

OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE SEGUIMIENTO DE SEGUIDORES SOLARES A DOS EJES EN DÍAS CUBIERTOS

García, I.*, **, Granados-López, D.***, Díez-Mediavilla, M.***, Alonso-Tristán, C.***, Torres, J.L.*

*Institute of Smart Cities (ISC), Departamento de Ingeniería, Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía, Pamplona, 31006, (Navarra) España, ignacio.garcia@unavarra.es

**Solar and Wind Feasibility Technologies (SWIFT), Departamento de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Burgos, Avda. Cantabria s/n, Burgos, 09006, (Burgos) España

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado una comparación de la radiación solar captada por un seguidor solar a dos ejes orientado a la producción de energía fotovoltaica considerando tres estrategias de seguimiento: (1) orientación del seguidor perpendicularmente a los rayos del sol, (2) posicionamiento horizontal del seguidor y (3) orientación del seguidor que maximice la captación de irradiancia en cielos no despejados atendiendo a la distribución angular de radiancia y no a la posición del sol. Para las estrategias 1 y 3, que implican la inclinación del plano y, por lo tanto, la captación de irradiancia reflejada, se han considerado cuatro valores de albedo diferentes. Esta evaluación se ha llevado a cabo a partir de un año de observaciones de irradiancia global, difusa y directa y distribución angular de radiancia y luminancia realizadas en la estación meteorológica del grupo de investigación SWIFT de la Universidad de Burgos. Los resultados han mostrado que las estrategias propuestas incrementan significativamente la radiación solar, celeste y reflejada, captada en condiciones de cielo no despejado, especialmente con valores bajos de albedo.

PALABRAS CLAVE: Energía Solar, Sistemas de Seguimiento Solar, Distribución Angular de Radiancia

ABSTRACT

In this work, a comparison of the solar radiation captured by a two-axis solar tracker oriented to the production of photovoltaic energy has been performed considering three tracking strategies: (1) orientation of the tracker normal to the sun's rays, (2) horizontal positioning of the tracker and (3) orientation of the tracker that maximizes the capture of irradiancia in overcast skies according to the angular distribution of radiancia and not to the position of the sun. For strategies 1 and 3, which involve tilting the plane and thus capturing reflected irradiancia, four different albedo values have been considered. This evaluation has been carried out on the basis of one year of observations of global, diffuse and direct irradiancia and angular distribution of sky radiancia and luminance registered at the meteorological station of the SWIFT research group of the University of Burgos. The results have shown that the proposed alternative strategies significantly increase the solar radiation gain, both celestial and reflected, captured under overcast conditions, especially at low albedo values.

KEYWORDS: Solar Energy, Solar Tracking Systems, Sky Radiancia Distribution

INTRODUCCIÓN

Es conocido que los sistemas de seguimiento del sol a dos ejes permiten un máximo aprovechamiento de la radiación solar. La estrategia de seguimiento de estos dispositivos se centra en disponer el plano del seguidor perpendicularmente a los rayos del sol. Es indiscutible que esta forma de proceder maximiza la captación de radiación solar en días claros, en los que la irradiancia directa es la componente más energética de la irradiancia solar global. Sin embargo, para los cielos no despejados dicha componente se anula o se ve muy reducida. Diversos estudios publicados hasta el momento se han centrado en la propuesta de una estrategia de seguimiento alternativa para condiciones de nubosidad que plantea la posición horizontal del plano de captación, con el objetivo de que éste pueda recibir la irradiancia difusa procedente de toda la bóveda celeste (Antoñanzas et al., 2018; Kelly and Gibson, 2011; Quesada et al., 2015). Esta estrategia maximiza la captación de radiación solar en condiciones de cielo cubierto cuando la distribución de radiancia en el cielo es isotrópica. Sin embargo, es una realidad que esta situación es muy poco frecuente (García et al., 2020; Suárez-García et al., 2018; Torres et al., 2010a; Torres et al., 2010b). En general, la distribución angular de la radiancia en el cielo tiene un carácter anisotrópico. Es decir, las distintas zonas del cielo radian con una intensidad diferente. Por ello, cuando el sol no es visible y hay sensibles diferencias en la radiancia entre distintos puntos de la bóveda celeste, parece aconsejable investigar si una orientación del seguidor hacia las regiones de mayor radiancia podría proporcionar mayores ganancias de radiación en el plano de captación. Para la identificación de dichas regiones es preciso conocer la distribución angular de radiancia en dicha bóveda. Habitualmente, su medida se lleva a cabo mediante dispositivos conocidos como escáneres de cielo. Sin embargo, las estaciones meteorológicas o radiométricas que disponen de estos equipos son escasas por lo que, a falta de medidas, se pueden emplear las estimaciones proporcionadas por modelos (Igawa, 2014; ISO 15469:2004(E)/CIE S 011/E:2003, 2004; Perez et al., 1993). Otra componente de la radiación recibida en el plano del seguidor que se debe tener en cuenta es la radiación reflejada, que depende del albedo medio del entorno. A medida que se incrementa la inclinación del seguidor, aumenta la proporción de radiación reflejada recibida, si se considera un albedo constante. En este trabajo se realizó una comparación de la radiación solar captada por un seguidor solar a dos ejes considerando tres estrategias de seguimiento y el efecto de la incidencia oblicua de la radiación sobre un posible módulo fotovoltaico: (1) orientación del seguidor perpendicular a los rayos del sol, (2) posicionamiento horizontal del seguidor y (3) orientación del seguidor que maximice la captación de irradiancia en cielos no despejados atendiendo a la distribución angular de radiancia y no a la posición del sol. Para las estrategias 1 y 3, que implican la inclinación del plano y, por lo tanto, la captación de irradiancia reflejada, se consideraron cuatro valores de albedo diferentes. Esta evaluación se llevó a cabo a partir de un año de observaciones de irradiancia global, difusa y directa y distribución angular de radiancia y luminancia realizadas en la estación meteorológica del grupo de investigación *Solar and Wind Feasibility Technologies* (SWIFT) de la Universidad de Burgos (UBU).

