

MODEL OF CALCULATION OF SOLAR IRRADIANCE ON INCLINED SURFACES FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Cervera Gascó, Jorge; Del Castillo Sánchez-Cañamares, Amaro; Montero Martínez, Jesús; Laserna Arcas, Santiago; Tarjuelo Martín-Benito, José María; Moreno Hidalgo, Miguel Ángel
Uclm

Solar radiation is an electromagnetic radiation emitted by the sun. The magnitude of solar radiation that arrives at the Earth is measured as the Irradiance. Global irradiance is the sum of the beam and diffuse irradiance components. In this work, it has been generate a model of calculation the solar irradiance on inclined and oriented surfaces from global horizontal irradiance to get by pyranometer. The innovation of this model respect others is that you can apply for semi-hourly period. Moreover, results have been compared with PVGIS program and are being calibrated with dates of irradiation probe in different locations. This work, it is a part of a research project for optimization of future installations in solar photovoltaic pumping. The model will be a key to get a power generated by solar field and explain the operation in real time. It has been implemented in Matlab as a essential tool for the calculation and design of photovoltaic installations in general.

Keywords: Solar radiation; irradiance; pyranometer; renewable energy

MODELO DE CÁLCULO DE LA IRRADIANCIA SOLAR SEMI-HORARIA SOBRE SUPERFICIE INCLINADA PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

La radiación solar es la radiación electromagnética que emite el sol. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia. La irradiancia global incidente es la suma de las componentes directa y difusa. En este trabajo se ha generado un modelo de cálculo de la irradiancia solar que incide sobre una superficie inclinada y orientada, a partir de los datos de irradiancia global incidente sobre una superficie horizontal medidos mediante un piranómetro. La novedad de este modelo respecto otros que aparecen en la bibliografía reside en que se puede aplicar a un período semi-horario. Se ha comparado con los resultados que ofrece la herramienta PVGIS, y se está calibrando con datos medidos de sondas de irradiación ubicadas en diferentes localizaciones. Este trabajo forma parte de un proyecto de optimización de instalaciones fotovoltaicas para bombeo solar. El modelo será clave para determinar la potencia generada por un campo solar y conocer su funcionamiento en tiempo real. Se ha implementado en Matlab como una herramienta útil para el diseño y cálculo de instalaciones fotovoltaicas en general.

Palabras clave: Radiación solar; irradiancia; piranómetro; energía renovable.

Correspondencia: Jorge Cervera Gasco - Jorge.cervera@uclm.es

Agradecimientos: Al Ministerio de Economía y Competitividad por la concesión del proyecto con referencia AGL2014-59747-C2-1-R. Empresa colaboradora ARENTIO TEKNOWATION, S.L.

1. Introducción

La problemática energética actual distingue dos ejes principales: factor económico y factor medioambiental. El primero de ellos es el coste que el consumidor tiene que asumir y que en ocasiones es elevado siendo insostenible según el tipo de actividad que se desarrolle. El segundo de ellos es el compromiso con los objetivos de disminución de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), tal y como establece el Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono y la gestión energética.

En este sentido las energías renovables ofrecen una solución a los problemas anteriormente mencionados, ya que se trata de energías limpias, baratas e inagotables. Con respecto al objeto de este trabajo el tipo de energía elegido es la energía solar fotovoltaica. España por su posición y climatología es un país especialmente favorecido de cara al aprovechamiento de este tipo de energía. La energía solar ha alcanzado una importancia notable en los últimos años existiendo un gran número de aplicaciones de gran importancia social en el campo de la arquitectura para el diseño de edificaciones, así como en ingeniería o la agricultura, por citar solamente algunos ejemplos.

El elemento clave para el desarrollo de este trabajo es la irradiación solar. La radiación solar es la radiación electromagnética que emite el sol. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia. La irradiancia global incidente es la suma de las componentes directa procedente del disco solar y difusa procedente del resto del cielo debido a los procesos de dispersión que se producen en la atmosfera. La irradiancia solar semi-horaria es la potencia o radiación incidente por unidad de superficie producida cada media hora. Indica la intensidad de la radiación solar y se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2).

