

enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe

**Colectores solares de placa
plana en Uruguay**

**Eficiencia en la producción
de energía eléctrica,
Bolivia.**

**Análisis de dos tipos de
protecciones solares en
Uruguay.**

**Instalación solar de un
proceso productivo,
Argentina.**

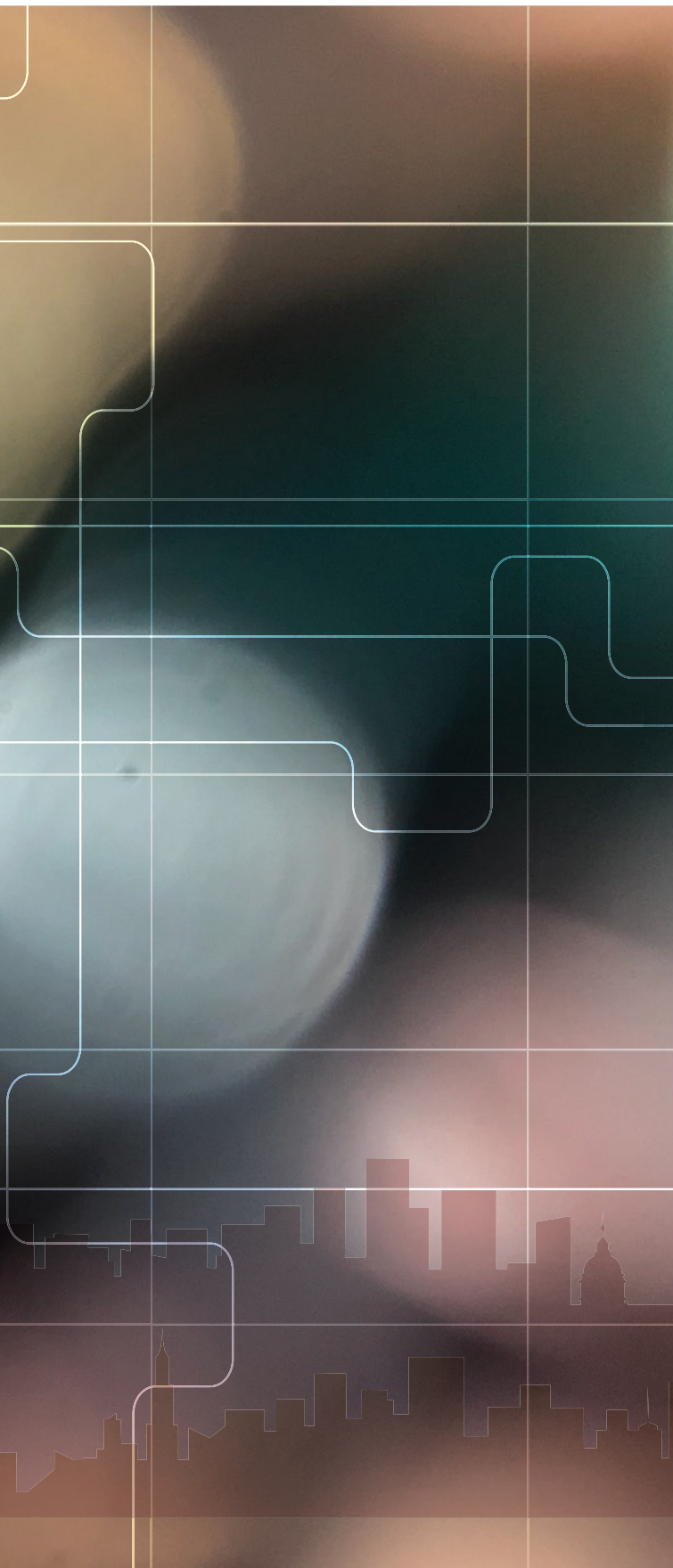
**Permeabilidad al aire
de edificios en Uruguay.**

**Catalizadores para
producción de gas natural.**

**Residuos eléctricos
y electrónicos.**

**Cadena productiva de la
energía y emisión de GEI,
Argentina.**

**Hacia la justicia energética
en México.**



COMITÉ EDITORIAL

Alfonso Blanco. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Ecuador.*

Pablo Garcés. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Ecuador.*

Marcelo Vega. *Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM). Uruguay.*

COMITÉ AD-HONOREM

Andrés Romero C.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Leonardo Beltrán.
Institute of the Americas. México.

Manlio Coviello.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Mauricio Medinaceli.
Investigador independiente. Bolivia.

Ubiratan Francisco Castellano.
Investigador independiente. Brasil.

COORDINADORES DE LA EDICIÓN

DIRECTOR GENERAL
Alfonso Blanco

DIRECTORES EJECUTIVOS
Pablo Garcés
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN
Blanca Guanocunga. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).*

COLABORADORES

Raquel Atiaja. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).*

Ana María Arroyo. *Diseño y diagramación.*

REVISORES

Aldo Delgado Acevedo.

Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Perú.

Alvar Carranza.

Universidad de la República (UdelaR).

Centro Universitario Regional del Este, CURE, Sede Maldonado.

Departamento de Ecología y Gestión Ambiental. Uruguay.

Augusto Manuel Durán.

Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Perú.

Claudia Alejandra Pilar.

Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Argentina.

Daniela Flores Ramírez.

Investigadora independiente. México.

Guillermo Garrido.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Argentina.

Gustavo Figueredo.

Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) Argentina.

Henry Milton Espada Romero.

Universidad Pública de El Alto. Bolivia.

José Ricardo Sánchez Martínez.

Investigador independiente. México.

Luis Felipe Gómez Fernández.

Ministerio de Energía y Minas. Perú.

Manuel Enrique Chacón Morales.

Empresa Propietaria de la Red S. A. Costa Rica.

Marco Antonio Flores Barahona.

Universidad Nacional Autónoma de Honduras.

Instituto de Investigación en Energía. Honduras.

Marco Daniel Silva Ramos.

Escuela Politécnica Nacional (EPN). Ecuador.

Maxime Le Bail.

Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente. México.

Pedro Andrés Galione Klot. *Universidad de la República*

(UdelaR). Facultad de Ingeniería. Instituto de Ingeniería

Mecánica y Producción Industrial. Uruguay.