El trabajo se estructura en las siguientes secciones. El apartado “Datos radiométricos” describe la serie de datos utilizada y el procedimiento de control de calidad al que han sido sometidos. En el apartado “Metodología” se detalla el procedimiento seguido. En el apartado “Resultados” se presentan las ganancias de energía obtenidas por las estrategias propuestas frente a la estrategia convencional de seguimiento de la posición sol. Dicho análisis se llevó a cabo de manera global, esto es, considerando todos los tipos de cielo, y por tipo de cielo clasificado según la norma ISO/CIE. El último apartado está dedicado a las “Conclusiones”.

DATOS RADIOMÉTRICOS

Los datos utilizados en este trabajo fueron registrados en la estación radiométrica del grupo de investigación SWIFT, perteneciente a la UBU. Se trata de una estación de medida urbana localizada en la azotea de la Escuela Politécnica Superior de la UBU (42°21'04" N, 3°41'20" W, 856 m s.n.m.). El estudio del horizonte visible reveló que, en ninguna dirección, su elevación excede los 10°. La serie de datos utilizada en este estudio consta de un total 17,755 observaciones realizadas entre enero y diciembre de 2021. Durante este periodo se midieron las siguientes variables: irradiancia global y difusa sobre el plano horizontal, irradiancia directa sobre el plano normal y distribución angular de radiancia y luminancia en la bóveda celeste. La irradiancia global sobre el plano horizontal fue medida con un piranómetro Hukseflux SR12-T205. La irradiancia difusa horizontal se midió con un piranómetro Hukseflux SR12-T205 con disco de sombra, mientras la irradiancia directa normal se midió con un pirheliómetro Hukseflux DR01-05. Estos tres instrumentos están montados sobre un seguidor solar Geónica SunTracker-3000. La distribución angular de radiancia y luminancia celestes se midió con un escáner de cielo EKO MS-321LR. Este dispositivo mide los valores de radiancia y luminancia de los 145 sectores en los que está dividida la bóveda celeste de acuerdo con la propuesta de la CIE (1994). Todas las variables fueron registradas con una frecuencia de 10 minutos. Todas las medidas tanto de irradiancia como de distribución angular correspondientes a elevaciones solares inferiores a 5° fueron descartadas. Las medidas de irradiancia fueron sometidas al control de calidad propuesto en el proyecto MESoR (Hoyer-Klick et al., 2008). En el caso de la distribución angular de radiancia y luminancia se consideraron tres criterios de control de calidad. En primer lugar, todas las medidas de los sectores de cielo individuales que mostraban valores fuera del rango de medida del escáner de cielo (0-50 $\text{kcd}\cdot\text{m}^{-2}$ para luminancia y 0-300 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$

para radiancia) fueron descartadas. Asimismo, se descartaron todas las medidas de aquellos sectores de cielo cuyo centro se encuentra a menos de 6° de distancia del sol, ya que la luminancia y la radiancia del sol superan el rango de medida del escáner de cielo. En tercer lugar, se descartaron todas las medidas cuya integración sobre el plano horizontal se desviaba más de un 30% respecto a la irradiancia difusa medida en el mismo periodo de tiempo.

