

Distancias de diseño de parques fotovoltaicos sobre terrenos con pendientes. (Original)

Design distances for solar farms on sloping ground.

Gutiérrez Urdaneta, Luis



 Luis Gutiérrez Urdaneta
urdaneta@emfre.une.cu
Empresa de Fuentes Renovables de Energía, Cuba

ROCA. Revista Científico-Educacional de la provincia Granma

Universidad de Granma, Cuba
ISSN-e: 2074-0735
Periodicidad: Frecuencia continua
vol. 18, núm. 2, 2022
roca@udg.co.cu

Recepción: 28 Junio 2021
Aprobación: 19 Enero 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/440/4402900025/>

Autor de correspondencia: urdaneta@emfre.une.cu

Universidad de Granma



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Resumen: Las distancias entre inicios de filas (*pitch*) y entre subconjuntos de los parques fotovoltaicos en terrenos llanos se calculan de manera sencilla. Pero no todos los terrenos son llanos y los costos de su nivelación pueden ser significativos. Las fórmulas para el cálculo de esas distancias en terrenos con pendientes, tanto Norte-Sur como Este-Oeste, o ambas, raramente se hallan en la literatura académica. El cálculo exacto de dichas distancias es una necesidad tanto para el uso más racional de la tierra, un recurso no renovable, limitado y escaso, como para evitar sombreados no deseados entre los módulos. A partir de cálculos de geometría, en el presente texto se muestran las ecuaciones para la determinación precisa de esas distancias para terrenos no llanos.

Palabras clave: distancia entre filas, distancia entre inicios de filas, terrenos con pendiente.

Abstract: The pitch and the distance among subsets of solar farms on flat ground are determined in an easy way. However, not all ground is flat and grading cost could be significant. Equations for the calculation of these distances for sloping ground, either with North-South slope, East-West or both, are rarely found in the scholar literature. The precise calculation of these distances is a necessity for the rational use of the land and for avoiding shading among modules. This paper, through geometric calculations, shows the equations for the exact determination of these distances for sloping grounds.

Keywords: inter row distance, pitch, sloping ground.

INTRODUCCIÓN

La distancia entre los inicios de filas (D_f) es uno de los principales parámetros en el diseño espacial de los parques fotovoltaicos. La regla más común, como punto de partida, es el cálculo de dicha distancia a partir de una hora solar determinada, usualmente 8:00 AM, 9:00 AM o 10:00 AM en el solsticio de invierno (21 o 22 de diciembre), el peor escenario, de manera que a la hora seleccionada no exista sombreado entre paneles (Sánchez-Carbajal y Rodrigo, 2019).

NOTAS DE AUTOR

urdaneta@emfre.une.cu

La no consideración apropiada de los desniveles de terreno y de las condiciones topográficas puede causar el sombreado de paneles durante largos periodos de tiempo y en horas en que se espera la mayor producción de energía (Figura 1).



FIGURA 1

Sombreado entre módulos un día de noviembre en un parque del noroeste de China. El sombreado se mantuvo entre las 8:40 AM y las 4:10 PM (Sun, Siming, Liying, Ruijiang y Hui, 2014)

Por otra parte, un cálculo erróneo de la D_f , puede provocar la subutilización de la tierra, un recurso no renovable, limitado y escaso.

En Cuba, para determinar la distancia entre filas, y por lo tanto de D_f se aplican frecuentemente reglas empíricas que pueden dejar holguras o permitir sombreados no deseados: el doble de la altura (ΔH) entre la parte superior y la inferior del módulo inclinado, más el doble de la diferencia de altura por el desnivel del terreno (ΔZ), que se mide desde la primera "pata" de la mesa anterior y la primera "pata" de la mesa posterior, en dirección Norte-Sur, cuando el Sur es más alto que el Norte. Cuando existe pendiente en la dirección Este-Oeste se tratan de alinear los soportes con la pendiente del terreno y no se ajustan los espacios entre filas.