Rafael Bernardi.

Universidad de la República (UdelaR). Uruguay.

Rodrigo Alonso Suárez. *Universidad de la República (UdelaR).*

Facultad de Ingeniería. Uruguay.

Rolando Madriz-Vargas. *Universidad Nacional. Laboratorio*

Energía Solar. Departamento de Física. Costa Rica.

© Copyright Organización Latinoamericana de Energía
(OLADE) 2020. Todos los derechos reservados.

ISSN: 2602-8042 (Impresa)

ISSN: 2631-2522 (Electrónica)

Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y

Fernández Salvador.

Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: <http://enerlac.olade.org>

Página web OLADE: www.olade.org

Mail ENERLAC: enerlac@olade.org

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995

Diseño de la portada y contraportada Ana María Arroyo.

NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no comprometen a las organizaciones mencionadas.



ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA CENTRAL SOLAR FOTOVOLTAICA DE 50 kW CONECTADA A LA RED, EN EL CAMPUS UNIVERSITARIO DE COTA COTA, UBICADA EN LA CIUDAD DE LA PAZ, BOLIVIA

EFFICIENCY ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF ELECTRICITY IN THE PHOTOVOLTAIC SOLAR CENTRAL OF 50 kW, IN THE UNIVERSITY CAMPUS OF COTA COTA, LOCATED IN LA PAZ, BOLIVIA

Álvaro Montano Saavedra¹, María Belén Arequipa Saravia², Cristian Limachi Ochoa³

Recibido: 30/05/2020 y Aceptado: 09/09/2020

ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (28 - 38)

ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Thomas Despeyroux de Unsplash.

1 Universidad Federal de Pará (UFPA). Brasil
alvaromontano2009@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-3642-7570>

2 Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia.
mabelenmb.mbas@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-7283-1928>

3 Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Ingeniería.
Bolivia. ecotecelm@yahoo.com
<http://orcid.org/0000-0003-4769-1980>

RESUMEN

El artículo tiene como objetivo realizar un análisis de energía eléctrica en la Central Solar Fotovoltaica (CSFV) de 50 kW, emplazada en el Campus Universitario de Cota Cota, que fue construida por donación de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) canalizada a través del Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas (VMEEA), y actualmente se encuentra a cargo del Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Mayor de San Andrés. La Central comenzó a operar a inicios de 2018 y almacena información periódica de irradiación y temperatura ambiente, la energía generada en la CSFV y la inyectada a la red de la empresa distribuidora de energía eléctrica en La Paz (DELAPAZ). La Central fue diseñada bajo el concepto de generación distribuida, es decir, toda la energía generada es inyectada a la red. Se considera que por su ubicación, la eficiencia de los paneles fotovoltaicos debe ser mayor al estipulado en condiciones estándar; en ese sentido, el resultado del análisis realizado a los datos recopilados, muestra que la eficiencia de los paneles fotovoltaicos se encuentra alrededor del 17%, y que se deben considerar otros aspectos que inciden en este valor: limpieza y mantenimiento de los paneles fotovoltaicos, efecto sombra, etc.

Palabras clave: Central Solar Fotovoltaica, Generación de Energía, Eficiencia Energética, Paneles Fotovoltaicos, Irradiación, Bolivia.



ABSTRACT

The article has as objective to perform the analysis of electrical energy on the 50 kW Photovoltaic Solar Central located in Cota Cota's University Campus, which was built thanks to a donation from Japan International Cooperation Agency (JICA), that is now under the charge of Universidad Mayor de San Andrés' Electric Engineering Investigation Institute. This Central began to operate in early 2018, and till the date has stored periodic information regarding radiation and temperature on photovoltaic panels, generated energy of the Photovoltaic Solar Central and injected in the electric distributor company's grid circuit of La Paz (DELAPAZ). The Central was designed under the concept of distributed generation, which means that all the generated energy is injected to the grid. It is considered that due to its geographical location, the photovoltaic panels' efficiency should be greater than stipulated on standard conditions; however, the results of the analysis made to collected data, shows that photovoltaic panels' efficiency is around 17%, and it must be considered other factors affecting efficiency: cleanliness and maintenance of photovoltaic panels, shadow effect, etc.

Keywords: Photovoltaic Solar Central, Energy Generation, Energy Efficiency, Photovoltaic Panels, Irradiation, Bolivia.

Bolivia es un país con grandes posibilidades de implementación de sistemas de generación con energías alternativas y renovables, sin embargo, el concepto de generación distribuida todavía no fue colocado en práctica, debido a varios factores.

INTRODUCCIÓN

Bolivia es un país que cuenta con grandes posibilidades de implementación de sistemas de generación con energías alternativas y renovables, y que ha tenido gran relevancia en los últimos años con la construcción de pequeñas centrales fotovoltaicas, parques eólicos y pequeñas centrales hidroeléctricas conectadas al Sistema Interconectado Nacional. Sin embargo, el concepto de generación distribuida todavía no fue colocado en práctica, debido a varios factores, como ser: normativos, regulatorios, técnicos, culturales y otros.

En ese sentido, la energía solar fotovoltaica se presenta como una opción para iniciar el desarrollo del concepto de generación distribuida; entonces, el realizar investigaciones específicas acerca del desempeño de Sistemas Solares Fotovoltaicos conectados a la Red de Energía Eléctrica de la empresa distribuidora en la ciudad de La Paz (que por sus características topográficas y climáticas cuenta con aspectos especiales que deben ser tomados en cuenta) permitirá conocer información relevante acerca de: la radiación solar en la zona, la eficiencia de los paneles fotovoltaicos en la altura, el rendimiento del conjunto de todo el sistema fotovoltaico, además de otros aspectos importantes; así mismo, posibilitará estimar la cantidad de energía eléctrica que se podrá generar en ciertos períodos de tiempo y realizar la difusión y transferencia de conocimientos de éste tipo de sistemas, entre los alumnos y docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés.