METODOLOGÍA

En este trabajo se compararon tres estrategias de seguimiento de la radiación solar para un seguidor solar a dos ejes:

- Estrategia 1: Seguimiento de la posición del sol para cualquier tipo de cielo. Se trata de la estrategia más frecuente en la mayoría de los sistemas con seguimiento solar a dos ejes que consiste en disponer el plano de captación de manera perpendicular a los rayos de sol. Por lo tanto, en todo momento la inclinación del plano (β_p) es igual al ángulo de cénit solar (θ_z) y su acimut (γ_p) coincide con el del sol (γ_s). Consecuentemente, esta estrategia maximiza la cantidad de irradiancia directa captada por el sistema y permite la captación de parte de la irradiancia reflejada por el entorno.
- Estrategia 2: Posicionamiento horizontal del seguidor en condiciones de cielo cubierto. En esta estrategia, el plano de captación sigue la posición del sol cuando la irradiancia directa es alta, como en la estrategia 1, y se dispone horizontalmente cuando la irradiancia directa es baja, con el objetivo de captar la mayor cantidad de irradiancia difusa celeste. Sin embargo, este planteamiento asume, de manera implícita, que la distribución de radiancia en el cielo es isotrópica e implica la pérdida de la radiación reflejada lambertianamente desde el suelo.
- Estrategia 3: Posicionamiento que maximiza la captación de energía en condiciones de cielo cubierto. Esta estrategia trata de superar las debilidades de la estrategia 2. Como en dicha estrategia, el plano de captación sigue la posición del sol cuando la irradiancia directa es alta. Sin embargo, cuando ésta es baja, se determina la posición del plano del seguidor (β_p, γ_p) que maximiza la captación de irradiancia, considerando las componentes directa, difusa y reflejada desde el suelo. Para determinar dicha posición, se lleva a cabo un proceso iterativo que estima, para cada momento, la irradiancia incidente sobre un plano con distintas orientaciones en inclinaciones. En este trabajo se ha optado por orientar el plano hacia las 145 posiciones de la bóveda celeste medidas por el escáner de cielo. Finalmente, se selecciona aquella orientación que supone una mayor captación de energía. Como en el caso de la estrategia 1, esta estrategia considera la radiación reflejada lambertianamente desde el suelo.

Es preciso tener en cuenta que las estrategias de seguimiento 2 y 3 son mixtas ya que combinan la estrategia 1 para los momentos de cielo claro o intermedio y las propuestas detalladas más arriba en condiciones de cielo cubierto. En cualquier caso, desde el punto de vista de la metodología de cálculo, para cada uno de los momentos considerados se determinó la irradiancia global y sus componentes recibidas sobre el plano de captación mediante las tres estrategias, independientemente del estado del cielo. Posteriormente se determinó cuál de las tres estrategias permitía la máxima captación de energía. Para ello, se tomó como referencia la estrategia 1, que habitualmente adoptan los sistemas de seguimiento solar a dos ejes. El análisis posterior de los resultados obtenidos tuvo en cuenta el tipo de cielo correspondiente a cada situación estudiada.

Si bien este trabajo pretende analizar la ganancia, en términos de radiación solar celeste y reflejada, obtenida por las estrategias 2 y 3, el objetivo final de la gran mayoría de los sistemas de seguimiento solar a dos ejes es la producción de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos (FV). En estos casos es preciso tener en cuenta las pérdidas ópticas que se producen cuando la incidencia de la radiación solar no es normal al módulo FV. En los siguientes epígrafes se describe la metodología seguida para la clasificación de los cielos, así como para el cálculo de la irradiancia difusa sobre el plano de captación y de las pérdidas por reflexión y absorción en la superficie del módulo.

Clasificación de cielos

Los cielos considerados fueron clasificados de acuerdo con las 15 distribuciones estándar de luminancia propuestas en el estándar ISO 15469:2004(E)/CIE S 011/E:2003 (2004) a partir de las medidas de distribución angular de luminancia en el cielo llevadas a cabo por el escáner de cielo. De los 15 tipos de cielo estándar propuestos por la norma ISO/CIE, cinco de ellos se corresponden con cielos cubiertos (tipos 1 a 5), cinco con cielos intermedios (tipos 6 a 10) y los cinco últimos (tipos 11 a 15) con cielos claros. En la bibliografía existen diversos métodos para la caracterización de los cielos según dicho estándar. En este trabajo se ha empleado el procedimiento propuesto por Tregenza (2004) y evaluado por Suárez-García et al. (2018) para la ciudad de Burgos. En ocasiones sucede que algunos de los cielos clasificados como cubiertos muestran una irradiancia directa sobre el plano normal (G_{bn}) excesivamente alta o ciertos cielos clasificados como claros presentan una G_{bn} anormalmente baja. Estos cielos se conocen como “opuestos”, en oposición a los cielos “normales”. Una vez realizada la clasificación ISO/CIE, se discriminó entre cielos “normales” y “opuestos” según el criterio de Bartzokas et al. (2005), que establece el valor umbral de G_{bn} en $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Los cielos “opuestos”, que suponen un 14.58% de los cielos claros (tipos 1 a 6) y un

7.89% de cielos cubiertos (tipos 7 a 15), fueron descartados y sólo se utilizaron los cielos “normales”. De tal manera que la serie de datos utilizada quedó reducida a 15,475 registros.