La irradiancia semi-horaria global incidente sobre superficie horizontal (GHI) puede ser medida con variedad de instrumentos pero el más común de ellos es el piranómetro diseñado para medir en un campo de 180° . Son numerosos los estudios desarrollados por diferentes autores para la estimación de las componentes directa y difusa de la radiación global como las correlaciones de Liu y Jordan (1960) y Collares-Pereira y Rabl (1979) cuyo modelo propuesto permite obtener las componentes directa y difusa a partir de los valores de radiación global diaria. Además, Chao et al. (2008) desarrollaron un modelo de simulación de la irradiación solar con simulink.

Se ha comprobado que los modelos de cálculo de irradiación existentes dan buenos resultados, sin embargo, no ocurre lo mismo para el cálculo de irradiancias, donde no se han encontrado modelos de cálculo que den resultados adecuados en tiempo real.

No obstante, en este estudio se presenta una metodología que permite el cálculo de la irradiancia solar semi-horaria sobre superficie inclinada mediante datos de irradiancia solar semi-horaria sobre superficie horizontal. Esto permitirá conocer de forma precisa los posibles cambios en las condiciones del cielo durante el día.

En este sentido se han encontrado referencias muy útiles en la web de Sandia National Laboratories (<http://www.sandia.gov>) que han ayudado para el desarrollo de la herramienta de cálculo de la irradiancia global semi-horaria sobre superficie inclinada.

Este trabajo forma parte de un proyecto encaminado al cálculo de la producción de energía generada en tiempo real por un campo solar y posterior optimización del riego en las instalaciones de bombeo solar.

2. Objetivos

El objetivo planteado en este estudio es desarrollar una herramienta de cálculo de la irradiancia semi-horaria sobre superficie inclinada a partir de valores de irradiancia semi-horaria sobre superficie horizontal obtenidos mediante un piranómetro. Además, los resultados se han comparado y calibrado con sondas de irradiación tipo SIS-13TC en diferentes localizaciones.

3. Metodología

3.1. Localización y datos de partida

Previo a los cálculos, son necesarios una serie de datos de partida que indiquen la localización de la zona de estudio como son la altitud, latitud y longitud. También es necesario conocer la inclinación y la orientación de las placas además del coeficiente de reflexión para el cálculo de la irradiancia reflejada.

Tal y como se ha comentado anteriormente los cálculos de irradiancia sobre superficie inclinada se efectúan a partir de los datos de irradiancia sobre superficie horizontal por lo que son necesarios el día, mes y año y, en este caso al tratarse de irradiancia semi-horaria, la hora y su valor de irradiancia global sobre superficie horizontal asociado.

La evaluación de la herramienta se va a realizar teniendo en cuenta datos de irradiancia global sobre superficie horizontal obtenidos mediante un piranómetro tipo Skye SP1110 (Campbell) de la red SIAR de Castilla-La Mancha de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio. La simulación con la herramienta generada en Matlab realizada con estos datos de irradiación global sobre superficie horizontal será comparada con los datos de las sondas de irradiación tipo SIS-13TC en diferentes localizaciones.

El comienzo de la tomas de datos para estas sondas de irradiación empezó en noviembre de 2015 hasta marzo de 2016. En la tabla 1 se pueden ver los datos de localización de las sondas de irradiación analizadas. En la tabla 2 se pueden ver los datos de localización de la estación meteorológica utilizada para obtener los datos de irradiancia sobre superficie horizontal. Como se puede ver en la figura 1, las sondas de irradiación se encuentran situadas en fincas pertenecientes a las localidades de Argamasilla de Alba (Ciudad Real) y Santa Ana (Albacete) cuyos datos se presentan a continuación.