Al respecto, se debe mencionar que actualmente se cuenta con escasa bibliografía relacionada con estudios realizados al desempeño de sistemas fotovoltaicos en localidades situadas a alturas mayores a 3,000 m.s.n.m.; por otra parte, en Bolivia se cuenta con un mapa solar, el cual promedia extensas regiones de 1° de latitud por 1° de longitud en base a imágenes satelitales de la NASA y un método de interpolación, para

estimar la radiación recibida en función de los meses del año. La exactitud de este mapa no ha sido verificada por un periodo a largo plazo. Al respecto, se estima que en general, la exactitud de datos de satélites es muy variable y en muchos casos supera el 10% (Salcedo et al., 2015). Entonces, una red de medición de radiación solar en Bolivia, podría dar datos más precisos para el diseño de sistemas fotovoltaicos, además de posibilitar que se realice el ajuste al mapa de radiación solar boliviano existente.

En relación a las CFVs en operación en otros países, según (García et al., 2014), las compañías de monitorización están desarrollando métodos de análisis de datos para procesarlos en tiempo real para sus sistemas específicos y medidas de rendimiento; sin embargo, una comprobación de las lecturas de las medidas utilizadas comúnmente por las empresas constató que varios métodos analíticos se utilizan para calcular la misma medida o están utilizando un método analítico con resultados variados debido al entorno del sistema. En consecuencia, estos dos casos son problemáticos porque se obtienen conclusiones incorrectas.

En ese sentido, el objetivo del presente trabajo es realizar un análisis de la producción de energía eléctrica de la Central Solar Fotovoltaica (CSFV) de 50 kW, emplazada en el Campus Universitario de Cota Cota, determinando la eficiencia de los paneles fotovoltaicos a través de los datos reales recolectados de irradiación y temperatura ambiente, que fueron recopilados y almacenados por los instrumentos y el sistema de adquisición de datos con la que cuenta la Central. En relación a la temperatura de operación del panel, ésta obedece a una relación lineal que depende de la temperatura ambiente, de la irradiación solar sobre el plano del panel y del parámetro “k” que varía según la tipología del panel y la velocidad del viento (Romero et al., 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

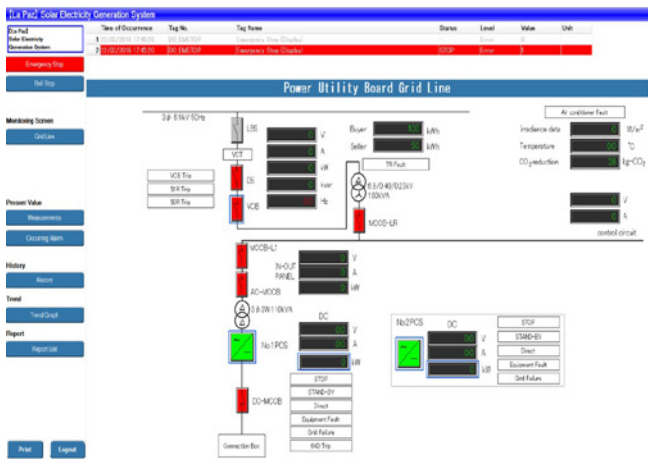
La Central Solar Fotovoltaica (CSFV) del Campus Universitario de Cota Cota fue inaugurado en el mes de marzo de la gestión 2019 (Fotografía 1) y fue ejecutado gracias a una donación de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional del Japón (JICA). Tiene una capacidad instalada de 50 kW (192 paneles FV) y cuenta con equipos de medición de radiación solar, temperatura ambiente y parámetros eléctricos de la Central.

En ese sentido, se realizó la recopilación y sistematización de los datos de la Central, referentes a: la irradiación solar que reciben los paneles fotovoltaicos, la temperatura ambiente a la que se encuentran los mismos y la energía generada por el sistema. Estos datos permitieron determinar la eficiencia real de los paneles fotovoltaicos emplazados a 3,492 m.s.n.m. aproximadamente, y analizar posibles factores que afectan su desempeño.

Fotografía 1. Central Solar Fotovoltaica emplazada en el Campus Universitario de Cota Cota, Facultad de Ingeniería UMSA



Fotografía 2. Sistema de adquisición de datos de la Central Solar Fotovoltaica



Fotografía 3. Panel de información de parámetros de la Central Solar Fotovoltaica

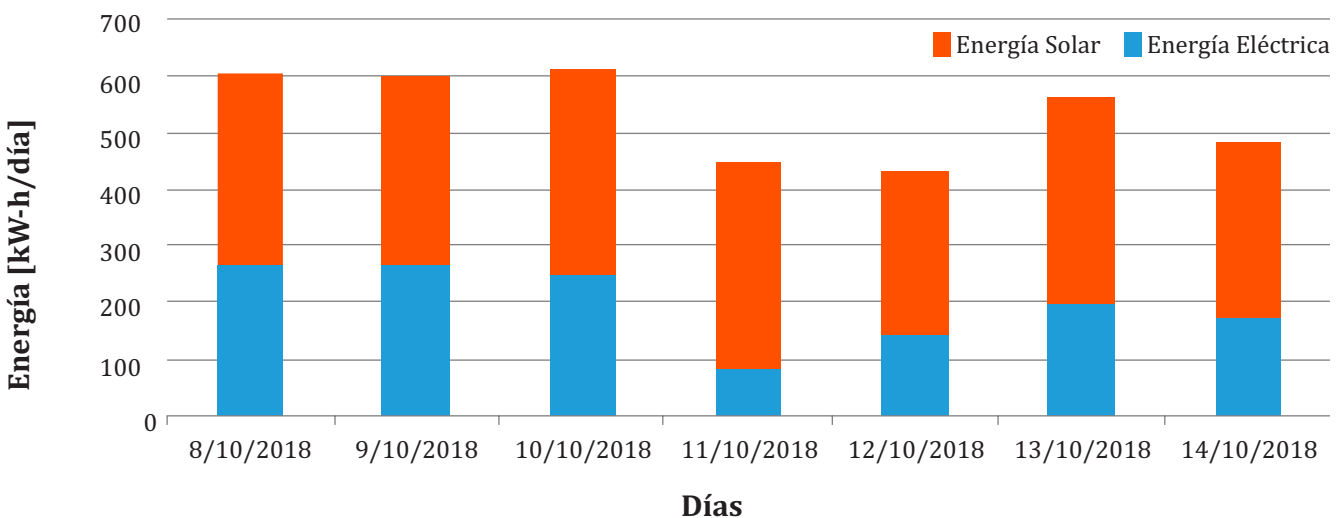


RESULTADOS

Para el análisis del desempeño de la CSFV y la determinación de la eficiencia de los PFVs, se recopiló información desde el momento de entrada en operación de la Central (marzo de 2018) hasta el mes de mayo del 2019; debido a la gran cantidad de información disponible, en primera instancia se identificaron los períodos de tiempo en los cuales se disponía de la totalidad de información