Normalización de las medidas de radiancia

Como se ha explicado en el epígrafe dedicado a los datos radiométricos, el tercer criterio de control de calidad que se aplicó a los registros de distribución angular de radiancia compara el valor de irradiancia difusa obtenido mediante la integración de las medidas de radiancia sobre el plano horizontal ($G_{d,ss}$), de acuerdo con la Ec. (1), frente al valor de irradiancia difusa horizontal medida en el mismo periodo de tiempo (G_d).

$$G_{d,ss} = \sum_{i=1}^{145} R_i \omega_i \cos \theta_i \quad (1)$$

donde R_i es el valor de radiancia medido por el escáner de cielo correspondiente al sector de cielo i , ω_i es el ángulo sólido subtendido por dicho sector y θ_i su ángulo de cénit relativo al plano horizontal. Con el objetivo de que los valores de $G_{d,ss}$ y G_d fuesen coherentes, se normalizaron las medias de radiancia frente a la irradiancia difusa horizontal. El cálculo del factor de normalización para cada momento, obtenido mediante la Ec. (2), se aplicó a cada uno de los valores de radiancia medidos mediante el escáner de cielo que superaron el control de calidad (R_i), obteniendo así los valores de radiancia normalizados ($R_{n,i}$).

$$f = \frac{G_d}{G_{d,ss}} \quad (2)$$

Metodología para el cálculo de la irradiancia global sobre el plano inclinado

A la hora de calcular la irradiancia global sobre el plano inclinado se trataron, de manera independiente, las componentes directa, difusa y reflejada. El cálculo de la irradiancia directa sobre el plano inclinado ($G_{b,T}$) atiende a una sencilla transformación geométrica que tiene en cuenta la posición del sol, parametrizada por su ángulo de cenit (θ_z) y su azimut (γ_s), y la disposición del plano, definida por su inclinación (β_p) y acimut (γ_p). Por su parte, para el cálculo de la irradiancia difusa sobre el plano inclinado ($G_{d,T}$) se utilizó una expresión análoga a la Ec. (1) que toma como plano de referencia para el cálculo de ángulo de cénit la normal al plano inclinado, Ec. (3).

$$G_{d,T} = \sum_{i=1}^{145} \max\{0, R_{n,i} \omega_i \cos \theta'_i\} \quad (3)$$

donde θ'_i es el ángulo de cénit del sector de cielo i relativo a la normal del plano inclinado. Es preciso tener en cuenta que aquellos sectores de cielo no visibles desde el plano inclinado, esto es, cuyo valor de $\cos \theta'_i$ es negativo, fueron excluidos del sumatorio de la Ec. (3). A la hora de calcular la irradiancia reflejada se consideró, como es habitual, que los obstáculos del entorno reflejaban la radiación solar de manera lambertiana con un albedo medio (ρ) constante. En este trabajo se consideraron 4 valores de ρ diferentes: 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8.

$$G_{r,T} = G \left(\frac{1 - \cos \beta_p}{2} \right) \rho \quad (3)$$

En el caso de la estrategia 2, en la que el captador solar se dispone horizontalmente en condiciones de cielo cubierto, la irradiancia difusa incidente se corresponde con la irradiancia difusa horizontal medida mediante el piranómetro con disco de sombra. Además, la captación de irradiancia reflejada es nula. Por lo tanto, el procedimiento descrito únicamente se aplicó a las estrategias de seguimiento 1 y 3. Específicamente para la estrategia 3, dicho procedimiento se repitió un total de 145 veces con el fin de determinar la disposición más ventajosa desde el punto de vista de la captación de la radiación solar directa, difusa y reflejada.

Cálculo de las pérdidas por reflexión y absorción en la superficie de captación

La determinación de pérdidas angulares en el captador se llevó a cabo mediante el procedimiento de Martín and Ruiz (2002), en el que dichas pérdidas dependen de β_p y de γ_p y de la tecnología FV utilizada, a través del valor de tres coeficientes (a_r , c_1 y c_2). Los factores de pérdidas angulares para las irradiancias directa, $F_b(\theta_p)$, difusa, $F_d(\beta_p)$, y reflejada, $F_p(\beta_p)$, se calcularon con la ayuda de las Ecs. (4) a (6).

