

Occurrences of Extreme Solar Irradiance at 3812 meters above sea level, at Lake Titicaca (Puno - Peru)

José Manuel Ramos Cutipa¹, Norman Jesús Beltrán Castañón¹, Elmer Rodrigo Aquino Larico², Vilma Sarmiento Mamani³, Reynaldo Condori Yucra³, Henry Pizarro Viveros³, Pedro Yulian Puma Roque³, Wilson Negro Macedo⁴

¹Universidad Nacional del Altiplano, E.P. Mecánica Eléctrica, Puno, Perú, jramos@unap.edu.pe, nbeltran@unap.edu.pe

²Universidad Nacional del Altiplano, Escuela de Pos Grado, Puno, Perú, eaquinol@unap.edu.pe

³Universidad Nacional de Juliaca, E.P. de Ingeniería en Energías Renovables, Puno, Perú, v.sarmiento@unaj.edu.pe, reynaldo_vufra@hotmail.com, hpizarrov@unaj.edu.pe, pedroypr@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pará (UFPA), Grupo GEDAE, Brasil, wmacedo@ufpa.br

Abstract— The capture of the solar resource by means of photovoltaic systems to transform it into electricity depends on the solar irradiance during the day and climatic factors, the latter being of great importance. Aiming at evaluating and determining the occurrences of extreme solar irradiance and the Peak Sun Hours (HSP) in varied climatic conditions of the altiplano at 3812 meters above sea level, at the level of Lake Titicaca (Puno - Peru) and its effects on the photovoltaic system. The solar irradiance measurement was performed with two short-circuit photovoltaic modules each, where the I_{sc} short-circuit current was connected to a current transducer to convert it into an analog electrical signal processed and stored every second in a programmable Logic Controller High precision (PLC). The results show the occurrence of extreme solar irradiance exceeding $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ and the solar constant for a few seconds on partially cloudy days, determining that the HSP is above $6 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{d}$ and its effects on the photovoltaic system. Finally, in the Puno Altiplano, over irradiance is caused by the interaction of the clouds around the sun and the transitory presence of rain in short periods of time that affects the electrical protection system of a photovoltaic system.

Keywords: Occurrences, extreme solar irradiance, Lake Titicaca.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.553>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Ocurrencias de Irradiancia Solar Extrema a 3812 m.s.n.m., a nivel del Lago Titicaca (Puno – Perú)

José Manuel Ramos Cutipa¹, Norman Jesús Beltrán Castañón¹, Elmer Rodrigo Aquino Larico², Vilma Sarmiento Mamani³, Reynaldo Condori Yucra³, Henry Pizarro Viveros³, Pedro Yulian Puma Roque³, Wilson Negro Macedo⁴

¹Universidad Nacional del Altiplano, E.P. Mecánica Eléctrica, Puno, Perú, jramos@unap.edu.pe, nbeltran@unap.edu.pe

²Universidad Nacional del Altiplano, Escuela de Pos Grado, Puno, Perú, eaquinol@unap.edu.pe

³Universidad Nacional de Juliaca, E.P. de Ingeniería en Energías Renovables, Puno, Perú, v.sarmiento@unaj.edu.pe, reynaldo_yufra@hotmail.com, hpizarrov@unaj.edu.pe, pedroypr@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pará (UFPA), Grupo GEDAE, Brasil, wmacedo@ufpa.br

RESUMEN

La captación del recurso solar por medio de sistemas fotovoltaicos para transformarlo en electricidad depende de la irradiancia solar durante el día y los factores climáticos, siendo este último de gran importancia. Teniendo como objetivo evaluar y determinar las ocurrencias de irradiancia solar extrema y las Horas Sol Pico (HSP) en condiciones climáticas variadas del altiplano a 3812 m.s.n.m., a nivel del Lago Titicaca (Puno – Perú) y sus efectos en sistemas fotovoltaicos. Se realizó la medición de la irradiancia solar con dos módulos fotovoltaicos 1 y 2, en corto circuito cada uno, donde la corriente de corto circuito I_{sc} se conectó a un transductor de corriente para convertirla en una señal analógica eléctrica procesada y almacenada en cada segundo en un Controlador Lógico programable (PLC) de alta precisión. Los resultados muestran la ocurrencia de la irradiancia solar extrema sobrepasando los 1000 W/m^2 y la constante solar por unos segundos en días parcialmente nublados, determinándose que en octubre, las HSP de $6.5 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ y $6.4 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$, con y sin limpieza de los módulos fotovoltaicos. Finalmente, en el Altiplano de Puno, la irradiancia solar extrema es causada por la interacción de las nubes alrededor del sol y la presencia transitoria de la lluvia en periodos cortos de tiempo que afecta al sistema de protección eléctrico de un sistema fotovoltaico.