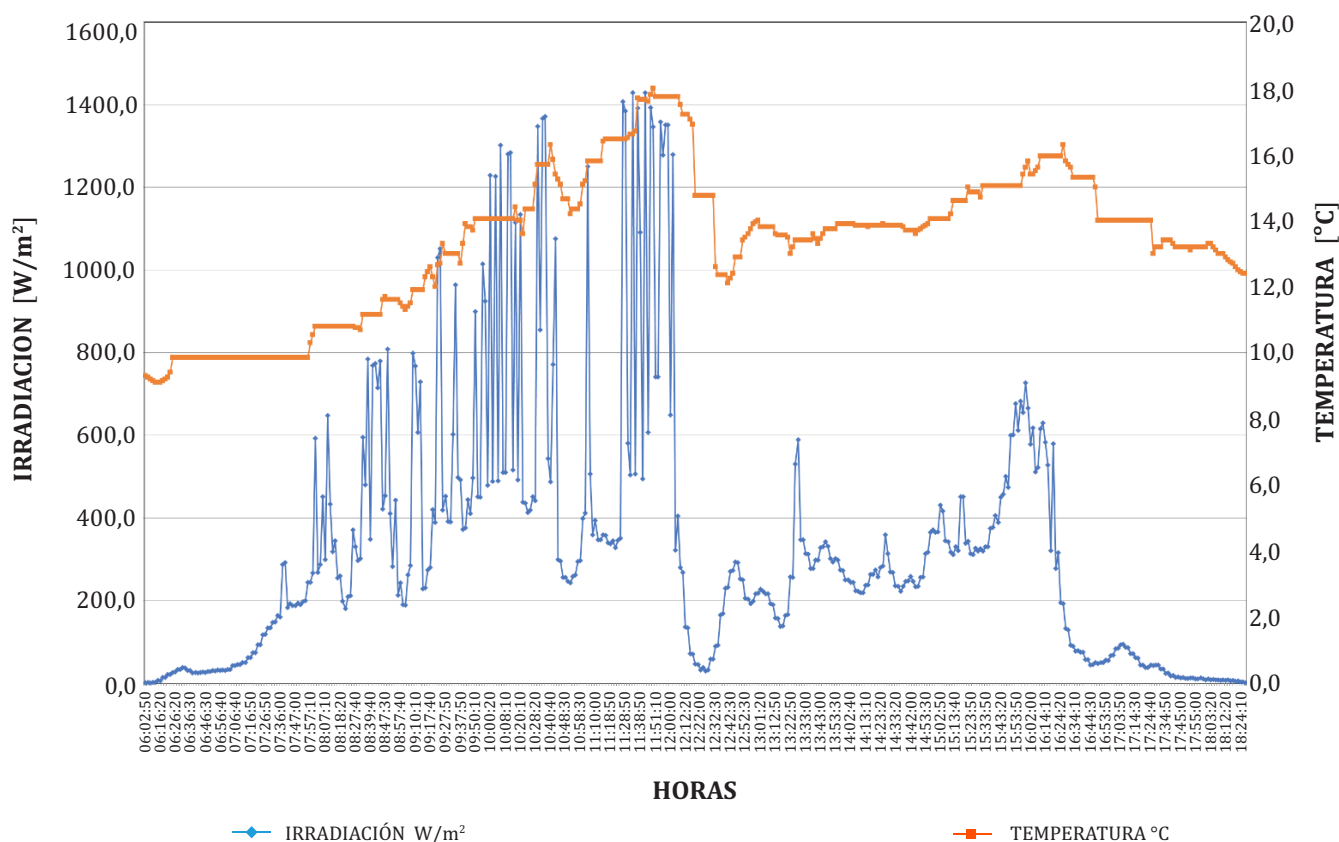
acerca de las variables: irradiación, temperatura y energía eléctrica generada. En la Figura 1 se puede observar la relación existente entre la energía solar y la energía eléctrica producida en la CFV, durante una semana del mes de octubre de la gestión 2018. La Figura 2 presenta la información recopilada que consta de más de 400 datos, correspondientes al día 12 de octubre.

Figura 1. Energía Solar recibida y Energía Eléctrica producida en la CFV evaluadas en la semana del 8 al 12 de octubre de la gestión 2018



Fuente: Elaboración propia con información del Sistema de adquisición de datos de la Central Fotovoltaica (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

Figura 2. Irradiancia y temperatura ambiente (12/10/18)