$$F_b(\theta_p) = \frac{\exp[\cos \cos \theta_p / a_r] - \exp[-1/a_r]}{1 - \exp[-1/a_r]} \quad (4)$$

$$F_d(\beta_p) = \exp \left[-1 \right. \\ \left. / a_r \left(c_1 \left(\sin \sin \beta_p + \frac{\pi - \beta_p - \sin \sin \beta_p}{1 + \cos \cos \beta_p} \right) + c_2 \left(\sin \sin \beta_p + \frac{\pi - \beta_p - \sin \sin \beta_p}{1 + \cos \cos \beta_p} \right)^2 \right) \right] \quad (5)$$

$$F_p(\beta_p) = \exp \left[-1/a_r \left(c_1 \left(\sin \sin \beta_p + \frac{\beta_p - \sin \sin \beta_p}{1 - \cos \cos \beta_p} \right) + c_2 \left(\sin \sin \beta_p + \frac{\beta_p - \sin \sin \beta_p}{1 - \cos \cos \beta_p} \right)^2 \right) \right] \quad (6)$$

A pesar de que el alcance de este trabajo se limitó al cálculo de la radiación solar captada y no a la estimación de producción de electricidad, se consideró, a efectos de cálculo de pérdidas por reflexión, un módulo FV de silicio monocristalino. El parámetro a_r está relacionado con la tecnología del módulo FV, recomendándose un valor de 0.16 para módulos de silicio monocristalino. Por su parte los parámetros c_1 y c_2 tomaron los valores de $4/3\pi$ y -0.074 .

Determinación de la irradiancia captada de acuerdo con cada estrategia de seguimiento

Una vez estimada, para cada instante j , la irradiancia incidente sobre el plano del seguidor mediante las tres estrategias de seguimiento descritas, se determinó la irradiancia efectiva captada por el seguidor de acuerdo con las estrategias 2 ($G_{T2,j}$) y 3 ($G_{T3,j}$). En ambos casos, de acuerdo con las Ecs. (7) y (8), la irradiancia incidente sobre el plano de interés se obtuvo por comparación entre la irradiancia sobre el plano inclinado obtenida mediante la estrategia 1 ($G_{T1,j}$) y la captada según las estrategias 2 o 3. Es preciso tener en cuenta que en la Ec. (7) se compara $G_{T1,j}$ frente a la irradiancia global horizontal ($G_{2,j}$).

$$G_{T2,j} = \max\{G_{T1,j}, G_{2,j}\}. \quad (7)$$

$$G_{T3,j} = \max\{G_{T1,j}, G_{T3,j}\}. \quad (8)$$

RESULTADOS

En la Fig. 1 se presentan las frecuencias de cada tipo de cielo estándar ISO/CIE obtenidas. Se puede apreciar cómo, en el periodo analizado, predominan los cielos claros (especialmente los tipos 11 a 13), siendo el 13 el más frecuente.

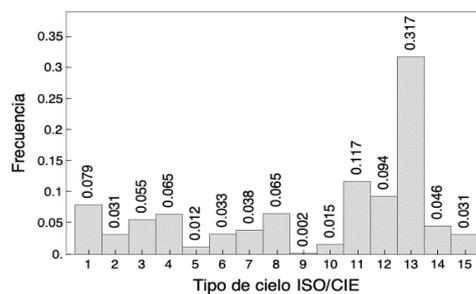


Fig. 1. Frecuencias de ocurrencia de los tipos de cielo estándar ISO/CIE en la estación radiométrica del grupo SWIFT de la UBU entre enero y diciembre de 2021

La Fig. 2 muestra las ganancias relativas obtenidas por las estrategias de seguimiento 2 (Fig. 2a) y 3 (Fig. 2b) en relación con la estrategia 1, para cada tipo de cielo ISO/CIE y para distintos valores de albedo. En ambos casos se puede apreciar que las principales ganancias de energía se obtienen para los tipos de cielo cubierto (tipos 1 a 5). En el caso de la estrategia 2, la ganancia es prácticamente nula para cielos intermedios (tipos 6 a 10) y claros (tipos 11 a 15) mientras que en la estrategia 3 presenta valores ligeramente más altos, especialmente para el tipo de cielo 6 y para los tipos de cielo 7 y 15 con un albedo de 0.8. En relación con los cielos cubiertos, se puede apreciar cómo, para todos los tipos de cielo, la ganancia aumenta a medida que el albedo disminuye, alcanzando valores de 22.7% y 23.5% para las estrategias 2 y 3, respectivamente. En la parte derecha de cada gráfico se presentan las ganancias anuales que oscilan entre un 0.50% y un 0.83% en el caso de la estrategia 2 y entre un 1.01% y un 1.09% para la estrategia 3. Se

puede apreciar la relación inversa entre el albedo y la ganancia. En todos los casos, la ganancia alcanzada por la estrategia 3 supera a la de la estrategia 2.