En la extensa búsqueda y revisión realizada, en inglés y español, de las ecuaciones para el cálculo de la D_f solo se tuvo acceso a dos artículos que abordan el tema (Elhab et al., 2012), (2012) y (Xiu-Shui, Guang-Hui, Ling-Jian, Xiong-Fei y Shu-Ming, 2015). Dichas fórmulas son parte del "know how" de empresas proyectistas e instaladoras de parques en el mundo. Ambos trabajos mencionados arriba, aunque muy útiles, dejan sin precisión, sin demostración geométrica o sin explicación partes fundamentales del análisis, y a veces la descripción es confusa o algunas ecuaciones brindadas son erróneas. En el presente artículo, mediante cálculos de geometría, se muestran las fórmulas para la determinación precisa de esas distancias para terrenos llanos y no llanos. Además, se construyó una aplicación informática para el cálculo de dichas distancias que ya se puso a disposición de los diseñadores de los parques fotovoltaicos en Cuba.

POBLACIÓN Y MUESTRA

En el presente texto se explican los conceptos fundamentales de las distancias, las ecuaciones básicas de geometría solar y las ecuaciones específicas, obtenidas a partir de la trigonometría, de las distancias entre inicios de filas y entre subconjuntos para terrenos llanos y con pendientes. Se verifican los resultados de dichas ecuaciones específicas, a través de simulaciones con el internacionalmente reconocido software PVsyst (Group of Energy Institute of the Sciences of the Environment, 2019), y se menciona brevemente, además, la aplicación informática construida. PVsyst es el software profesional más utilizado en Cuba como herramienta de simulación. Entre los parámetros que deben ser imputados como datos de entrada en ese programa están las distancias entre inicios de filas y entre subconjuntos.

Los conceptos básicos

La distancia entre inicios de filas, como ya se ha subrayado, es uno de los conceptos básicos en el diseño de los parques solares. La distancia o pasillo entre subconjuntos (P_s) sólo es necesaria cuando existen diferentes configuraciones aledañas, sea porque los ángulos de inclinación de los módulos son diferentes, o porque

existen subconjuntos separados debido a la topografía. También es útil cuando existen objetos cercanos al parque. Ambas distancias son las mínimas para que no existan sombreados entre paneles a una hora solar dada, de un determinado día del año (generalmente en el solsticio de invierno).

La Df se compone de dos elementos: el ancho de la fila (Af) y el pasillo o distancia entre filas (Pf) (Figura 2).

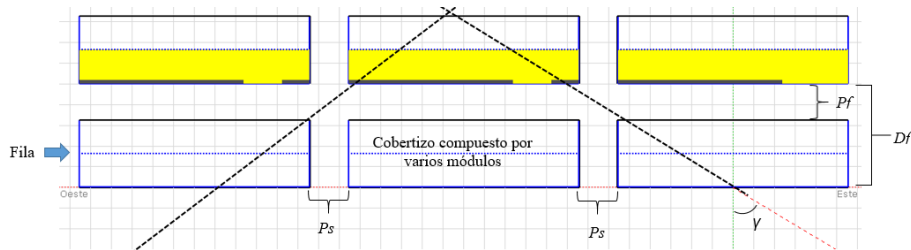


FIGURA 2

Vista aérea de un parque.

Df siempre es positiva, pero Ps sería mayor que cero antes del mediodía, pero negativo después de las 12:00 (hora solar local).

En la geometría solar, los ángulos de elevación solar y de azimut son dos importantes parámetros para el diseño de proyectos solares. El azimut (γ) es el ángulo medido en el plano horizontal entre el eje Norte-Sur (0°) y la proyección de la luz solar sobre el plano horizontal. Varía desde -180° a 180° . La elevación (α) es el ángulo formado entre la dirección del centro geométrico del Sol y la superficie horizontal (Figura 3). Cada día, el sol sigue una trayectoria cuyas principales coordenadas son α y γ .