Palabras Clave: Ocurrencias, Irradiancia solar extrema, Lago Titicaca.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una preocupación universal a nivel mundial por la emisión de gases de efecto invernadero usados en los sistemas de generación de energía eléctrica tradicional [1], por el contrario la energía renovables tienen un impacto positivo en la reducción de estos gases [2], por el tipo de recurso que se usa, considerándose como políticas energéticas sostenibles [3]; con potenciales recursos como la energía hidráulica, biomasa, eólico o los recursos solares [4]; siendo una alternativa sostenible frente a la escasez de electricidad [5].

La energía solar es limpia e inagotable posee el recurso energético más abundante de la tierra, encargado de convertir la luz en energía térmica o electricidad [6], la captura de este recurso es por medio de paneles fotovoltaicos, que se desarrollan a gran escala en los últimos años en cuanto a la mejora de su eficiencia y la reducción de costos a nivel mundial [7]; mediante el efecto fotovoltaico se genera el flujo

de electrones en cada célula fotovoltaica siendo la agrupación de estas un módulo fotovoltaico [7].

La irradiancia solar es la potencia incidente por unidad de área de todo tipo de radiación electromagnética; depende de la latitud, longitud y altitud, de las regiones geográficas por las condiciones climáticas y la estacionalidad climática de la zona [8]; además del ángulo de inclinación y ángulo de acimut captada por un módulo fotovoltaico [9].

La irradiancia solar extrema expresado por encima de la constante solar de 1367.7 W/m^2 , siendo un fenómeno que se manifiesta en periodos cortos de tiempo por la luz incidente en un módulo fotovoltaico y las condiciones climáticas de la nubosidad variable [10]; además de la altitud, la interacción y la sobre iluminación de las nubes alrededor del sol por la irradiancia difusa [11]. Este fenómeno es causado por el brillo de los cielos nubosos con periodos de tiempo cortos aumentando la irradiancia de manera transitoria [12], por eso tienen una duración de segundos, pudiéndose ser detectados por piranómetros de alta resolución [13].

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo evaluar y determinar la irradiancia solar extrema y las HSP en condiciones climáticas variadas del altiplano a elevada altitud y sus efectos en el sistema eléctrico que lo compone. Para realizar esta investigación se midió en cada segundo la irradiancia solar en un módulo fotovoltaico de 120 W determinado su comportamiento durante un mes en octubre del 2019, considerando su limpieza periódica en un módulo fotovoltaico y en el otro sin limpieza.

II. RESULTADOS DE LITERATURA

La radiación solar tiene una distribución no homogénea entre diferentes regiones geográficas de la Tierra y las horas del día debido a una gran cantidad de factores: el aparente movimiento del Sol en el cielo, la distancia Sol-Tierra, coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud), y el estado atmosférico, incluyendo nubes y reflectividad del suelo, entre otros.

No toda la radiación solar consigue efectivamente ingresar a la superficie terrestre, esto se debe a que interactúa con componentes atmosféricos, al atravesar la masa óptica y sufre la acción de procesos de reflexión, dispersión y absorción. Así, se puede afirmar que el 51% de la radiación extra terrestre está disponible para procesos en medios físicos y biológicos, siendo la fracción que efectivamente llega a la superficie terrestre denominada radiación solar global [14].

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.553>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Durante el camino hacia la superficie de la Tierra, la irradiancia solar se atenúa por los componentes de la atmósfera. Sin embargo, debido a las interacciones físicas entre la radiación solar y las partículas presentes en la atmósfera, se producen ciertas condiciones de dispersión y otros efectos y valores de irradiancia más altos que los valores extraterrestres horizontales se pueden medir incluso cerca del nivel del mar [15].