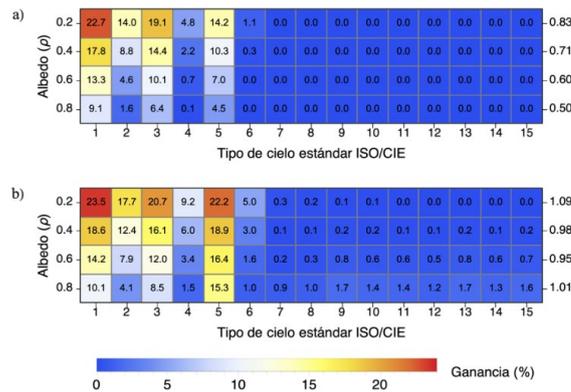


Fig. 2. Ganancias relativas de energía (%) obtenidas, para distintos valores de albedo, por (a) la estrategia de seguimiento 2 y (b) la estrategia de seguimiento 3, respecto a la estrategia de seguimiento 1, considerando los 15 tipos de cielo estándar ISO/CIE. En la parte derecha de cada gráfico se incluye la ganancia anual obtenida por cada estrategia para los distintos valores de albedo considerados

Las Figs. 3 y 4 muestran los resultados de la Fig. 2 desagregados por meses. Los resultados mostrados en ambas figuras se han limitado a los cielos cubiertos, en los que se aprecia una ganancia significativa de energía captada. Concretamente, la Fig. 3 muestra las ganancias mensuales obtenidas por la estrategia 2 para cada tipo de cielo. Se puede observar que, en general, las mayores ganancias se obtienen durante meses de invierno, que concentran la mayor cantidad de cielos cubiertos. De nuevo se observa la relación inversa entre albedo y ganancia de energía. Para todos los valores de albedo destaca el comportamiento anómalo que exhiben los valores de ganancia correspondientes a los tipos de cielo 2 y 4, que rompe con la tendencia observada en el resto de los tipos de cielo. Los tipos de cielo 1, 3 y 5 presentan prácticamente una invarianza acimutal de la radiancia, mientras que en los 2 y 4 se observa una cierta intensificación de la radiancia en la zona circumsolar. Es probable que esto, junto con la proporción de momentos en los que realmente el plano se dispondría en posición horizontal, explique los resultados.

Las ganancias mensuales obtenidas por la estrategia 3 para cada tipo de cielo se muestran en la Fig. 4. Los valores mostrados corroboran la tendencia observada en la Fig. 3. Esto es, las mayores ganancias de energía captada mediante la estrategia de seguimiento 3 se alcanzan en los meses de invierno, con incrementos de captación de energía de hasta el 42.9%, y dicha ganancia disminuye a media que el albedo aumenta. Se confirma que las ganancias de la estrategia 3 son mayores, en todos los casos, que las de la estrategia 2. Sin embargo, se aprecia una diferencia respecto a los resultados de la estrategia 2 ya que, para el tipo de cielo 5, se alcanzan ganancias que oscilan entre el 24.5% y el 28.3% para el mes de junio.

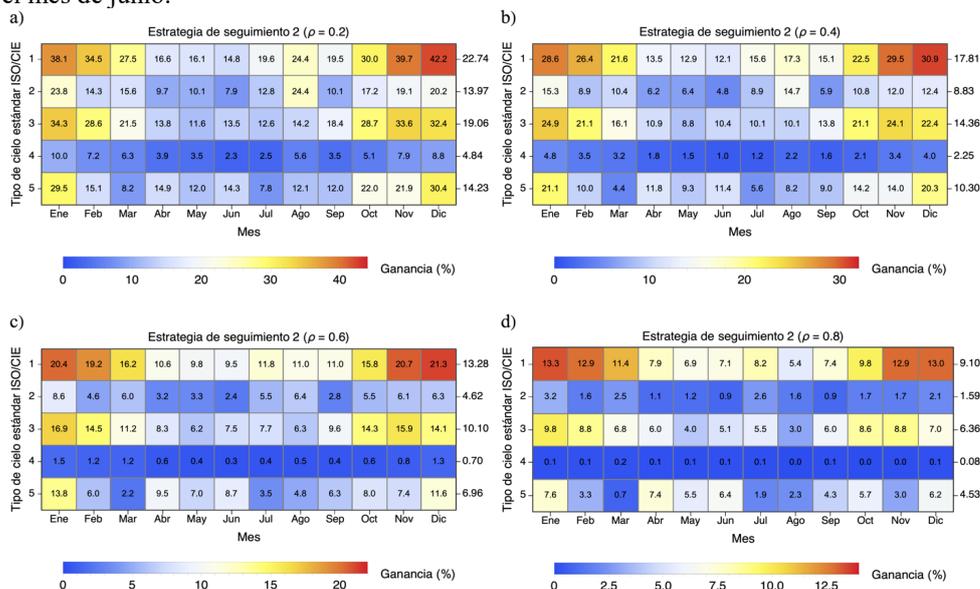


Fig. 3. Ganancias relativas de energía (%) obtenidas por la estrategia de seguimiento 2 respecto a la estrategia de seguimiento 1, para los tipos de cielo estándar ISO/CIE 1 a 5 y para cada mes del año, considerando valores de albedo de (a) 0.2, (b) 0.4, (c) 0.6 y (d) 0.8