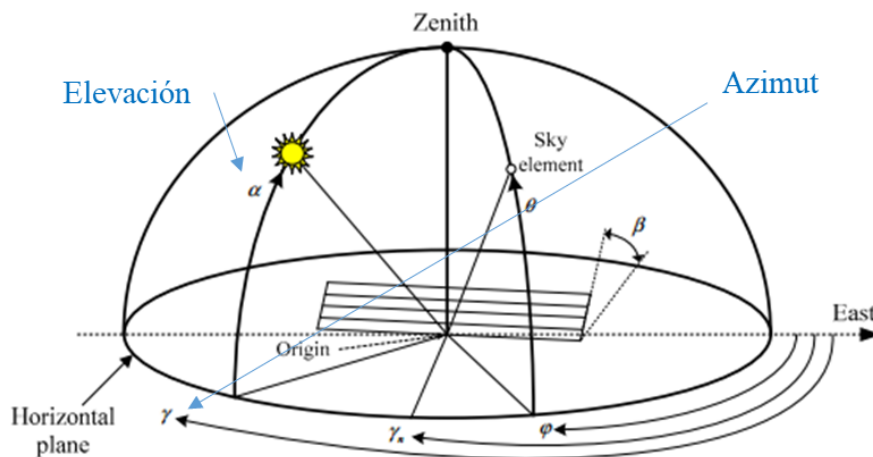


FIGURA 3

Elevación y azimut (Akhlaghi, Sarailoo, Rezaeiahari y Sangrody, 2017)

El azimut depende de la hora angular (ω) y la declinación (δ). La elevación depende, además, de la latitud del sitio (ϕ).

La hora angular es la distancia angular entre el meridiano en que se encuentra el punto y el meridiano cuyo plano contiene al Sol. Se calcula a partir de la rotación diaria de la tierra sobre su eje. Así, la hora angular es cero al mediodía local, cuando el Sol alcanza su punto más alto en el cielo.

$$\omega = 15 \cdot (t - 12) \quad [\text{grados}] \quad (1)$$

siendo t: hora solar local

La declinación solar es el ángulo entre los rayos del Sol y el plano ecuatorial de la tierra. Los ángulos de declinación son positivos cuando el Sol se encuentra al Norte del ecuador y negativo cuando se halla al Sur.

Alcanza su valor máximo de $23,45^\circ$ en el solsticio de verano y el mínimo de $-23,45^\circ$ en el solsticio de invierno. Su valor es cero en los equinoccios. Existen varias ecuaciones para su determinación. Una de las más utilizadas es la siguiente (Cooper, 1969):

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{seno} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad [\text{grados}] \quad (2)$$

siendo n : día del año comenzando por 1 hasta 365 desde el primero de enero.

La ecuación del azimut es la siguiente (Nfaoui y El-Hami, 2018):

$$\gamma = \text{acos} \left(\cos \delta \cdot \frac{\text{seno } \omega}{\cos \alpha} \right) \quad [\text{grados}] \quad (3)$$

La elevación se calcula de la siguiente manera (Abdallah, Abdel-Fattah y Manzano-Agugliaro, 2020):

$$\alpha = \text{aseno} (\text{seno } \delta \cdot \text{seno } \varphi + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi) \quad [\text{grados}] \quad (4)$$

Como ha sido expuesto anteriormente, una regla comúnmente usada para el diseño de los parques solares es el uso de una hora solar determinada. La selección de esa hora garantiza que, en el solsticio de invierno, si se selecciona, por ejemplo, las 10:00 AM como hora solar de diseño, no existirá sombreado entre los módulos dos horas antes y dos horas después en que el Sol se halle en el cenit.

La hora legal local es aquella que se fija en los territorios y por la cual se rige la vida en los mismos. A la hora de realizar las simulaciones, es necesario tener en cuenta que la hora solar (t) y la hora legal solamente coinciden excepcionalmente.