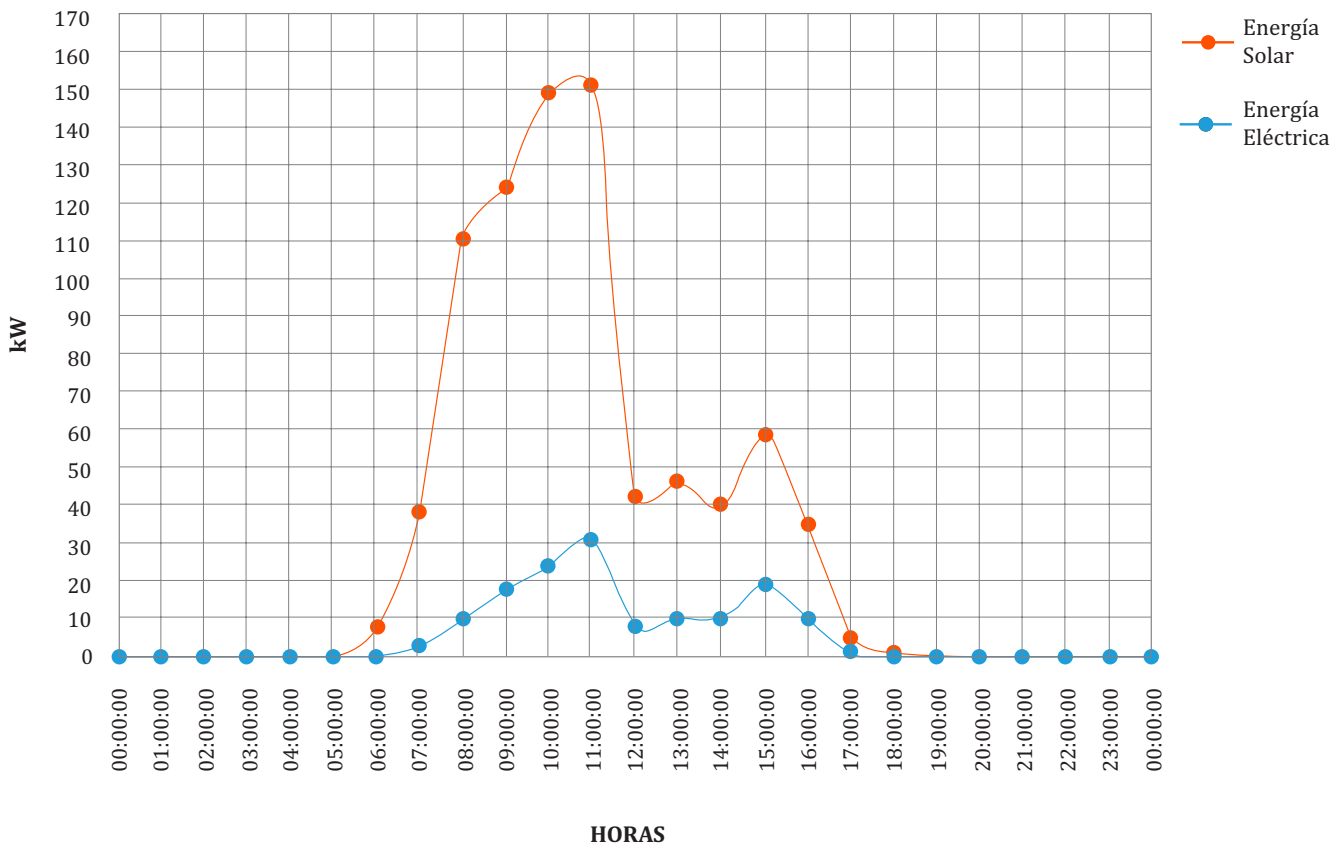
Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación y la temperatura ambiente (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

Como se puede observar, la irradiación presente en la CSFV y aprovechable para su conversión a energía eléctrica, es variable dependiendo de la hora del día, influenciado también por aspectos climatológicos, como la presencia de nubes y precipitaciones pluviales, lo que repercute en la cantidad de potencia firme que puede ser entregado por el sistema. En la Figura 3, se muestra la energía solar recibida por la Central Solar Fotovoltaica y la generación de energía eléctrica, para el mismo periodo de tiempo estudiado.

Es importante mencionar que los valores máximos de irradiación presentes en el lugar de emplazamiento de la CSFV, son superiores a las 1,400 [W/m²], lo que incide directamente en la cantidad de energía disponible y aprovechable.

La irradiación presente en la CSFV y aprovechable para su conversión a energía eléctrica, es variable dependiendo de la hora del día, influenciado también por aspectos climatológicos.

Figura 3. Energía solar recibida y energía eléctrica generada de la CSFV (12/10/18)



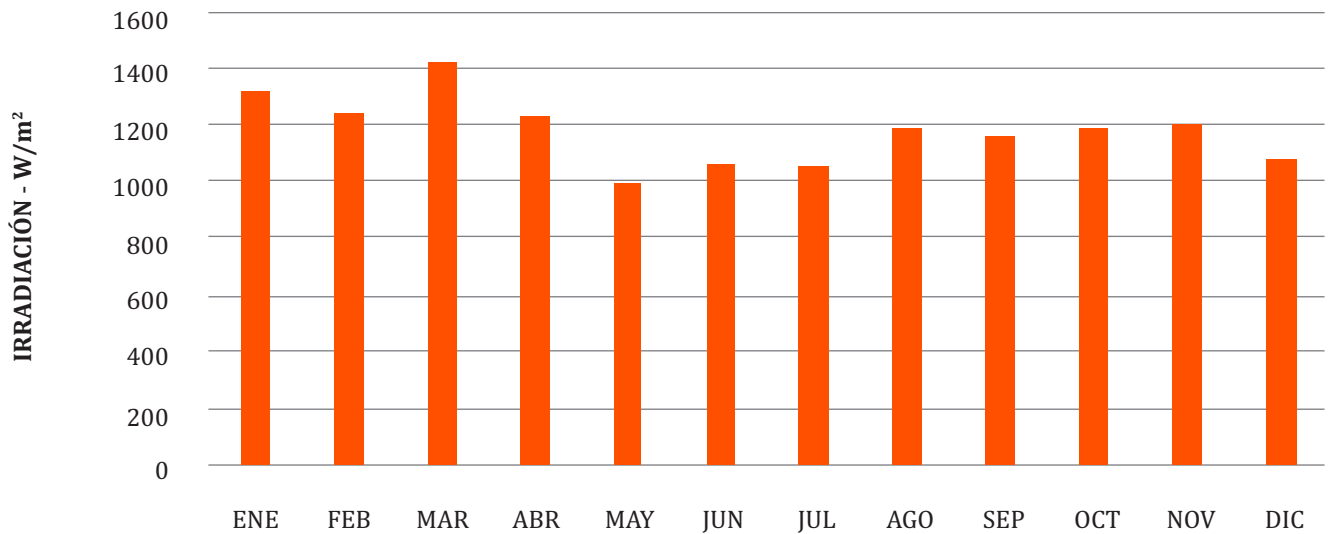
Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de energía solar recibida y energía eléctrica generada (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

Luego de realizado el análisis de la información disponible en el período de tiempo especificado, con relación a la energía solar recibida (empleando datos de irradiación captados por el sistema de la CSFV, además del área total de los PFVs) y a la energía eléctrica generada (información recolectada por el sistema de la CSFV, a la salida de los PFVs), se determinó que la eficiencia promedio de los módulos de la CSFV está próxima al 17% (en promedio del período en estudio), lo cual representa un valor aceptable comparada con la información dada por el fabricante de los paneles fotovoltaicos y a las experiencias en otros países disponible en la bibliografía, para el desempeño de CSFV conectadas a la red. Al respecto, según (Varo y Menéndez, 2017),

el sistema fotovoltaico conectado a la red, instalado en el techo del edificio de la Escuela Profesional de Física de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa – Perú, ubicado en latitud 16.2°S, longitud 71.3°O, y elevación 2,374 m.s.n.m., presenta una eficiencia media de los paneles fotovoltaicos de 13.63%.