Tabla 1. Datos de localización de las sondas de irradiación analizadas

Término municipal	Latitud	Longitud	Coordenada X	Coordenada Y
Santa Ana (Albacete)	38° 52' 48"	2° 0' 3.6"	586.621,33	4.304.365,06
Argamasilla de Alba (Ciudad Real)	39° 11' 26.57"	3° 6' 45.35"	490.276,15	4.337.946,77

Tabla 2. Datos de localización de la estación meteorológica utilizada

Estación Meteorológica	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Albacete	38° 56' 57.72"	1° 54' 6.47"	677

Figura 1: Mapa de posición de las localidades de Argamasilla de Alba (Ciudad Real) y Santa Ana (Albacete)



3.2. Componentes de irradiancia sobre superficie horizontal

Para una mejor comprensión de los pasos de cálculo realizados se explicarán por separado los dos bloques principales: El primero de ellos consta de la obtención de las componentes de la irradiancia global sobre superficie horizontal y el segundo bloque consta de la obtención de las componentes de la irradiancia global sobre superficie inclinada respectivamente.

Posición del sol

En este apartado se muestran los parámetros necesarios para determinar la posición del sol con respecto a un observador que se encuentra en la superficie de la tierra y que son imprescindibles para poder hacer una correcta simulación de un sistema fotovoltaico. Los parámetros son el ángulo zenit solar (θ_z), el ángulo acimut solar (θ_A) y el ángulo de elevación del sol (θ_e).

Irradiancia directa y difusa sobre superficie horizontal

Para la obtención de las componentes de irradiancia directa (DNI) y difusa (DHI) sobre superficie horizontal previamente se ha medido mediante un piranómetro tipo Skye SP1110 (Campbell) la irradiancia global incidente sobre superficie horizontal (GHI). Los datos obtenidos de irradiancia global incidente sobre superficie horizontal (GHI) son semi-horarios y las unidades de medida son W/m^2 .

A partir de los datos de irradiancia global incidente sobre superficie horizontal (GHI) se calcula, mediante un modelo de estimación, la irradiancia directa sobre superficie horizontal (DNI).

El modelo inicial utilizado es el "Direct Insolation Simulation Code (DISC)" desarrollado por Maxwell (1987) en el Solar Energy Research Institute (SERI) y que usa medidas de irradiancia global sobre superficie horizontal (GHI), ángulo zenit solar, día del año y presión atmosférica. Posteriormente Perez et al (1992) desarrollan un modelo que mejora los cálculos propuestos por el modelo inicial (DISC).

Una vez obtenida la irradiancia directa sobre superficie horizontal (DNI) hay que corregirla aplicándole el coseno del ángulo zenit solar.

Finalmente para la obtención de la irradiancia difusa sobre superficie horizontal (DHI) solamente es necesario despejar de la siguiente ecuación, ya que los otros valores son conocidos.

$$GHI = DHI + DNI * \cos(\theta_z) \quad (1)$$

3.3. Componentes de irradiancia sobre superficie inclinada

En este apartado se explicarán los pasos seguidos para el cálculo de las componentes de irradiancia sobre superficie inclinada. Para el cálculo de las componentes de irradiancia inclinadas son necesarias las componentes de irradiancia horizontales.

Irradiancia directa sobre superficie inclinada

La conversión de irradiancia directa sobre superficie horizontal (DNI) en irradiancia directa sobre superficie inclinada se basa en un planteamiento geométrico el cual depende de los ángulos de inclinación y orientación de la superficie y de las coordenadas solares.

Para ello es necesario la irradiancia directa sobre superficie horizontal (DNI), el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie inclinada y el ángulo zenit solar.

Irradiancia difusa sobre superficie inclinada

Se ha utilizado el modelo propuesto por Pérez et al (1990) siendo uno de los modelos más utilizados para la estimación de la irradiancia difusa sobre superficie inclinada como descripción más detallada del comportamiento anisotrópico de la irradiancia difusa.

Para su cálculo son necesarios parámetros tales como el ángulo de inclinación de la superficie, el ángulo acimut de la superficie, la irradiancia difusa sobre superficie horizontal (DHI), la irradiancia directa sobre superficie horizontal (DNI), la irradiancia extraterrestre, el ángulo zenit solar, el ángulo azimut solar y la masa relativa de aire.