Para calcular la diferencia entre la hora solar y la hora legal (DHsHl) para cualquier día del año se utiliza frecuentemente la siguiente ecuación (Gebremedhen, 2014):

$$DHsHl = 4 (75 - Lloc) + E \quad [\text{minutos}] \quad (5)$$

Siendo:

$Lloc$: Longitud geográfica del sitio ($^\circ$)

$$E = 229,2 \cdot [0,000075 + 0,001868 \cdot \cos(B) - 0,032077 \cdot \text{seno}(2B) - 0,014615 \cdot \cos(2B) - 0,04089 \cdot \text{seno}(2B)] \quad [\text{minutos}] \quad (6)$$

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad [\text{adimensional, en } E \text{ se convierte a radianes}] \quad (7)$$

n : día del año comenzando por 1 hasta 365 desde el primero de enero

Los resultados obtenidos con esta ecuación son precisos. Para una corroboración de la diferencia entre la hora solar y la hora legal el 21 de diciembre (DHsHl*), el autor del presente artículo, realizó una regresión para ocho longitudes geográficas de Cuba, a partir de las diferencias según <https://www.powerfromthesun.net/calculators/SolarToLocalTime.html>. El R2 fue de 0,9999 con error de estimación de 0,001 minutos. Sus resultados fueron verificados en el PVsyst.

$$DHsHl^* = -3,9992 \cdot Lloc - 301,73, \quad [\text{minutos}] \quad (8)$$

La altura es la diferencia longitudinal normal entre el extremo superior del panel delantero y el terreno o la línea imaginaria paralela al mismo que pasa por el extremo inferior del módulo siguiente (Figura 4).

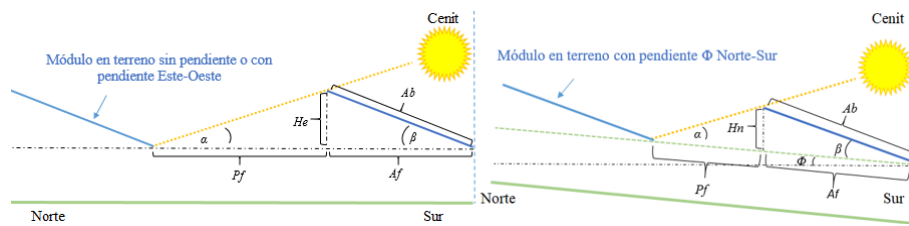


FIGURA 4

Altura en terreno sin pendiente (o con pendiente E-O) y con pendiente N-S

La altura en terreno sin pendiente o con pendiente Este-Oeste (H_e) se calcula como

$$H_e = Ab \cdot \text{seno} (\beta) \quad (9)$$

Siendo Ab el ancho de la banda colectora del módulo y β , el ángulo de inclinación del módulo. Para el terreno con pendiente Norte-Sur la altura (H_n) se determina como:

$$H_n = Ab \cdot [\text{seno} (\beta) - \text{seno} (\Phi)] \quad (10)$$

siendo Φ la pendiente Norte-Sur.

Las distancias de diseño en terrenos sin pendiente

Para los parques sin pendiente, las distancia entre inicios de filas y entre subconjuntos se determinan de la siguiente forma (Figura 5):