La cantidad de irradiación solar media mensual, con datos medidos en la CSFV del Campus Universitario de Cota Cota, se muestra en la Figura 4; en el mismo se puede observar que los valores máximos de irradiación, del orden de 1,400 [W/m²], se producen en el verano y disminuyen a valores del orden de 1,000 [W/m²] en los meses de invierno.

Figura 4. Irradiación solar en el Campus de Cota Cota. 16 ° 32' 17''S, 68 ° 03' 44'' O 3,492 m.s.n.m.



Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

Los valores de irradiación y temperatura ambiente, alcanzados en un día de verano y otro en invierno son mostrados en las Figuras 5 y 6; en las mismas se puede observar que si bien la irradiancia y la temperatura son mayores en

verano, la diferencia de estos valores en la época de invierno no es muy grande, como ocurre en otras regiones y países que se encuentran a una latitud sur mayor a la ubicación de la ciudad de La Paz.

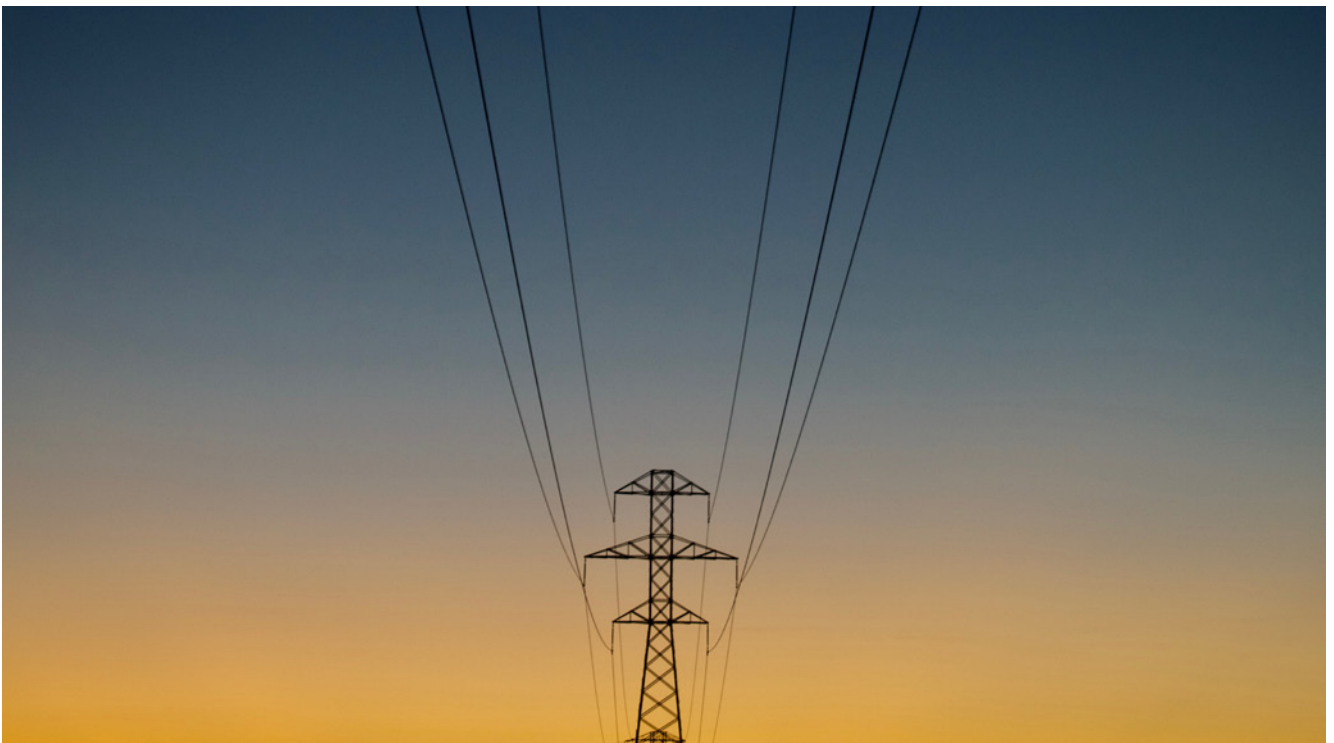
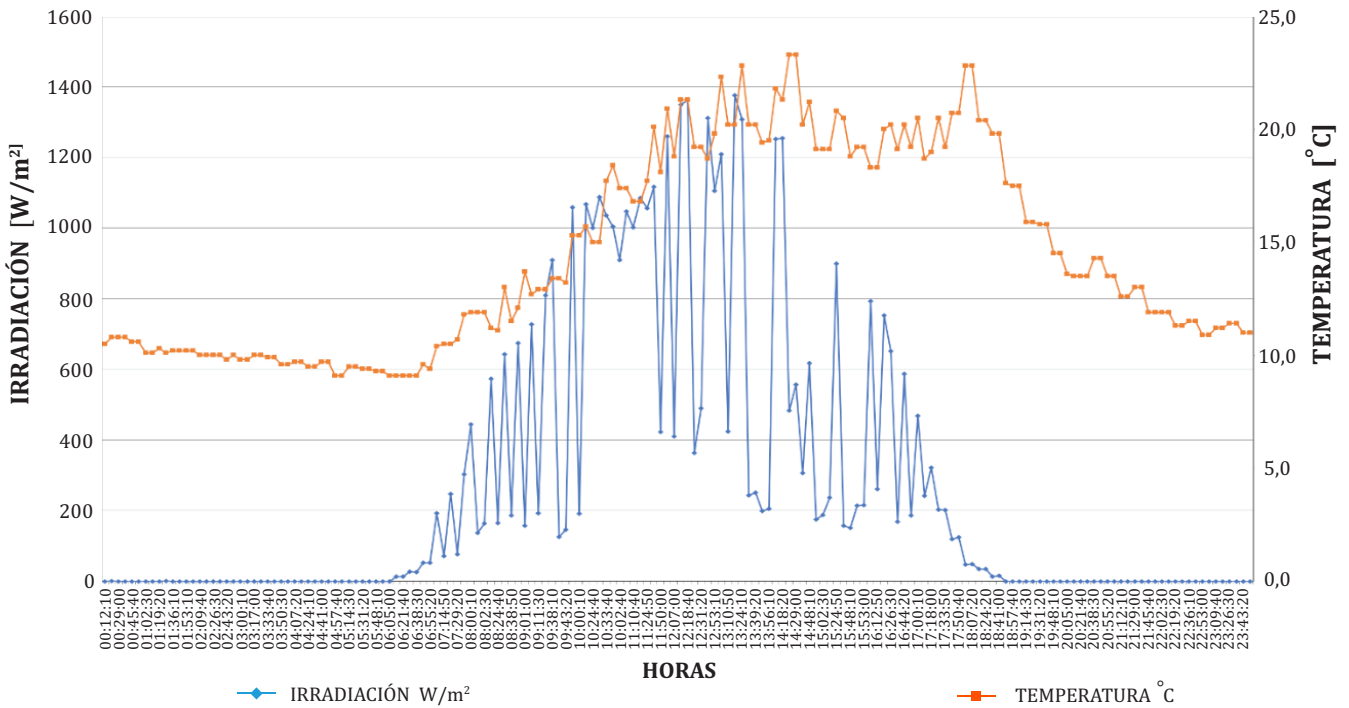