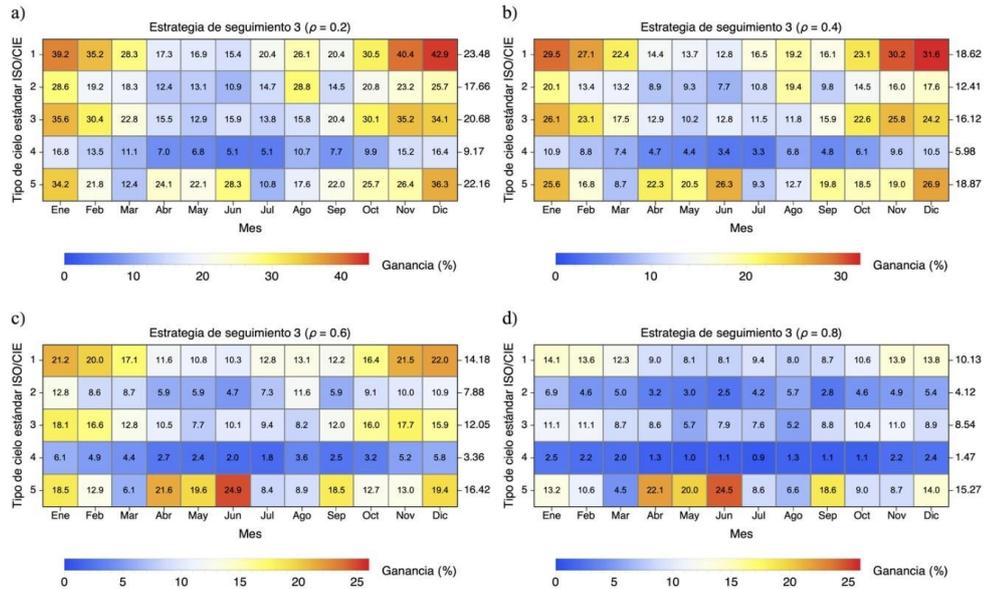


Fig. 4. Ganancias relativas de energía (%) obtenidas por la estrategia de seguimiento 3 respecto a la estrategia de seguimiento 1, para los tipos de cielo estándar ISO/CIE 1 a 5 y para cada mes del año, considerando valores de albedo de (a) 0.2, (b) 0.4, (c) 0.6 y (d) 0.8

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la capacidad de captación de energía de dos estrategias de seguimiento solar a dos ejes alternativas a la convencional, especialmente en condiciones de cielo cubierto. Estas estrategias se proponen como una alternativa al seguimiento de la posición del sol realizado habitualmente por este tipo de dispositivos. Se han observado incrementos significativos de captación de radiación solar (celeste y reflejada) bajo condiciones de cielo cubierto, especialmente en los meses de invierno, que pueden alcanzar un valor del 43% respecto a la estrategia de seguimiento del sol. Los resultados han sido especialmente favorables en el caso de la estrategia 3, que orienta el plano del seguidor de acuerdo con la máxima captación de energía, independientemente de la posición del sol

Sin embargo, las ganancias globales anuales, esto es, considerando todos los tipos de cielo, son bajas para las dos estrategias de seguimiento alternativas propuestas. Es preciso tener en cuenta que las ganancias anuales obtenidas son consecuencia de las frecuencias de tipos de cielos presentes en la ciudad de Burgos, en la que los cielos claros e intermedios se dan en un 76% de los casos. Indudablemente, las ganancias totales serían significativamente mayores en lugares con predominancia de cielos cubiertos. En este sentido, los trabajos futuros tratarán de evaluar estos resultados en otras ubicaciones con mayor frecuencia de este tipo de cielos.

Las elevadas ganancias observadas en los meses de invierno, especialmente cuando el albedo es bajo, pueden mejorar el acoplamiento entre la oferta y la demanda de energía en instalaciones aisladas de la red eléctrica, teniendo en cuenta que, en este tipo de instalaciones, el objetivo del sistema FV no es producir la mayor cantidad de energía posible sino reducir la probabilidad de pérdida de carga que, en latitudes medias y altas, suele ser mayor en los meses de invierno cuando la demanda energética es uniforme a lo largo del año o se concentra en los meses de invierno.