El conocimiento preciso de la radiación solar se considera como primer paso para la evaluación de su disponibilidad y sirve para diferentes aplicaciones, como en áreas de la meteorología, climatología, hidrología, modelos de simulación de cultivos y estimación de evapotranspiración [16], y también para la predicción de eficiencia de la energía solar fotovoltaica y térmica se necesitan datos de radiación solar global, así mismo para la ganancia de calor en edificios [17].

Según Li [18], los modelos empíricos para calcular la radiación solar se encuentran basados en los siguientes factores: Astronómicos (constante solar, distancia tierra-sol, declinación y ángulo de la hora), geográficos (latitud, longitud y elevación de la sitio), geométricos (ángulo acimutal de la superficie, ángulo de elevación del sol, ángulo de acimut del sol), físicos (dispersión de moléculas de aire, contenido de vapor de agua, dispersión de polvo de los constituyentes atmosféricos tales como O₂, N₂, CO₂, O₃, etc.), meteorológicos (radiación solar extraterrestre, temperatura de aire, precipitación, humedad relativa, efectos de nubosidad, temperatura del suelo, evaporación, reflexión, etc.).

La variación de la radiación solar global es influenciada en mayor o menor medida por la ubicación, geografía, datos astronómicos, físicos y parámetros meteorológicos [19]. También, para estimar la radiación solar global es preciso las condiciones ambientales como las temperaturas, presión, velocidad del viento, etc. [20]; así mismo, se observa que el número promedio de días de lluvias puede utilizarse para predecir la radiación solar global [21].

Aunque los trabajos mencionados anteriormente describen bien el fenómeno, presentan pocos datos cuantitativos. En este sentido, el propósito de este estudio es realizar un estudio cuantitativo detallado utilizando una base de datos de mediciones de una ubicación, el cual está localizado a 3812 m.s.n.m., a la riveras del Lago Titicaca en Puno- Perú. Los datos fueron obtenidos en intervalos de 1 minuto y medido durante cuatro meses. Con una base de datos, la cuantificación y el análisis del fenómeno de irradiancia solar global nublado se pueden hacer con una alta fiabilidad estadística.

Aún con respecto a las aplicaciones fotovoltaicas en particular, es importante destacar que las células solares tienen una fuerte sensibilidad espectral. Por lo tanto, lo reflejado, la irradiancia, como cualquier otro componente de radiación, puede necesitar ser evaluado sobre una base espectral, lo que generalmente complica su modelado. Dado que este aspecto del problema de modelado no ha recibido mucha profundidad de estudio, sin embargo, aquí se brinda una discusión detallada sobre la radiación extraterrestre.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ubicación

El proyecto de investigación está ubicado en la Universidad Nacional del Altiplano, en la provincia de Puno,

Perú; ubicado en las coordenadas geográficas: la titud sur 15° 50' 15'', longitud oeste 70° 01' 18'' a 3810 m de altitud, el mes con temperatura más alta es noviembre (16.8 °C), la temperatura más baja se da en el mes de julio (-1.3 °C) y llueve con mayor intensidad en el mes de enero (173.72 mm/mes), según Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) su geografía se caracteriza por ser irregular.

B. Materiales

Para medir la irradiancia solar se utilizó dos módulos fotovoltaicos monocristalinos modelo CNBM-120M de 120 W con un ángulo de inclinación en función a la latitud de la zona de estudio de 15.5°, conectado en corto circuito para su medición con dos convertidores analógicos a señal de corriente de (4 a 20) mA modelo MRCA61BD conectado a un PLC de alta precisión modelo TM241 Schneider Electric, los datos se almacenaron en el PLC cada segundo todos los días durante el mes de octubre del 2019 con 46800 datos por día, con el software SOMACHINE con licencia libre, programado con lenguaje ladder y diagrama secuencial para su escalamiento de corriente a irradiancia solar y almacenamiento de datos (Fig. 1).

La calibración del módulo fotovoltaico para la medición de irradiancia solar se realizó con el instrumento de medición portable solarímetro MAC-SOLAR SLM018c-2 de procedencia alemana, en relación directa con la corriente de corto circuito mediante una regresión lineal (escalamiento de señales) introducida en el PLC.