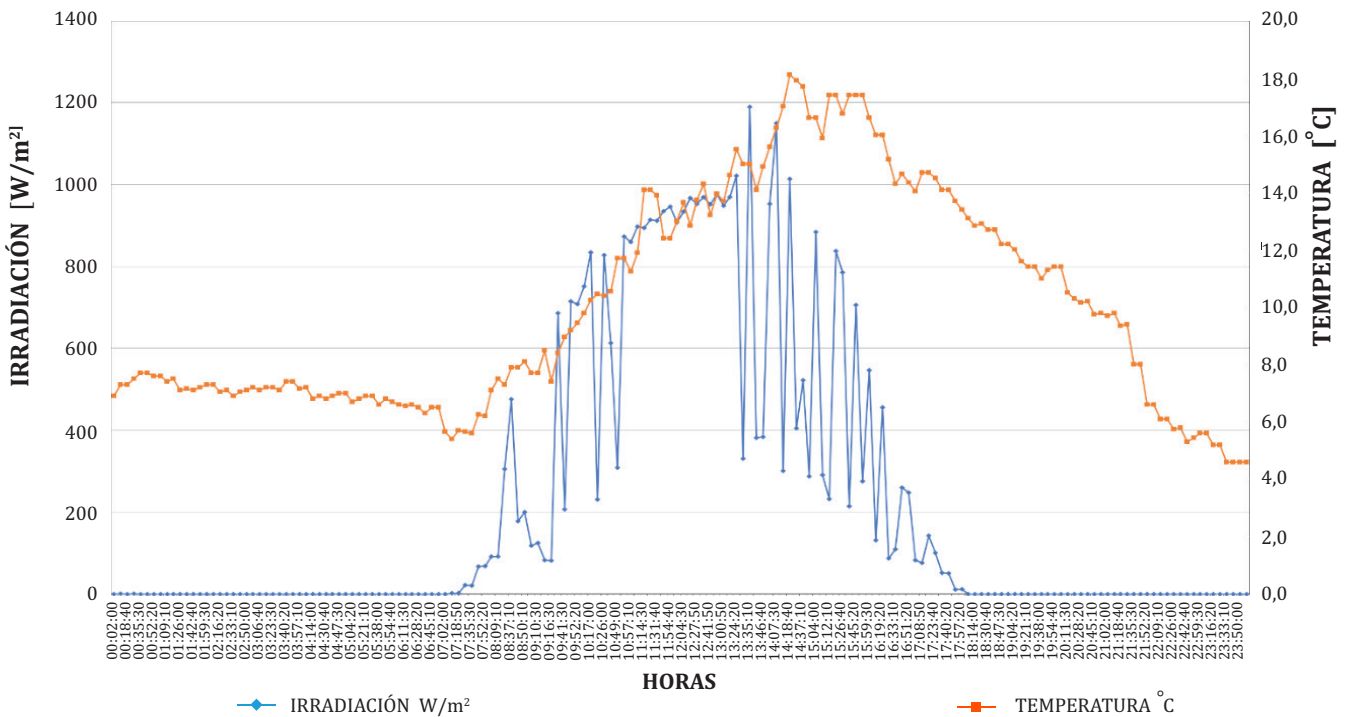
Foto de Max Lederer de Unsplash.

Figura 5. Irradiación y Temperatura en la CFV, Verano



Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación y temperatura en verano (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

