



Evaluation and seasonal characterization of a
SFcR-3.0kW. with string inverter, monitored in
real time, in the Andes of Puno-Peru

Reynaldo Condori Yucra, José Manuel Ramos Cutipa,
Pedro Yulian Puma Roque, Norman Jesús Beltrán Castañón,
Henry Pizarro Viveros and Wilson Negrao Macedo

EasyChair preprints are intended for rapid
dissemination of research results and are
integrated with the rest of EasyChair.

July 27, 2021

Evaluación y caracterización estacional de un SFcR-3.0kW. con inversor string, monitoreado en tiempo real, en los andes de Puno-Perú

Reynaldo Condori Yucra¹, José Manuel Ramos Cutipa³, Pedro Yulian Puma Roque², Norman Jesús Beltrán Castañón², Henry Pizarro Viveros², Wilson Negroao Macedo⁴

¹Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Posgrado en Ciencias Ambientales y Energías Renovables, Arequipa, Perú
reynaldo_yufra@hotmail.com,

²Universidad Nacional de Juliaca, E.P. de Ingeniería en Energías Renovables, Puno, Perú, nbeltran@unaj.edu.pe,
h.pizarrov@unaj.edu.pe

³Universidad Nacional del Altiplano, E.P. de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Puno, Perú, jramos@unap.edu.pe,
pedroypr@gmail.com

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

RESUMEN

Esta investigación presenta una clasificación estacional de los parámetros operacionales de un sistema real de conexión a la red de potencia nominal 3.0 kWp, instalado a 3828 msnm, en el laboratorio de energías renovables (EPIER-UNAJ) - Puno, que tiene como objetivo el HSP, el indicadores de eficiencia, para visualizar la influencia de las pérdidas en el rendimiento del SFcR con inversor string. Para lograr este objetivo, los datos obtenidos de marzo de 2019 a febrero de 2020 se procesan mediante el enfoque de IEC 61724, para luego realizar una clasificación por temporadas del año. Asimismo, se realiza una comparación con datos de referencia del fabricante. Con los resultados obtenidos, se valida el enfoque propuesto para demostrar que el SFcR con inversor string ha sido supervisado con éxito. El HSP máximo se presentó en primavera con 6.4kWh /m² y un valor promedio anual de 6.0kWh /m², el PR máximo es 81.85% en el equinoccio de primavera lo que indica que el sistema funciona bien. Hay pérdidas de salida neta media del 18,86%, La Lc representa las pérdidas por funcionamiento del array, las pérdidas en el inversor string ascienden al 12% en promedio, y por inclinación y orientación están por debajo del 10%, el CF es 20,26%, lo que demuestra el gran potencial de la radiación solar para el aprovechamiento de la generación solar fotovoltaica.

Palabras clave: Energía solar, índice de irradiación, Rendimiento energético, Pérdidas de captura, Factor de capacidad.

I. INTRODUCCIÓN

En la propuesta en la que vivimos es importante un conocimiento pleno de qué son las energías sostenibles, para que cada usuario se empodere y pueda promover de manera sostenible, independientemente de su posición e influencia en la sociedad, promover la micro y mini-generación distribuida. Con la tecnología solar fotovoltaica en el marco del desarrollo sostenible, es un hecho la necesidad de incrementar la independencia energética y garantizar el suministro a través de esta tecnología. Mejorar los indicadores de desempeño y reducir pérdidas del SFcR, el cual tiene asociado un sistema SCADA desarrollado en

el ambiente LabView, este sistema solo permite el monitoreo de la instalación, es decir, el registro en tiempo real de las variables del proceso, tales como voltaje, corriente continua (DC) y alterna (AC), pero no permite su supervisión, es decir, el procesamiento de esa información para detectar desviaciones que muevan el sistema desde un estado operativo aceptable [1].