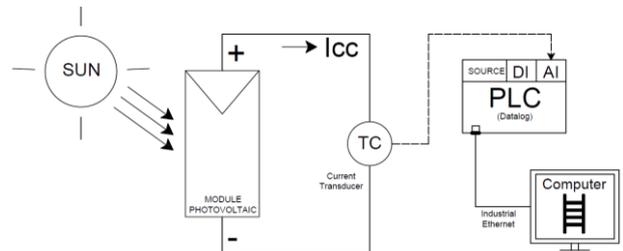


Fig. 1. Esquema de conexiones y adquisición de datos con el PLC TM241.

C. Métodos

La Corriente de Corto circuito (I_{sc}) del módulo fotovoltaico se transforma a señal eléctrica de corriente de (4 a 20) mA mediante el transductor de corriente, seguidamente la señal eléctrica es procesada por el PLC de gama alta con resolución de 16 bit para obtener una salida de números enteros de (0 a 30000).

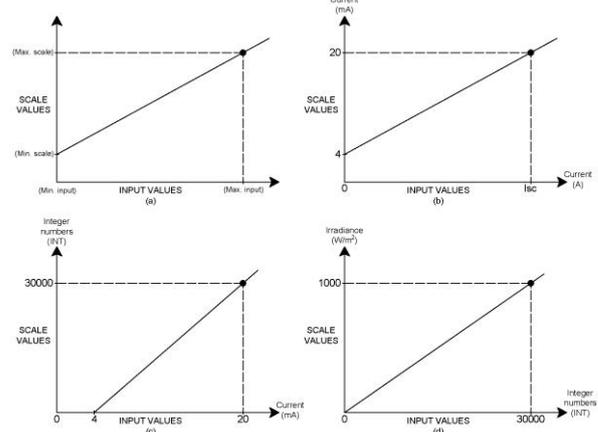


Fig. 2. Escalamiento de señales (a) Valores de entrada y salida, (b) Señal eléctrica en función de la I_{sc} del módulo, (c) Números enteros en función de la señal eléctrica (PLC) y (d) Irradiancia en función a los números enteros (Software).

Finalmente esta señal es procesada en el software de programación en lenguaje escalera y diagrama secuencial SOMACHINE para obtener la escala de irradiancia en tiempo real y almacenarlo en el PLC, siendo almacenado cada segundo, mediante una tarjeta SD de 16 GB, ver (Fig. 2).

El sensor de irradiancia solar puede ser implementado por módulos o células fotovoltaicas que estén debidamente calibrados [22], tomando como parámetro principal la I_{sc} del módulo fotovoltaico que tiene relación directa con la irradiancia solar [23], anulando el voltaje porque este parámetro es variable con la variación de temperatura a lo largo del día; por lo tanto, se puede establecer una relación lineal entre la I_{sc} y la irradiancia [24], para su escalamiento por medio de una regresión lineal y a almacenamiento de datos en el PLC, ver (Fig. 3).

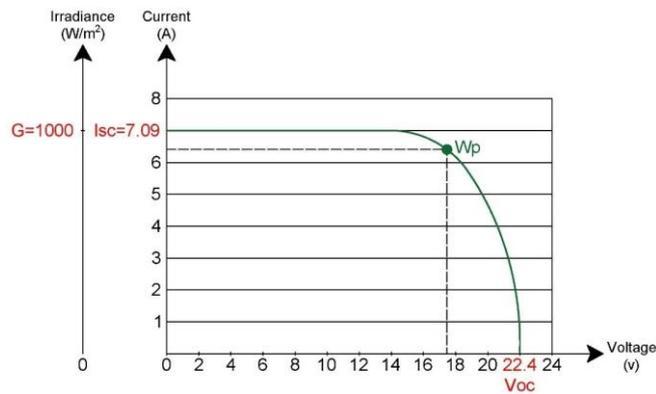


Fig. 3. Curva característica del módulo fotovoltaico CNBM - 120M. [24]

El cálculo de linealidad es según la norma IEC 60904-10, realizado mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados de los puntos de medición de la I_{sc} para determinar la irradiancia solar, mostrado en la ecuación (1).