Irradiancia reflejada sobre superficie inclinada

La irradiancia reflejada sobre superficie inclinada es otra componente que hay que tener en cuenta en el cálculo total de la irradiancia, ya que se produce el fenómeno de reflexión con el suelo e incide en la superficie inclinada.

Para su cálculo se ha tenido en cuenta el coeficiente de reflexión del suelo, la irradiancia global incidente sobre superficie horizontal (GHI) y la inclinación de la superficie.

3.4. Irradiancia total sobre superficie inclinada

En este caso, la irradiancia total sobre superficie inclinada es la suma de las componentes de irradiancia directa, difusa y reflejada.

3.5. Comparación y calibración de resultados

Tal y como se ha comentado en los objetivos de este trabajo los resultados obtenidos con la herramienta de cálculo generada se han comparado con datos de sondas de irradiación tipo SIS-13TC situadas en diferentes localizaciones. Del mismo modo se prevé la calibración de los resultados obtenidos con el fin de validar la herramienta generada en Matlab. La composición de la célula solar es de silicio monocristalino.

3.6. Herramienta informática

Toda esta metodología de cálculo se ha programado en MATLAB® (de MathWorks Inc.), con el fin de que sea una herramienta fácil de manejar, versátil, en un entorno amigable, que permita analizar y optimizar el proceso de transformación de la irradiancia sobre superficie inclinada. Además tal y como se ha comentado en la introducción este es el primer paso para futuros desarrollos en bombeo solar y por tanto seguir programando la herramienta en MATLAB® (de MathWorks Inc.),

4. Resultados

4.1. Comparación SONDA DE IRRADIACIÓN-MATLAB

En este apartado tras aplicar la herramienta informática desarrollada en Matlab, se presentan a continuación los resultados obtenidos en cuanto a la comparación con las sondas de irradiación seleccionadas. En primer lugar se presentan la comparación de los datos obtenidos con la herramienta generada en Matlab como para los datos obtenidos con la sonda de irradiación. Posteriormente se presentan los gráficos de dispersión realizados con los resultados obtenidos de la herramienta generada en Matlab y los datos de la sonda de irradiación.

Para el caso de Santa Ana (Albacete), se presentan los datos de un día representativo de los meses de enero y de noviembre siendo estos días el 16-01-2016 y el 16-11-2015 respectivamente.

La sonda de irradiación ubicada en Santa Ana (Albacete) presenta un grado de inclinación de la placa solar de 11° y una orientación de 30° Oeste. En la figura 2 se presentan los gráficos de los datos obtenidos de la sonda de irradiación, de los datos generados con la herramienta en Matlab y de los datos de irradiancias en superficie horizontal para enero y noviembre respectivamente. En la figura 3 se presentan los gráficos de ajuste para los mismos datos obtenidos anteriormente.

Figura 2: Comparación gráficos X-Y SONDA DE IRRADIACIÓN-MATLAB en Santa Ana (Albacete) para enero y noviembre