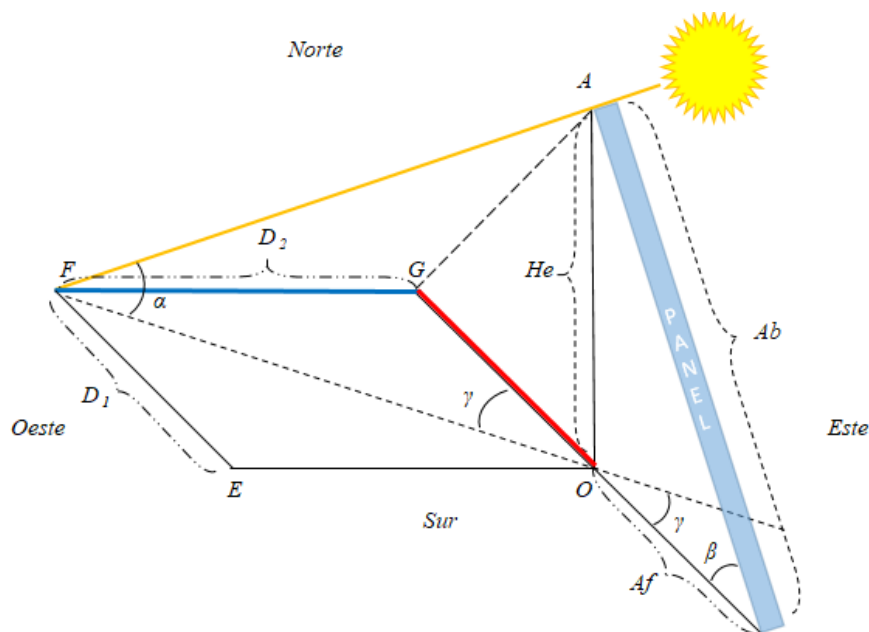


FIGURA 5

P_f , A_f y P_s en terrenos sin pendiente

Se halla H_e :

$$H_e = OA = Ab \cdot \text{seno} (\beta) \quad (11)$$

Siendo γ el azimut solar, α la elevación solar y z el azimut del parque, según su orientación específica. La inmensa mayoría de los parques con ángulo fijo se instalan con azimut igual a cero. Si excepcionalmente ese azimut fuera de unos pocos grados, la llamada pendiente Norte-Sur se determinaría como aquella entre los cobertizos y la Este-Oeste, como la pendiente de las bases de los cobertizos, o lo que es igual, a partir de las líneas paralelas y perpendiculares a la del azimut del parque. Por razones de mejor comprensión, las continuaremos denominando como pendientes Norte-Sur y Este-Oeste.

$$D_1 = \underline{Pf} = \underline{OG} = He \cdot \frac{\cos(\gamma - z)}{\tan \alpha} \quad (12)$$

El ancho de fila se calcula de la siguiente manera:

$$Af = Ab \cdot \cos \beta \quad (13)$$

La distancia entre inicios de filas se determina como:

$$\underline{Df} = \underline{Pf} + \underline{Af} = He \cdot \frac{\cos(\gamma - z)}{\tan \alpha} + Ab \cdot \cos \beta \quad (14)$$

Finalmente, el pasillo entre subconjuntos se determina así:

$$D_2 = \underline{Ps} = \underline{GF} = He \cdot \frac{\cos(\gamma - z)}{\tan \alpha} \quad (15)$$

Las distancias de diseño en terrenos con pendiente Norte-Sur

Respecto a la distancia entre inicio de filas (Df) y la distancia entre subconjuntos (Ps) en terrenos con pendiente Norte-Sur, es importante precisar que, como convención, la pendiente es positiva si el Norte es más alto que el Sur. Si no, es negativa. Primero se realiza el cálculo de la distancia entre filas (Norte-Sur), utilizando un artificio trigonométrico: la creación del triángulo rectángulo OAB con el segmento AJ normal al segmento OI.

Como $\angle OBI = \angle AJI = 90^\circ$, y $\angle IBO = \angle IOA$ por ser ángulos alternos internos entre paralelas, entonces $\angle OAJ$ es igual a la pendiente Norte-Sur Φ (Figura 6) (Xiu-Shui et al., 2015).