$$G_{Med} = \frac{I_{Med}}{I_{sc}} \cdot 1000 \quad (1)$$

Dónde: G_{Med} es la Irradiancia en tiempo real, I_{Med} es la corriente de corto circuito que se está midiendo, I_{sc} es la corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resultados

La irradiancia en un día normal soleado tiene un comportamiento similar a una campana, el día 10 de octubre del 2019 en la ciudad de Puno, el día inicia a las 5:45:00 horas, llegando a una irradiancia máxima de 1083.93 W/m^2 a las 11:17:07 horas, estando por encima de la Condición Estándar de Medición (CEM) de 1000 W/m^2 , con limpieza periódica y las HSP de $7.73 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ en el módulo fotovoltaico 1 (línea azul).

En el módulo fotovoltaico 2 se tiene una irradiancia máxima de 1074.51 W/m^2 en la misma hora sin limpieza y las HSP de $7.91 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ (línea naranja), ver (Fig. 4).

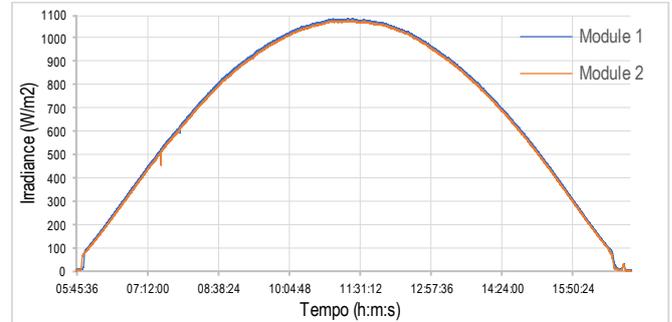


Fig. 4. Irradiancia solar en un día soleado, 10 de octubre 2019.

La irradiancia solar extrema dado en la ciudad de Puno en el mes de octubre del 2019, por las condiciones climáticas, la cobertura de nubes y los días lluviosos (parcialmente nublado); se manifiesta por encima de los 1000 W/m^2 y la constante solar de 1367.7 W/m^2 ; a causa de la interacción del reflejo de las nubes alrededor del sol (irradiancia difusa) y la presencia de lluvia de paso temporal en ese momento, con una duración en el orden de segundos. Si la medición de la irradiancia hubiese sido en minutos no se podría registrar estos datos, por esta razón, se realizó una medición de irradiancia en cada segundo, ver (Fig. 5).



Fig. 5. Nubes alrededor del sol en Puno, octubre 2019.

El día 03 de octubre en el módulo 1, se registró a partir de las 10:06:07 hasta las 10:06:37 horas irradiancias por encima de la constante solar con una duración de 30 segundos, llegándose a un valor máximo de 1497.07 W/m^2 ; además a las 10:07:46 hasta las 10:08:00 se registraron valores de irradiancia extrema con un máximo de 1405.51 W/m^2 con una duración de 15 segundos. Este fenómeno de irradiancia extrema es debido al efecto transitorio de las nubes alrededor del sol y al paso de la lluvia de forma transitoria en periodos cortos de tiempo, ver (Fig. 6).

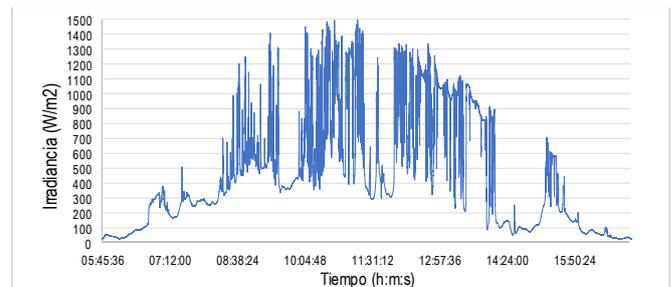


Fig. 6. Irradiancia solar extrema módulo fotovoltaico 1, en un día nublado-lluvioso, 03 de octubre 2019.