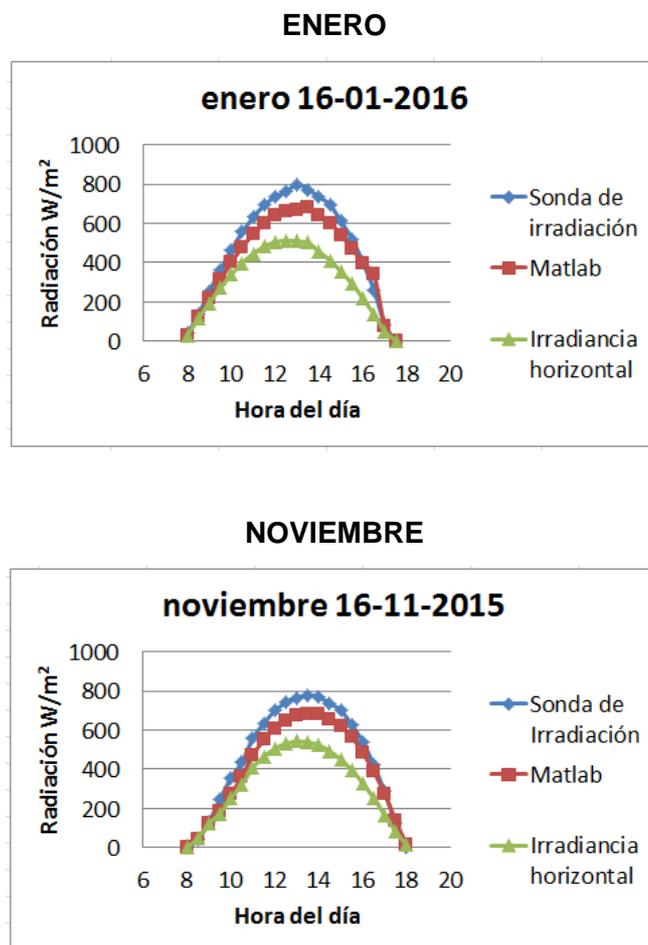
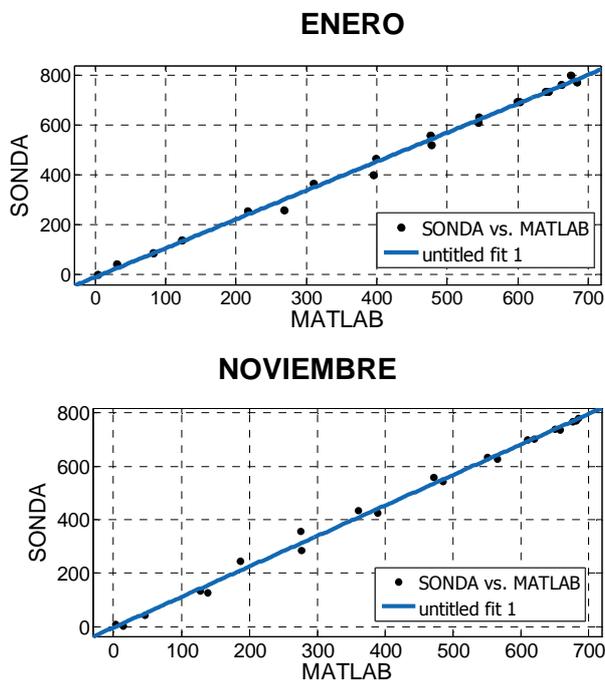


Figura 3: Comparación gráficos de dispersión SONDA DE IRRADIACIÓN-MATLAB en Santa Ana (Albacete) para enero y noviembre,



Para el mes de enero, los valores presentan un buen ajuste con $R^2 = 0,9841$ y valor de $RMSE = 33,60$. Esto significa que, aunque la distribución de pérdidas no se produce de igual forma en todos los periodos de tiempo, las mayores pérdidas producidas se encuentran en torno al 16 % representando 130 W/m^2 para ese periodo de tiempo.