Por otro lado, la potencia CC producida se ve alterada por unidades de acondicionamiento de potencia que constan de un seguidor MPP y un convertidor CC/CA. [4]. Actualmente, uno de los objetivos es mejorar el rendimiento del SFcR instalado, aumentando la producción de energía eléctrica, reduciendo pérdidas, logrando confiabilidad en los sistemas y cumpliendo con las medidas de seguridad necesarias. [3]. Así como los parámetros característicos de los módulos fotovoltaicos, generalmente proporcionados por el fabricante, nunca son los mismos en condiciones reales de funcionamiento. [4]. Sin embargo, esta tecnología se ve afectada por la intermitencia del flujo solar que recibe la tierra, reflejada en el ciclo día-noche, la variación de la intensidad solar por estaciones del año y ubicación geográfica, sombras, temperatura y acumulación de suciedad en la superficie. del SFcR [2]. Cuantificar las pérdidas operacionales del SFcR, lo que permite tener un conocimiento preciso de su estado de degradación, permitiendo realizar acciones de mantenimiento para preservar el SFcR en condiciones nominales de operación. [1]. Por tanto, es necesario determinar las pérdidas del SFcR con inversor string para su evaluación y análisis de estas para mejorar los indicadores de rendimiento del sistema.

Sistema Fotovoltaico con Inversor String - SFcR 3.0kWp. -

En el 2015 se ganó un concurso de investigación docente de la E.P de Ingeniería en Energías Renovables-EPIER de la Universidad Nacional de Juliaca-UNAJ, de Puno-Perú y junto con ello un convenio de cooperación académica entre la Universidad de Jaén de España-UJA, así como el apoyo del CER-UNI Lima-Perú, denominada: "Diseño e implementación de un analizador con sistema SCADA para evaluación de parámetros operativos de un sistema fotovoltaico de 3.0kW conectado a la red para UNAJ"



Fig. 1. SFcR-3.0kW, compuesto por una cadena de 12 módulos fotovoltaicos modelo SW150P. Instalados en el laboratorio EPIER-UNAJ.

1.1. Unidad de acondicionamiento de potencia. -

El inversor string monofásico de 3000W. de potencia nominal se utiliza para transformar la corriente continua (CC) en corriente alterna (CA) y se inyecta directamente a la red.



Fig. 2. Inversor String Modelo StecaGrid 3010-3kW., Instalado en el laboratorio EPIER-UNAJ.

1.2. Unidad de control y adquisición de datos. -

Consta de: 1) Módulo Eos-Array, dividido en tres módulos: a) Módulo maestro y registrador de datos VMU-M, b) Unidad de medición de string VMU-S y c) Unidad de medición de temperatura de celda, de aire e irradiancia solar, VMU-P 2) Analizador de red que mide la energía activa y reactiva, 3) Convertidores de comunicación y 4) una computadora. Ver figura 3.



Fig. 3. Conjunto instrumental de control módulo Eos-Array y PC de adquisición de datos.