De la misma manera el día 31 de octubre en el módulo fotovoltaico 1, se registró a partir de las 10:06:07 hasta las 10:32:10 horas irradiancias por encima de la constante solar con una duración mínima de dos segundos y una duración promedio de 8 segundos con intervalos de tiempo

a aproximado de un minuto por evento de irradiancia extrema, registrándose 22 eventos con una duración máxima de 43 segundos, llegando hasta 1571.92 W/m^2 siendo el valor más elevado de este mes. Tomando en cuenta que en este día a partir de las (10:05 a 10:20) horas sol esta aproximadamente perpendicular hacia la superficie terrestre obteniéndose la mayor incidencia solar, ver (Fig.7).

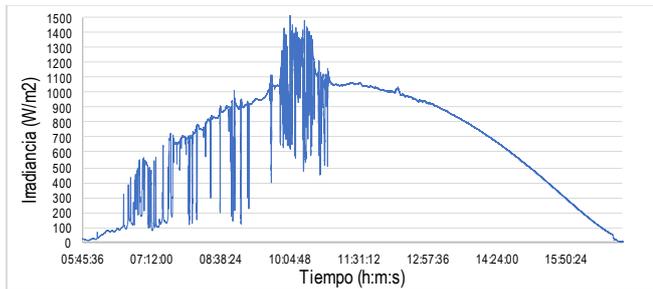


Fig. 7. Irradiación solar extrema módulo fotovoltaico 1, en un día nublado-lluvioso, 31 de octubre 2019.

En día nublado lluvioso típico del altiplano de Puno, el día 16 de octubre, se tiene un comportamiento irregular de irradiancia solar con un máximo de 1262.21 W/m^2 , el cual no excede la constante solar, a causa de las condiciones climáticas variadas del Puno, ver (Fig. 8).

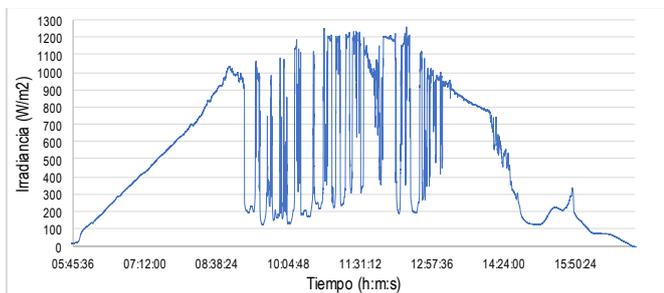


Fig. 8. Irradiancia solar módulo fotovoltaico 1, en un día nublado-lluvioso, 18 de octubre 2019.

Las Horas Sol Pico (HSP) en la ciudad de Puno es variable por la nubosidad y los días lluviosos, en esta zona para el mes de octubre se tiene la presencia de lluvias y días soleados. La HSP más baja fue el día 1 de octubre con $2.35 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ y la más elevada el día 10 de octubre con $7.73 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$; teniendo un promedio de $6.50 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ de HSP durante el mes, dándose en el módulo 1 con limpieza periódica, ver (Fig. 9).



Fig. 9. Horas solar pico (HSP), en módulo fotovoltaico 1.

En el módulo 2, la HSP más baja fue el día 1 de octubre con $2.23 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ y la más elevada el día 23 de octubre con $7.66 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$; teniendo un promedio de $6.44 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ de HSP durante el mes, sin limpieza, ver (Fig. 10).

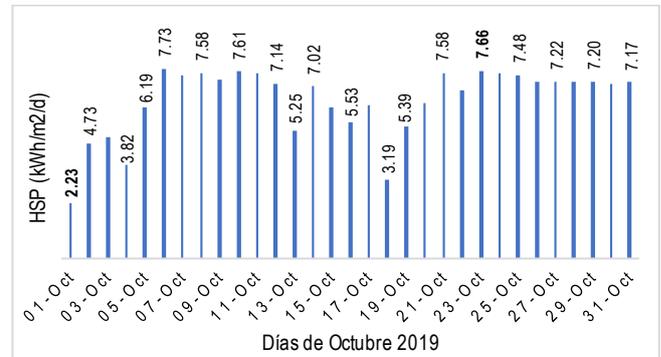


Fig. 10. Horas solar pico (HSP), en módulo fotovoltaico 2.

