato no tiene por qué coincidir con los ejes de rotación. Por esto, todo tipo de montaje, ya sea altacimutal, horizontal o direccional, puede ser movido por un mecanismo polar trasladado. Esto significa que cualquier campo de heliostatos, independientemente del tipo de montaje que utilice, puede utilizar el mecanismo polar trasladado para el movimiento de los heliostatos, y de esta manera todos pueden ser sincronizados con un mismo sistema central de control con velocidad constante.

El área útil de un heliostato de un campo que alimenta una caldera central, está dada por el contorno interior de las proyecciones del receptor sobre el plano del heliostato. El área que define este contorno depende del ángulo formado por el eje principal de rotación y el vector que apunta al receptor. Esta área es máxima, cuando dicho ángulo es de 90° y mínima, cuando el ángulo es de cero grados.

El heliostato óptimo para la formación de un campo de heliostato que alimenta a una caldera central, es el heliostato cuyo eje principal de rotación forma un ángulo de 90° con el vector que apunta hacia el receptor, ya que tiene un máximo aprovechamiento del lugar con una mínima velocidad de rotación.

El diseño de un campo de heliostatos se realiza con relativa facilidad para cualquier latitud e inclinación del terreno, si se conocen los parámetros de un campo universal de referencia. El campo calculado a partir del campo universal U, llamado «campo local equivalente L», tiene las mismas características geométricas del campo U.

El campo universal U es aquel donde el valor del «factor coseno» es máximo. Además, el movimiento de los heliostatos óptimos permite que el factor bloqueo del campo sea igual a la unidad y el factor de sombra sea más alto que utilizando otros tipos de montaje, para un campo de igual coeficiente de llenado. Por eso, el campo L es el campo de mayor eficiencia geométrica posible, lo que significa que para una potencia determinada, el campo L es el campo que requiere menor área especular.

Debido a que la relación entre el área de cada heliostato y el área del receptor es máxima en los heliostatos óptimos, el campo L es el que requiere una mínima cantidad de heliostatos para una potencia y temperatura requeridas.

Bibliografía

- ALMAZÁN DEL OLMO, OSCAR *et al* (2013). *El bagazo de la caña de azúcar. Conocimiento y potencial*. La Habana: Ed. ICIDCA. Octubre de 2013.
- BÉRRIZ PÉREZ LUIS, MARIO EDUARDO ÁLVAREZ-GUERRA JÁUREGUI, MARIO ANTONIO PLASENCIA Y FRANCISCO MONDELO GARCÍA (2009). «Hornos solares de niveles de concentración extremos». En *Eco Solar 27* (enero-marzo, 2009). La Habana: Ed. Cubasolar.
- RUBIO-GONZÁLEZ ÁNGEL Y MANUEL RUBIO RODRÍGUEZ (2018). «Integración y esquemas energéticos para el máximo aprovechamiento de la biomasa cañera en la generación de electricidad». En revista *Centro Azúcar*, Vol. 45, oct.-dic. 2018.
- VALDÉS, A. (2015). «Uso eficiente del vapor en el proceso de producción de azúcar crudo o blanco directo». *ATAC*, Vol. 76, No. 2, 2015, pp. 34-38.