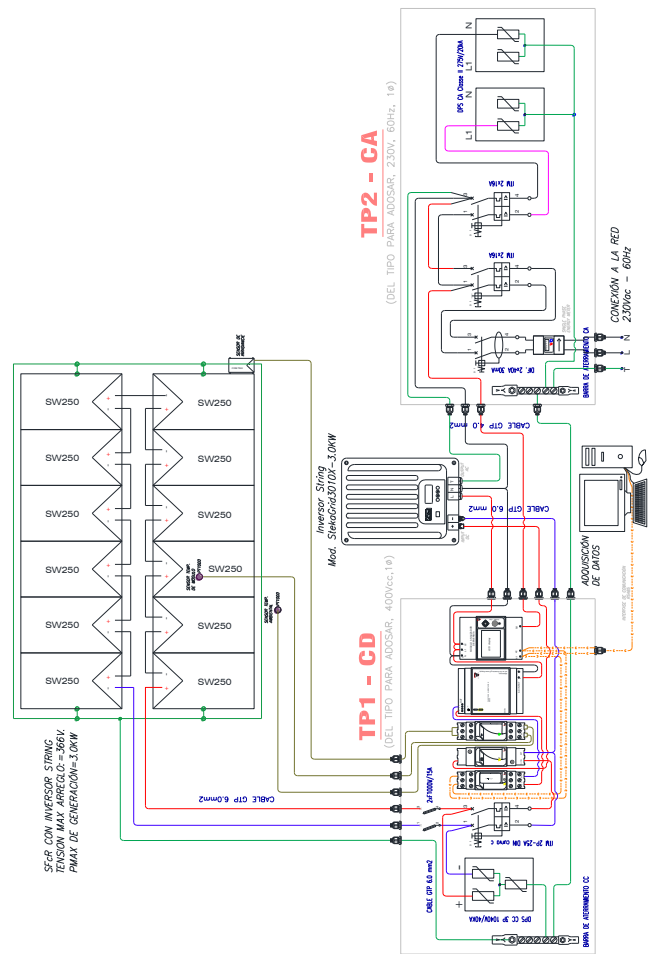


Fig. 4. Diagrama multifilar del SFcR -3.0kW. con inversor string.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Monitorización del sistema con inversor string SFcR 3.0kW.

Se monitorea con un conjunto instrumental de módulos denominado Eos-Array y es una solución compacta, simple y versátil para la gestión y control de sistemas fotovoltaicos, que, en este caso, consta de: unidad maestra y registrador de datos; controlador de cadena; unidad de variables ambientales, más un módulo analizador de energía, el sensor de irradiancia es una celda fotovoltaica calibrada, los sensores de temperatura del módulo y de temperatura ambiente son PT1000, ver figura 4.

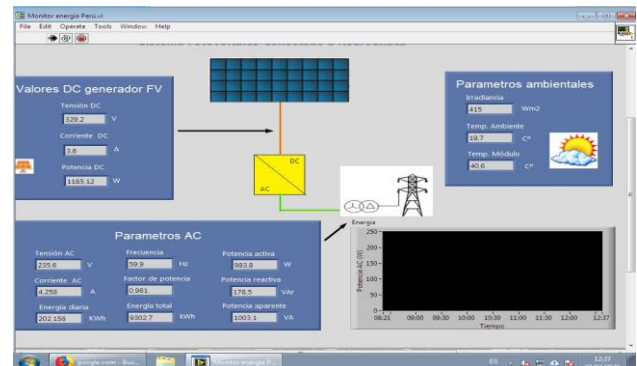


Fig. 5. Interfaz desarrollada en LabVIEW para la adquisición de datos en tiempo real.

La posición de los módulos fotovoltaicos con relación a la irradiación solar influye directamente sobre su producción de energía $\beta=15^\circ$ y es muy importante orientarlos bien para sacarles el máximo rendimiento [12].

La puesta en servicio se realizó en agosto de 2018, y luego de varias pruebas de ajuste de adquisición y registro de datos, se inicia en marzo de 2019 hasta febrero de 2020 bajo el enfoque de la norma IEC 61724, se monitorearon parámetros ambientales y eléctricos, desde las 6:00Hrs. hasta las 18:00Hrs., con una frecuencia de 15 segundos por 24 horas, registrando alrededor de 45000 datos por día, y en este proceso no se registraron la medición de pérdidas del SFcR.

TABLA 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO SELECCIONADO MODELO SW250POLY [10]

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia máxima (Pmax.)	250.0	Wp.
Tensión de circuito abierto (Voc)	37.60	V.
Tensión máxima de operación (Vpmp)	30.50	V.
Corriente de cortocircuito (Isc)	8.81	A.
Corriente máxima de operación (Ipmp)	8.27	A.
Eficiencia del módulo	14.91	%
Tolerancia de medición (Pmax)	+/- 2	%
Rango de operación	-40 a +85	°C
Numero de celdas por módulo	60	

TABLA 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL INVERSOR SELECCIONADO MODELO STEKAGRID3010X [11]