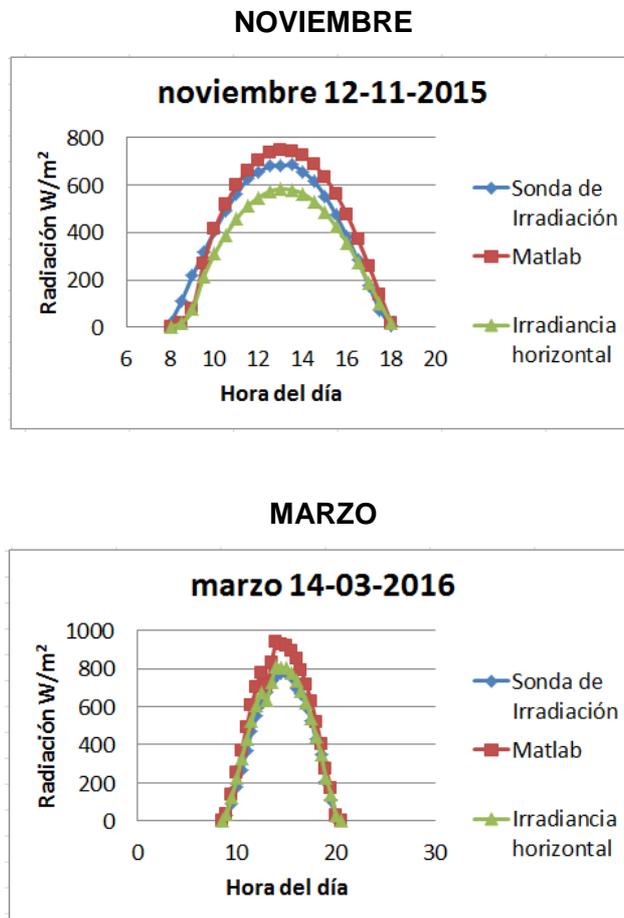
Para el mes de noviembre, los valores presentan un buen ajuste con $R^2 = 0,9949$ y valor de $RMSE = 19,73$. En este caso, las mayores pérdidas se producen en las primeras y centrales horas del día estableciéndose unas pérdidas en los periodos más significativos del día que se encuentran entre el 10-15 % representando entre $56-86 \text{ W/m}^2$.

En la figura 2, en el gráfico del mes de enero, se pueden ver las diferencias existentes entre la sonda de irradiación y la herramienta de Matlab que se produce en las horas centrales del día hacia la tarde. Para el gráfico del mes de noviembre también se puede observar una tendencia similar aunque no es tan significativa como para el mes de enero.

Para el caso de Argamasilla de Alba (Ciudad real), se presentan los datos de un día representativo de los meses de noviembre y de marzo. Siendo estos días el 12-11-2015 y el 14-03-2016 respectivamente.

La sonda de irradiación ubicada en Argamasilla de Alba (Ciudad Real) presenta un grado de inclinación de la placa solar de 11° y una orientación de 0° Sur. En la figura 4 se presentan los gráficos de los datos obtenidos de la sonda de irradiación, de los datos generados con la herramienta en Matlab y de los datos de irradiancias en superficie horizontal para noviembre y marzo respectivamente. En la figura 5 se presentan los gráficos de ajuste para los mismos datos obtenidos anteriormente.

Figura 4: Comparación gráficos X-Y SONDA DE IRRADIACIÓN-MATLAB en Argamasilla de Alba (Ciudad Real) para noviembre y marzo



Para el mes de noviembre, los valores presentan un buen ajuste con $R^2 = 0,9579$ y valor de $RMSE = 49,75$. En este caso, las mayores pérdidas se producen en los primeros y últimos periodos del día (salida y puesta) hacia la tarde mientras que para el resto del día las pérdidas se encuentran entre el 2-14 % según periodos del día representando entre 8-78 W/m^2 respectivamente.

Como se puede ver en la figura 5, en el gráfico de noviembre, hay una mayor dispersión de resultados a irradiancias bajas-medias mientras que para irradiancias elevadas los datos se encuentran más agrupados.