El comportamiento de la irradiancia solar que está por encima de la CEM, es un factor importante que influye en rendimiento del módulo fotovoltaico, posiblemente acelera su degradación con el paso de los años y acciona repentinamente los sistemas de protección eléctrico contra sobrecarga como los interruptores termomagnéticos y los fusibles ultrarrápidos tipo cartucho gG o gL en Corriente Alterna (AC) y Corriente Directa (DC). Además de, degradar la vida útil de los dispositivos electrónicos en los inversores y reguladores de carga de un sistema fotovoltaico.

B. Discusión

Según R. C. de Andrade and C. Tiba [8], la irradiancia solar extrema tiene una duración entre 1 a 10 minutos esto es debido a la resolución de las imágenes satelitales y la precisión. En el estudio realizado la irradiancia extrema de mayor duración fue de 43 segundos, agrupando la s fracciones de minuto extrema se podría aproximar a los 10 minutos, esto es a causa de la medición realizada por cada segundo y no por cada minuto.

En la zona desértica a gran altitud de la Puna de Atacama Argentina, se registró una irradiancia extrema máxima de 1528 W/m^2 a las 12:09 horas debido a la formación de nubes, solsticio de verano y la altitud de la zona [11], en un estudio realizado en Brasil se registró un sobre irradiancia máxima de 1590 W/m^2 a altitudes inferiores a los 1000 m, registrados con sensores calibrados por módulos fotovoltaicos monocristalinos [21], por otra parte, G. H. Yordanov, T. O. Saetre, and O.-M. Midtgård, [25], el 24 de junio del 2013 en Grimstad al sur de Noruega con una latitud de ($15^\circ 20'$), se reportó el evento de irradiancia extrema de 1600 W/m^2 por casi un minuto. Los resultados de esta investigación muestran el reporte de irradiancia extrema máxima de 1571.92 W/m^2 con una duración de 43 segundos debido a la formación de nubes alrededor del sol y el paso transitorio de la lluvia en periodos cortos de tiempo.

V. CONCLUSIONES

La irradiancia solar extrema es un fenómeno que ocurre por la formación de nubes alrededor del sol y el paso transitorio de la lluvia en periodos cortos de tiempo, además de la altitud de la zona y condiciones climáticas variadas a 3812 m.s.n.m. , al nivel del Lago Titicaca (Puno-Perú).

Se determino una irradiancia solar extrema por encima de la constante solar de 1571.92 W/m^2 , con una duración máxima de 43 segundos y con intervalos en fracciones de minuto, lo cual no significa que este fenómeno es transitorio en el orden de segundos, provocado por la formación de nubes alrededor del sol en días parcialmente nublados.

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas extremas del Altiplano de Puno, se tiene para el mes de octubre una HSP de 6.5 kWh/m²/d con limpieza periódica y 6.4kWh/m²/d sin limpieza del módulo fotovoltaico.

Finalmente, este fenómeno transitorio provoca que el sistema de protección eléctrico actúe de forma repentina haciéndose notar como una falla eléctrica, y posiblemente acelere la degradación del módulo fotovoltaico en condiciones extremas del altiplano de Puno, a 3812 msnm, al nivel que se encuentra el Lago Titicaca.

AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen por la subvención del FONDECYT-CONCYTEC en convenio con el Banco Mundial, mediante el contrato N° 180-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV, para realizar este trabajo. Además, a la Universidade Federal de Pará (Grupo GEDAE) Belém-Brasil, Universidad Nacional de Juliaca (Grupo GRIDSOLAR) y la Universidad Nacional del Altiplano de Puno – Perú, por la disponibilidad de los recursos necesarios para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] S. Lu, X. Bai, W. Li, and N. Wang, "Impacts of climate change on water resources and grain production". In : *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 143, pp. 76-84, 2019/06/01/2019.
- [2] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation". In : *Energy Strategy Reviews*, vol. 24, pp. 38-50, 2019/04/01/2019.
- [3] A. Harjanne and J. M. Korhonen, "Abandoning the concept of renewable energy". In: *Energy Policy*, vol. 127, pp. 330-340, 2019/04/01/2019.
- [4] K. Hansen, C. Breyer, and H. Lund, "Status and perspectives on 100% renewable energy systems". In: *Energy*, vol. 175, pp. 471-480, 2019/05/15/2019.
- [5] M. Ouria, "Solar energy potential according to climatic and geometrical parameters of cities and buildings: A case-study from Tabriz City- Iran". In: *Urban Climate*, vol. 28, p. 100469, 2019/06/01/2019.
- [6] X. Fang, Q. Fan, Z. Liao, J. Xie, X. Xu, and S. Fan, "Spatial-temporal characteristics of the air quality in the Guangdong–Hong Kong–Macau Greater Bay Area of China during 2015–2017". In: *Atmospheric Environment*, vol. 210, pp. 14-34, 2019/08/01/2019.
- [7] P. G. V. Sampaio and M. O. A. González, "Photovoltaic solar energy: Conceptual framework". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 590-601, 2017/07/01/2017.
- [8] R. C. de Andrade and C. Tiba, "Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil". In : *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 1433-1441, 2016/02/01/2016.
- [9] M. A. Danandeh and S. M. Mousavi G, "Solar irradiance estimation models and optimum tilt angle approaches: A comparative study". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 319-330, 2018/09/01/2018.
- [10] R. D. Piacentini, G. M. Salum, N. Fraidenraich, and C. Tiba, "Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil". In: *Renewable Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 409-412, 2011/01/01/2011.
- [11] R. D. Piacentini, A. Cede, and H. Bárcena, "Extreme solar total and UV irradiances due to cloud effect measured near the summer solstice at the high-altitude desertic plateau Puna of Atacama (Argentina)". In: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 65, no. 6, pp. 727-731, 2003/04/01/2003.
- [12] C. A. Gueymard and J. A. Ruiz-Arias, "Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance". In: *Solar Energy*, vol. 128, pp. 1-30, 2016/04/01/2016.
- [13] L. R. do Nascimento, M. Braga, R. A. Campos, H. F. Naspolini, and R. Rütther, "Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil". In: *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1070-1082, 2020/02/01/2020.
- [14] G. Castilho Beruski; A. Belmont P.; P. Cesar Sentelhas, "Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, PR", *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.30, n.2, 00 - 00, 2015
- [15] R. C. de Andrade y C. Tiba, "Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern Brazil, *Renewable Energy*, Volume 86, February 2016, Pages 1433-1441.
- [16] G. Hassan, M. Elsayed, M. Ali, Z. Mohamed, and I. Shehata, "Performance assessment of different day-of-the-year-based models for estimating global solar radiation - Case study: Egypt.", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* Volume 149, November 2016, Pages 69-80.
- [17] Yao, W., Li, Z., Wang, Y., Jiang, F., & Hu, L. "Evaluation of global solar radiation models for Shanghai, China". *Energy Conversion and Management*, 84, 597–612. 2014.04.017.
- [18] Li, D. H. W., Lou, S. W., & Lam, J. C. "An Analysis of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation". *Energy Procedia*, 75, 388–393. 2015.
- [19] Cañada, J. (1988). Global solar radiation in Valencia using sunshine hours and meteorological data. *Solar and Wind Technology*, 5(6), 597–599. 1988
- [20] Zhang, X. "A statistical approach for sub-hourly solar radiation reconstruction". *Renewable Energy*, 71, 307–314. 2014.
- [21] Sendanayake, S., Miguntanna, N. P., & Jayasinghe, M. T. R. Predicting solar radiation for tropical islands from rainfall data. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 9(2), 109–118. 2015.
- [22] M. P. Almeida, R. Zilles, and E. Lorenzo, "Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil". In: *Solar Energy*, vol. 110, pp. 168-173, 2014/12/01/2014.
- [23] M. Bliss et al., "Interlaboratory comparison of short-circuit current versus irradiance linearity measurements of photovoltaic devices". In: *Solar Energy*, vol. 182, pp. 256-263, 2019/04/01/2019.
- [24] K. Emery, S. Winter, S. Pinegar, and D. Nalley, "Linearity Testing of Photovoltaic Cells". In: 2006
- [25] G. H. Yordanov, T. O. Saetre, and O.-M. Midtgård, "Extreme overirradiance events in Norway: 1.6 suns measured close to 60°N". In: *Solar Energy*, vol. 115, pp. 68-73, 2015/05/01/2015.