Parámetros (Generador FV)	Valor	Unidad
Datos de entrada CC		
Tensión máxima de entrada	600	V.
Tensión mínima de entrada	125	V.
Tensión en PMP para potencia nominal	270-500	V.
Maxima corriente de entrada	11.5	A.
Potencia máxima de entrada con la máxima potencia activa de salida	3070	W.
Potencia máxima recomendada FV	3800	W.
Datos de salida CA (Conexión a la red)		
Tensión nominal	230	V.
Máxima corriente de salida	14.0	A.
Potencia nominal	3000	W.
Frecuencia nominal	60	Hz.
Eficiencia máxima	98	%
Consumo de potencia durante la noche	< 2	%

B. Procesamiento de datos y control de calidad con IEC 61724

Los datos procesados de irradiancia y potencia de CC generada por energía fotovoltaica y cantidades de energía deben restringirse a las horas de luz de cada día (amanecer a atardecer, irradiancia $\geq 20 \text{ W/m}^2$) para evitar valores extraños de datos nocturnos que introduzcan errores en los análisis, a menos que se haya demostrado que tales errores son insignificantes. [11]

1. *Irradiación solar.*- También conocida como insolación, es la integral de tiempo de la irradiancia de cada cantidad de irradiancia H correspondiente a una cantidad de irradiancia G en un intervalo de tiempo τ .

$$H = \sum_k G_k \times \tau_k \quad (1)$$

Donde:

H: Irradiación [kW/m^2], G_k : Irradiancia [W/m^2], τ_k : Intervalo de tiempo [Hrs.]

2. *Energía eléctrica.*- Cantidad de energía que puede calcularse a partir de la integral de sus correspondientes parámetros de potencia, medidos durante el período de registro. [11].

2.1) Energía de salida DC:

$$E_A = \sum_k P_{A,k} \times \tau_k \quad (2)$$

Donde:

E_A : Energía CC [kWh], $P_{A,k}$: Potencia CC [kW], τ_k : Intervalo de tiempo [Hrs.]

2.2) Energía de salida CA.

$$E_{out} = \sum_k P_{out} \times \tau_k \quad (3)$$

Donde:

E_{out} : Energía CA [kWh], P_{out} : Potencia CA [kW], τ_k : Intervalo de tiempo [Hrs.]

3. *Rendimientos (Yields).*- Los rendimientos son proporciones de una cantidad de energía a la potencia nominal del arreglo P_0 . Indican el funcionamiento real del arreglo en relación con su capacidad nominal. [11].

3.1) Rendimiento energético del arreglo fotovoltaico (YA):

$$Y_A = \frac{E_A}{P_0} \quad (4)$$

Donde:

E_A : Energy out DC, P_0 : Power nominal of array FV

3.2) Final system yield (Y_f):

$$Y_f = \frac{E_{out}}{P_0} \quad (5)$$

Donde:

E_{out} : Salida de energía de todo el sistema fotovoltaico CA, P_0 : Potencia nominal del campo fotovoltaico instalado kWp CC.

3.3) Rendimiento de referencia (Y_r):

$$Y_r = \frac{H_i}{G_{i,ref}} \quad (6)$$

Donde:

H_i : Irradiación total (kWh/m^2), $G_{i,ref}$: Plano de referencia de la irradiancia del arreglo en el que se determina P_0 .

4. Pérdidas de rendimiento.-

4.1) *Pérdidas de captura del arreglo (Lc):* Representa las pérdidas debidas al funcionamiento del arreglo, incluidos los efectos de la temperatura del arreglo, la suciedad, etc. [11]

$$L_c = Y_r - Y_A \quad (7)$$

4.2) *Pérdidas de balance del sistema (LBOS).*- El balance del sistema representa las pérdidas en los componentes del BOS, incluido el inversor, todo el cableado y las cajas de conexiones. [11]

$$L_{BOS} = Y_A - Y_f \quad (8)$$

5. *Proporción de Rendimiento (PR).*- Es el cociente del rendimiento final del sistema Y_f con su rendimiento de referencia Y_r , indica el efecto general de las pérdidas en la salida del sistema debido tanto a la temperatura del arreglo como a las ineficiencias o fallas de los componentes del sistema. [11]

$$PR = \left[\frac{\sum_k \frac{P_{out,k} \times \tau_k}{P_0}}{\sum_k \frac{G_{i,k} \times \tau_k}{G_{i,ref}}} \right] \quad (9)$$