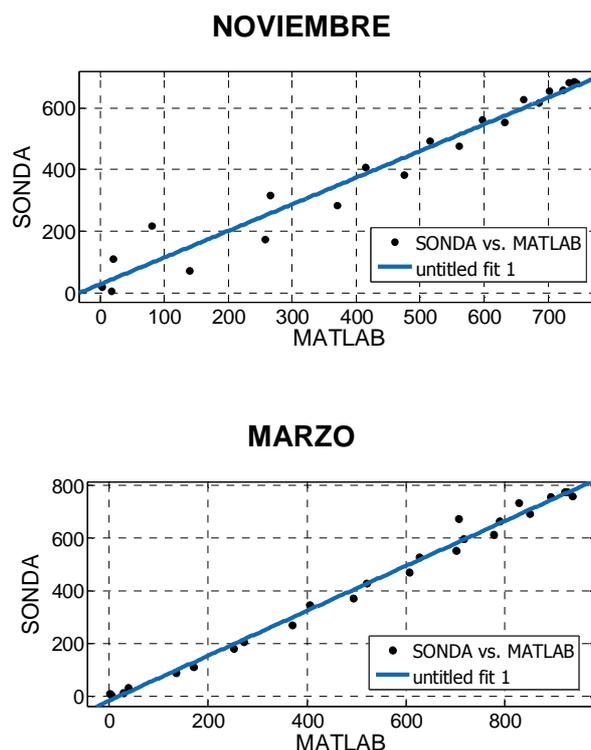
Para el mes de marzo, los valores presentan un buen ajuste con $R^2 = 0,9904$ y valor de $RMSE = 27,98$. En este caso, las mayores pérdidas se producen en los primeros y últimos periodos del día (salida y puesta) mientras que para el resto del día las pérdidas se encuentran entre el 19-37 % según periodos del día representando entre 92-164 W/m^2 .

Como se puede ver en la figura 4, en la gráfica X e Y de marzo y noviembre, los valores obtenidos en Matlab son más elevados que los obtenidos por la sonda de irradiación siendo esta una tendencia que no ocurre en el resto de los casos.

Para el mes de marzo, concretamente, se ha observado que los datos de irradiancia global sobre superficie horizontal obtenidos mediante el piranómetro empelados para la simulación en Matlab presentaban valores un poco más elevados de lo normal con respecto a los datos

de la sonda de irradiación que ya tiene una cierta inclinación. Además, como se puede ver en la figura 5, hay una mayor dispersión de resultados a irradiancias elevadas mientras que para irradiancias medias los datos se encuentran más agrupados.

Figura 5: Comparación SONDA DE IRRADIACIÓN-MATLAB en Argamasilla de Alba (Ciudad Real) para noviembre y marzo



5. Conclusiones

Las conclusiones más importantes de este estudio indican que la comparación de resultados con la herramienta generada en Matlab frente a las sondas de irradiación, teniendo en cuenta los errores a priori producidos por la diferente posición de los sensores de captación de la irradiación, de ahí que en ocasiones los datos de irradiancias sobre superficie horizontal tomen valores diferentes, además de los posibles errores producidos por el diferente rango de captación de la irradiancia de los sensores así como la composición de las células captadoras, ofrece buenas aproximaciones pudiendo validar esta herramienta con datos reales.

No obstante, para futuras actuaciones, se pretende realizar el estudio con un piranómetro, para obtener la irradiación sobre superficie horizontal, y con una sonda de irradiación, con cierta inclinación, exactamente en el mismo lugar para precisamente evitar los errores por posición.

Por tanto, la herramienta generada en Matlab permite calcular la irradiancia sobre superficie inclinada a partir de datos medidos de irradiancia sobre superficie horizontal y será clave para el posterior desarrollo del cálculo de la producción energética para instalaciones de bombeo solar.

Referencias

- Liu, B.Y.H. & Jordan, R.C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Solar energy*, 4, 1.
- Chao, S. Ya-Ling, H. Ying-Wen, L., & Wen-Quan, T. (2008). Modeling and simulation of solar radiation data processing with Simulink. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16, 721–735.
- Collares-Pereira, M., & Rabl, A. (1979). The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, 22(2),155–64.
- España. Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de marzo de 2014, núm. 77, pp. 27437-27452.
- Maxwell, E. L, (1987). A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation, *Technical Report No. SERI/TR-215-3087*, Golden, CO: Solar Energy Research Institute.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44 (5), 271–289.
- Perez, R., Ineichen, P. Maxwell, E. Seals.R., & Zelenka, A. (1992). Dynamic Global-to Direct Irradiance Conversion Models. *ASHRAE Transactions-Research Series*, 354-369.
- Sandia National Laboratories. Obtenido 20 de septiembre de 2015, desde <http://www.sandia.gov>