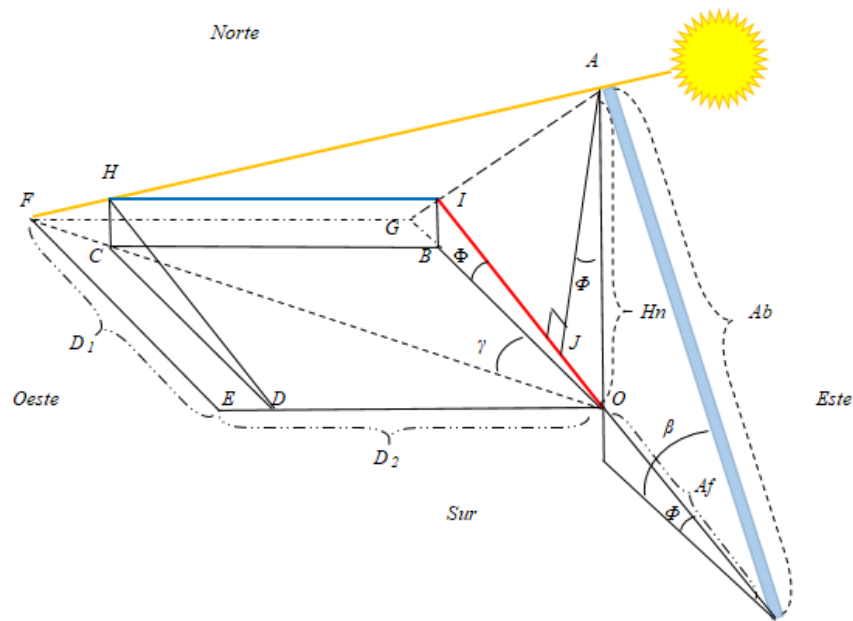


FIGURA 6
Pf, Af y Ps en terrenos con pendiente Norte-Sur

Para el cálculo de D1 y D2 se toma Hn en vez de He. Se determina Hn.

$$Hn = OA = Ab \cdot [\text{seno}(\beta) - \text{seno}(\Phi)] \quad (16)$$

Como,

$$\Delta OAG = \Delta OAI + \Delta OIG$$

$$0,5 \cdot Hn \cdot D_1 = 0,5 \cdot Hn \cdot \cos \Phi \cdot OI + 0,5 \cdot OI \cdot D_1 \cdot \text{seno} \Phi$$

Entonces,

$$Pf = OI = \frac{Hn \cdot D_1}{Hn \cdot \cos \Phi + D_1 \cdot \text{seno} \Phi} \quad (17)$$

$$Af = \frac{Ab \cdot \cos \beta}{\cos \Phi} \quad (18)$$

La distancia entre inicios de filas sería:

$$Df = \frac{Hp \cdot D_1}{Hn \cdot \cos \Phi + D_1 \cdot \text{seno} \Phi} + \frac{Ab \cdot \cos \beta}{\cos \Phi} \quad (19)$$

La distancia entre subconjuntos se obtendría a través de la ecuación que sigue:

$$Ps = IH = \frac{D_2 \cdot Pf \cdot \cos \Phi}{D_1} \quad (20)$$

Las distancias de diseño en terrenos con pendiente Este-Oeste

Respecto a la distancia entre inicio de filas (Df) y la distancia entre subconjuntos (Ps) en terrenos con pendiente Este-Oeste, se debe partir de que, como convención, la pendiente es positiva si el Oeste es más alto que el Este. Si no, es negativa.[1] De manera similar a la anterior se procede en este caso.

Como $\angle ODG = \angle AJO = 90^\circ$, y $\angle AOG = \angle DGO$ por ser ángulos alternos internos entre paralelas, entonces $\angle OAJ$ es igual a la pendiente Este-Oeste μ (Figura 7) (Xiu-Shui et al., 2015).