6. *Factor de capacidad.*- Es un método utilizado para presentar la energía suministrada por un sistema de generación de energía eléctrica. El CF es la relación entre la energía de corriente alterna entregada a la red en un año y la cantidad de energía que generaría el sistema fotovoltaico si hubiera operado a máxima potencia las 24 horas del día durante todo el año. [5]

$$CF = \frac{E_{AC}}{P_{FV} \times Hrs_{Año}} \quad (10)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. *Registro de datos de parámetros ambientales.*- Es importante determinar la trayectoria que describe su comportamiento en una ubicación geográfica específica en diferentes épocas del año (solsticios de verano, invierno y equinoccios de primavera y otoño) [2], el estudio arrojó los siguientes resultados:

TABLA 3. PROMEDIO DE PARÁMETROS AMBIENTALES POR ESTACIONES REGISTRADOS EN EL SFcR CON INVERSOR STRING DE 3,0kW.

Estaciones del año	Irradiación promedio anual [kWh/m ²]	Temperatura promedio de aire ambiente [°C]	Temperatura promedio de módulo FV [°C]
Verano	5.4	17.0	28.4
Otoño	5.8	15.3	28.1
Invierno	6.2	14.2	28.0
Primavera	6.4	18.0	31.2
Media	6.0	16.1	28.9

La Insolación promedio estacional es de 6.0kWh/m²/día, $G_{max} = 1245.42W/m^2$ registrado el día 04/09/19, a las 10:45-10:59Hrs., el $G_{min} = 979.58W/m^2$ registrado el día 29/06/19, a las 12:30 - 12:45Hrs, la $T_{máx_{cel}} = 60.65^{\circ}C$, registrado el día 12/11/19 y la $T_{mín_{cel}} = 49.31^{\circ}C$ registrado el día 28/06/19, $T_{máx_{amb}} = 35^{\circ}C$ registrado el día 20/12/19 y $T_{mín_{amb}} = -4.81^{\circ}C$ registrado el día 04/08/19.

De esta forma, en un día despejado se puede considerar que la irradiancia a la que está sometido el arreglo fotovoltaico, así como su temperatura son constantes [6].

Los índices de radiación estacional muestran que el equinoccio de primavera tiene una mayor incidencia de 6.4 [kWh/m²] y el mínimo es el solsticio de verano de 5.4 [kWh/m²].

B. *Comportamiento por estaciones de la irradiancia solar en [kWh/m²] desde marzo de 2019 hasta febrero de 2020.*

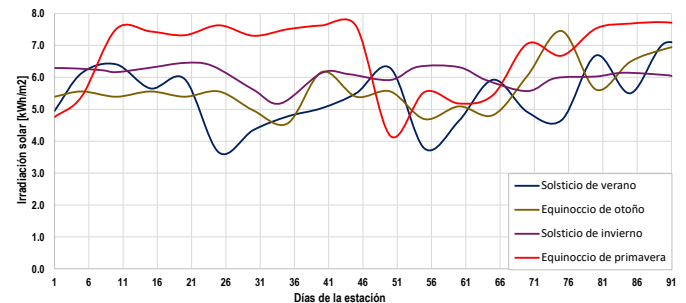


Fig. 6. Valores estacionales de irradiancia solar [kWh/m²-día]