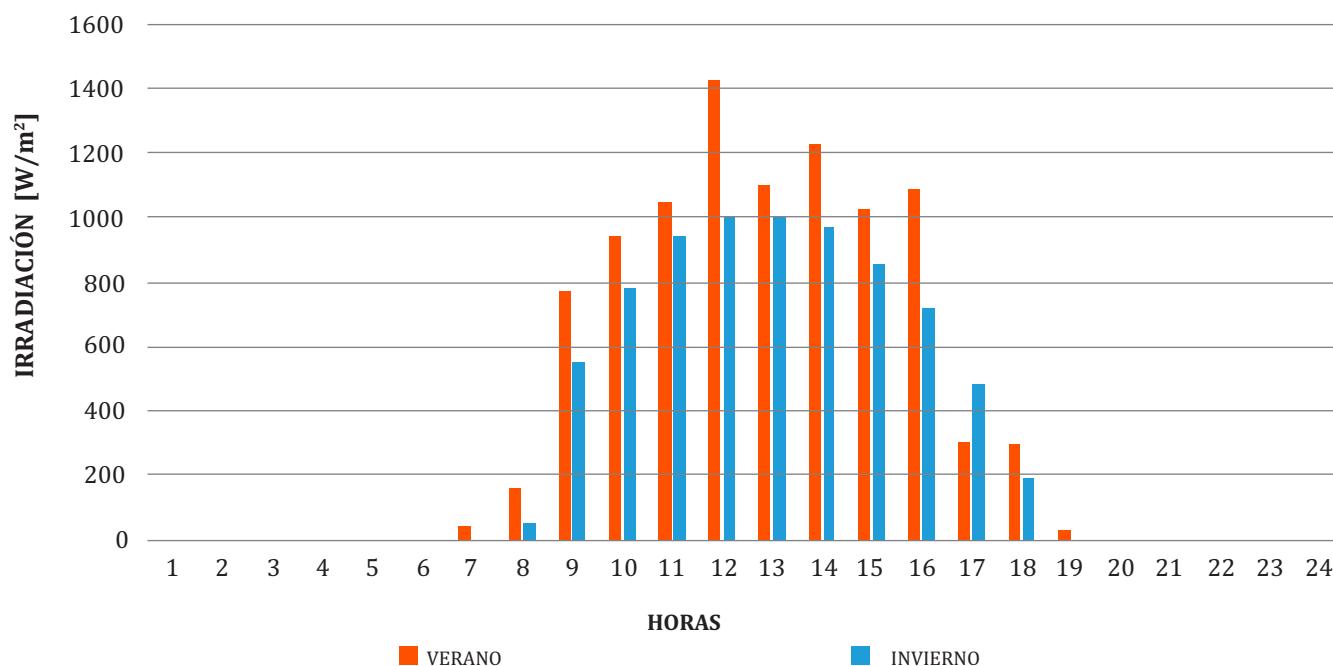
Figura 6. Irradiación y Temperatura en la CFV, Invierno



Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación y temperatura en invierno (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

La irradiación solar horaria en el campus de Cota Cota, correspondiente a los solsticios de verano e invierno, se muestra en la Figura 7; en la misma, la diferencia entre la cantidad de energía para las distintas épocas del año se aprecia claramente.

Figura 7. Irradiación solar en la CFV del campus de Cota Cota, solsticio de verano y solsticio de invierno



Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación en Verano e invierno (Campus Universitario de Cota Cota, 2018)

DISCUSIÓN

Los resultados encontrados luego de la recopilación de datos y análisis realizados, muestran que el desempeño de la Central Solar Fotovoltaica es aceptable, llegando a obtener una eficiencia de los PFVs cercana al 17% para el periodo analizado. Se debe tomar en cuenta que la CSFV opera en condiciones muy diferentes a las estipuladas en las denominadas condiciones estándar y que, para poder determinar criterios de evaluación más certeros, de deben analizar la mayor cantidad de datos posible, en mayores períodos de tiempo (semestrales, anuales).

También se deben tomar en cuenta que existen otros factores externos que influyen en el desempeño de la CSFV, como el estado de limpieza de los paneles y el efecto sombra que puede ser producido por los árboles presentes en la zona.

CONCLUSIONES

El valor de la eficiencia encontrado en relación a la energía solar recibida por los paneles fotovoltaicos y la energía eléctrica generada por

los mismos, para el período de tiempo analizado, es cercano al 17%, lo cual muestra un desempeño aceptable de la Central Solar Fotovoltaica, en relación a los datos proporcionados por el fabricante y a estudios realizados en Centrales de similares características conectadas a la red. Sin embargo, es necesario realizar un estudio más profundo analizando toda la información disponible desde la puesta en operación de la CSFV, tomando en cuenta periodos de tiempo más amplios que posibiliten la determinación de modelos matemáticos que puedan ser usados para el pronóstico de la generación de energía eléctrica en situaciones típicas, así como la comprensión de la dinámica del comportamiento de la Central.

El continuo almacenamiento de datos de la CSFV (irradiación, temperatura, parámetros eléctricos) desde la puesta en funcionamiento de la misma (marzo 2018), constituye una información valiosa que posibilitará el desarrollo de diversos trabajos de investigación, con el fin, entre otros, de poder brindar datos más precisos que puedan ser empleados para el diseño de sistemas fotovoltaicos en localidades de topografía y condiciones similares a las del Campus Universitario de Cota Cota, además de posibilitar que se realice un ajuste al mapa de radiación solar boliviano existente.

...

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Internacional de Cooperación del Japón (JICA) por el financiamiento de la construcción de la CSFV y al Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Mayor de San Andrés, por facilitar el uso de equipos y recolección de información para la realización de la presente investigación.

REFERENCIAS

- García, L., Vilariño, J., Arenas, C., Núñez, G. y Menéndez, H. (2014). *Rendimiento Global de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica*. Madrid. Universidad Alfonso X El Sabio.
- Romero, F., Urquidi, O., Ormachea, O., Abrahamse, A., Pearce, J., Andrews, R. y Vuono, M. (2011). Desarrollo de un sistema de monitoreo de radiación solar basado en un espectrómetro de amplio espectro. *Investigación & Desarrollo*, 1(11), 73 – 84.
- Salcedo, T., Montoya, A., Palo, E. y Morante, F. (2015). *Evaluación del Desempeño de un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red de 3.3 kW en la Ciudad de Arequipa*. Arequipa. XXII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente.
- Varo, D. y Menéndez, H. (2017). *Análisis del Rendimiento de un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red de 10 MW, Excluyendo el Efecto de la Temperatura*. Madrid. Universidad Alfonso X El Sabio.

ISSN 2602-8042 [Impresa]

ISSN 2631-2522 [Electrónica]

enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe

 **olade** | ORGANIZACIÓN
LATINOAMERICANA
DE ENERGÍA



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO

Av. Mariscal Antonio José de Sucre
N58-63 y Fernandez Salvador
Quito - Ecuador

Tel. (+593 2) 2598-122 / 2598-280
/ 2597-995

enerlac@olade.org