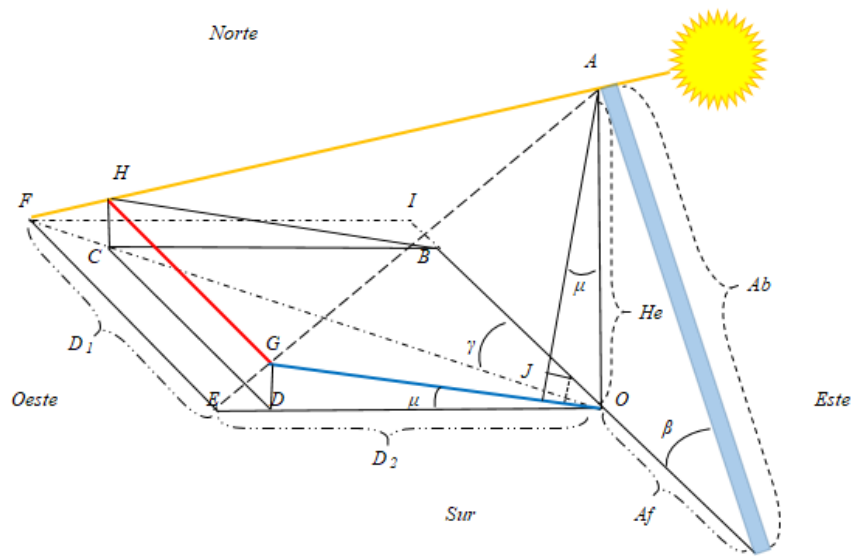


FIGURA 7
Pf, Af y Ps en terrenos con pendiente Este-Oeste

Primero se determina He.

$$He = OA = Ab \cdot \text{seno } \beta \quad (21)$$

$$\Delta OAE = \Delta OAG + \Delta OGE$$

$$0,5 \cdot He \cdot D_2 = 0,5 \cdot He \cdot \cos \mu \cdot OG + 0,5 \cdot OG \cdot D_2 \cdot \text{seno } \mu$$

Entonces, la distancia entre subconjuntos sería el resultado de:

$$Ps = OG = \frac{He \cdot D_2}{He \cdot \cos \mu + D_2 \cdot \text{seno } \mu} \quad (22)$$

La distancia entre filas se obtendría así:

$$Pf = GH = \frac{D_1 \cdot Ps \cdot \cos \mu}{D_2} \quad (23)$$

Como

$$Af = Ab \cdot \cos \beta \quad (24)$$

La distancia entre inicios de filas sería,

$$Df = \frac{D_1 \cdot Ps \cdot \cos \mu}{D_2} + Ab \cdot \cos \beta \quad (25)$$

Caso general: distancias de diseño en terrenos con pendiente Norte-Sur y Este-Oeste

Para la distancia entre inicio de filas (Df) y la distancia entre subconjuntos (Ps) en terrenos con pendiente Norte-Sur y Este-Oeste (escenario frecuente), la determinación de Pf, Df y Ps es algo más compleja (Figura 8). Aunque (Xiu-Shui et al., 2015) abordan esta situación, no exponen demostración trigonométrica, la explicación es confusa, utilizan como hora de diseño la del atardecer y las ecuaciones resultantes no son correctas. Además, no hay claridad en la altura utilizada para los cálculos.

El autor del presente texto ha partido de la representación espacial del problema, usando la trigonometría para determinar las ecuaciones.