Finalmente, un aspecto que no ha sido abordado en este trabajo y que será el objetivo de estudios futuros, es la viabilidad técnica y económica de la implementación de las estrategias de seguimiento propuestas. El proceso de implementación de cualquiera de las dos estrategias requerirá el análisis de la persistencia de los cielos cubiertos del lugar para evitar que el seguidor solar realice cambios muy frecuentes de posición que comprometan su correcto funcionamiento. También se deberá valorar si la complicación que supone una estrategia de seguimiento de este tipo se justifica económicamente. Asimismo, será preciso que la instalación disponga de un dispositivo que registre la distribución angular de radiancia en el cielo y determine la posición más ventajosa del seguidor. Este dispositivo podría estar basado en cámaras de cielo de bajo coste calibradas desde el punto de vista geométrico y radiométrico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto Análisis espectral de la radiación solar: Aplicaciones climáticas, energéticas y biológicas (RTI2018-098900-B-I00) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades dentro del programa estatal de I+D+i “Retos Investigación”. Ignacio García agradece al Ministerio de Universidades y a la Unión Europea-Next Generation EU su apoyo financiero (Programa de recualificación del sistema universitario español 2021-2023, Resolución 1402/2021). Diego Granados-López agradece a la Junta de Castilla y León su apoyo financiero (Programa PIRTU, ORDEN EDU/556/2019).

REFERENCIAS

- Antoñanzas, J., Urraca, R., Martínez-de-Pisón, F.J., Antoñanzas, F., 2018. *Optimal solar tracking strategy to increase irradiance in the plane of array under cloudy conditions: A study across Europe*. Sol. Energy 163, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.080>
- Bartzokas, A., Kambezidis, H.D., Darula, S., Kittler, R., 2005. *Comparison between winter and summer sky-luminance distribution in Central Europe and in the Eastern Mediterranean*. J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. 67, 709–718. <https://doi.org/10.1016/J.JASTP.2004.12.008>
- CIE, 1994. *Guide to recommended practice of daylight measurement*. Technical Report CIE 108:1994. CIE Central Bureau, Vienna, Austria.
- García, I., de Blas, M., Torres, J.L., 2020. *The sky characterization according to the CIE Standard General Sky: Comparative analysis of three classification methods*. Sol. Energy 196, 468–483. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.039>
- Hoyer-Klick, C., Beyer, H.G., Dumortier, D., Schroedter-Homscheidt, M., Wald, L., Martinoli, M., Schilings, C., Gschwind, B., Menard, L., Gaboardi, E., Ramirez-Santigosa, L., Polo, J., Cebecauer, T., Huld, T., Suri, M., de Blas, M., Lorenz, E., Pfatischer, R., Remund, J., Ineichen, P., Tsvetkov, A., Hofierka, J., 2008. *Management and exploitation of solar resource knowledge*, in: Proceeding of the EUROSUN 2008, 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings. Lisbon, Portugal.
- Igawa, N., 2014. *Improving the All Sky Model for the luminance and radiance distributions of the sky*. Sol. Energy 105, 354–372. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.020>
- ISO 15469:2004(E)/CIE S 011/E:2003, 2004. *Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky*. Geneva: ISO, Vienna: CIE.
- Kelly, N.A., Gibson, T.L., 2011. *Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days*. Sol. Energy 85, 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.10.015>
- Martín, N., Ruiz, J.M., 2002. *A new model for PV modules angular losses under field conditions*. Int. J. Sol. Energy 22, 19–31. <https://doi.org/10.1080/01425910212852>
- Perez, R., Seals, R., Michalsky, J.J., 1993. *All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation*. Sol. Energy 50, 235–245. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90017-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I)
- Quesada, G., Guillon, L., Rouse, D.R., Mehrtash, M., Dutil, Y., Paradis, P.-L., 2015. *Tracking strategy for photovoltaic solar systems in high latitudes*. Energy Convers. Manag. 103, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.041>
- Suárez-García, A., Granados-López, D., González-Peña, D., Díez-Mediavilla, M., Alonso-Tristán, C., 2018. *Seasonal characterization of CIE standard sky types above Burgos, northwestern Spain*. Sol. Energy 169, 24–33. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.04.028>
- Torres, J.L., de Blas, M., García, A., Gracia, A.M., de Francisco, A., 2010a. *Sky luminance distribution in the North of Iberian Peninsula during winter*. J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. 72, 1147–1154. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.07.001>
- Torres, J.L., de Blas, M., García, A., Gracia, A.M., de Francisco, A., 2010b. *Sky luminance distribution in Pamplona (Spain) during the summer period*. J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. 72, 382–388.

<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.12.005>

Tregenza, P.R., 2004. *Analysing sky luminance scans to obtain frequency distributions of CIE Standard General Skies*. *Light. Res. Technol.* 36, 271–281. <https://doi.org/10.1191/1477153504li117oa>