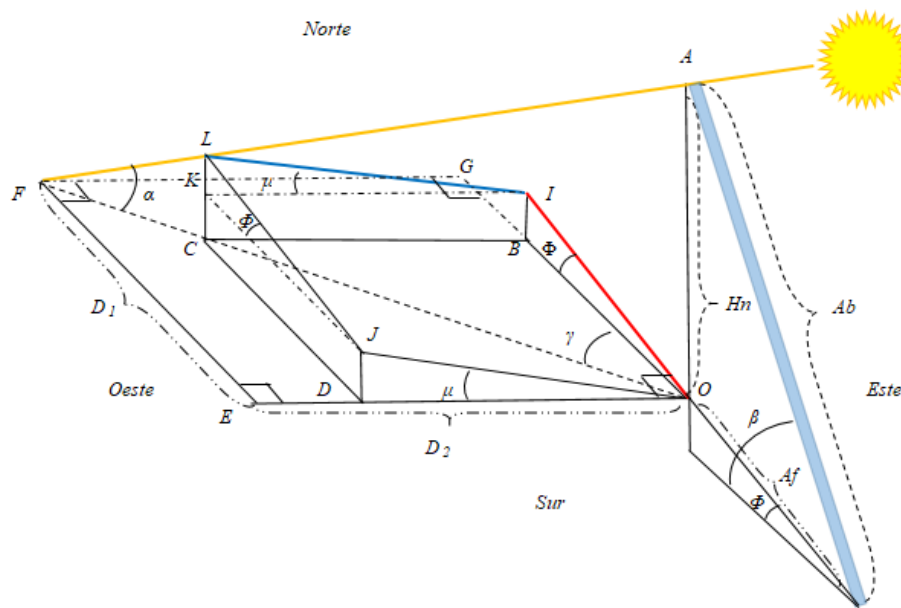


FIGURA 8

Pf, Af y Ps en terrenos con pendientes Norte Sur y Este-Oeste

Para el cálculo de D1 y D2, se toma Hn en vez de He. Primero se halla Hn.

$$Hn = OA = Ab \cdot [\text{seno}(\beta) - \text{seno}(\Phi)] \quad (26)$$

Como el rectángulo OBCD está contenido en el rectángulo OGFE, ambos comparten el vértice O y dos de los lados y la diagonal de OBCD están también contenidos en dos de los lados y la diagonal de OGFE, se cumple que:

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akhlaghi, Shahrokh, Morteza Sarailoo, Mandana Rezaeiahari, y Hossein Sangrody. 2017. «Study of Sufficient Number of Optimal Tilt Angle Adjustment to Maximize Residential Solar Panels Yield.» *IEEE Power and Energy Conference at Illinois* 1-5. doi: 10.1109/PECI.2017.7935747.
- Abdallah, R., S. Abdel-Fattah, y F. Manzano-Agugliaro. 2020. «Estimating the Optimum Tilt Angles for South-Facing Surfaces in Palestine.» *Energies* 13: 623. doi:10.3390/en13030623.
- Cooper, P.I. 1969. «The absorption of radiation in solar stills.» *Solar Energy* 12 (3): 333-346. doi:10.1016/0038-092X(69)90047-4.
- Elhab, B. R., K. Sopian, Sohif Mat, Ch. Lim, M. Y. Sulaiman, M. H. Ruslan, y Omidreza Saadatian. 2012. «Optimizing tilt angles and orientations of solar panels for Kuala Lumpur, Malaysia.» *Scientific Research and Essays* 7: 3758-3765. doi:10.5897/SRE12.241.
- Gebremedhen, Yohannes Berhane. 2014. «Determination of Optimum Fixed and Adjustable Tilt Angles for Solar Collectors by Using Typical Meteorological Year data for Turkey.» *International Journal of Renewable Energy Research* (Gazi University) 4: 924-928. doi:10.20508/ijrer.v4i4.1588.g6452.
- Group of Energy Institute of the Sciences of the Environment. 2019. «PVsyst V6.81.» University of Geneva. <http://www.pvsyst.com/download-pvsyst/>.

- Nfaoui, Mohamed , y Khalil El-Hami. 2018. «Extracting the maximum energy from solar panels.» *Energy Reports* (Elsevier Ltd) 4: 536-545. doi:10.1016/j.egyr.2018.05.002.
- Oficina Nacional de Normalización. 2017. «NC 800, Capítulo 13: Instalaciones fotovoltaicas.» Cuba. <http://www.ncnorma.cu>.
- Sánchez-Carbajal, S., y P. M. Rodrigo. 2019. «Optimum Array Spacing in Grid-Connected Photovoltaic.» *International Journal of Photoenergy* Volume 2019: 1-14. doi:10.1155/2019/1486749.
- Sun, Yunlin, Siming Chen, Liying Xie, Ruijiang Hong, y Hui Shen. 2014. «Investigating the Impact of Shading Effect.» *International Journal of Photoenergy* Volume 2014: 1-9. doi:10.1155/2014/763106.
- Xiu-Shui, Ma, Yao Guang-Hui, Ye Ling-Jian , Zhi Xiong-Fei , y Zhang Shu-Ming . 2015. «Distance calculation between photovoltaic arrays fixed on sloping ground.» *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering* (IOS Press) 15: 107–116. doi:10.3233/JCM-150525.