TABLA 4. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS ESTACIONALES BAJO EL ENFOQUE DE LA IEC 61724

Parámetros Eléctricos	Solsticio de Verano	Equinoccio de Otoño	Unidad de Medida
Ya	311.65	492.86	$\left(\frac{kWh}{kW} - día\right)$
Yf	268.03	432.22	$\left(\frac{kWh}{kW} - día\right)$
Yr	333.19	533.82	$\left(\frac{kWh}{kW} - día\right)$
PR	80.43	81.00	%
Perd_{Cap}	36.61	40.96	(kWh)
Perd_{BOS}	74.16	60.63	(kWh)
EDC	1495.94	1478.57	((kWh)
EAC	1286.56	1296.67	(kWh)
Parámetros Eléctricos	Solsticio de Invierno	Equinoccio de Primavera	Unidad de Medida
Ya	527.18	538.81	$\left(\frac{kWh}{kW} - día\right)$
Yf	465.61	475.22	$\left(\frac{kWh}{kW} - día\right)$
Yr	473.13	580.59	$\left(\frac{kWh}{kW} - día\right)$
PR	81.28	81.85	%
Perd_{Cap}	45.95	41.78	(kWh)
Perd_{BOS}	61.57	63.59	(kWh)
EDC	1581.54	1616.43	((kWh)
EAC	1396.83	1425.67	(kWh)

Cuanto más cerca esté el valor del PR a la unidad, de un SFcR, mejor será su rendimiento, en comparación con otros sistemas en condiciones climáticas similares. Según el proyecto EU PERFORMANCE, un PR igual o superior al 80% indica que el sistema funciona bien. [7]

Es posible realizar la corrección de la energía diaria que debería entregarse, cuando no se encuentra bajo condiciones ideales, con una disminución del 0.5%/°C.[8]

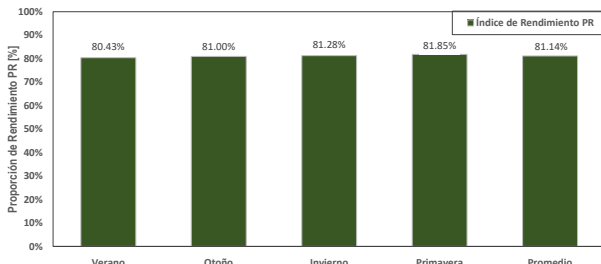


Fig. 7. Proportión por estaciones del rendimiento energético PR [%]

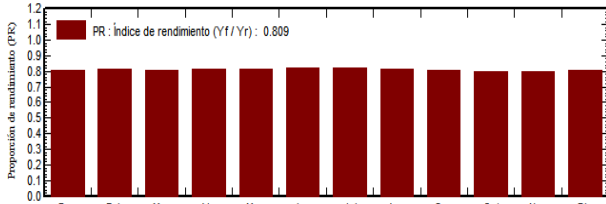


Fig. 8. Proportión de rendimiento energético PR [%] PVsyst 7.1 [14]

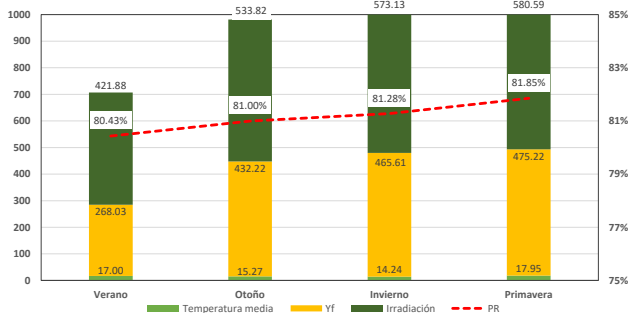


Fig. 9. Comparación del desempeño del sistema por estación con Yf, PR, Irradiación y temperatura ambiente medio.

TABLA 5. ANÁLISIS COMPARATIVO ESTACIONAL DE ENERGÍA ESTIMADA, ENERGÍA CORREGIDA Y ENERGÍA REAL DEL SFcR.

Estaciones del año	HSP [Hrs.]	E _{estim} [kWh]	E _{estim_corr} [kWh]	E _{real} [kWh]	E [%]
Verano	5.4	16.34	14.17	12.78	1.39
Otoño	5.8	17.56	15.22	14.51	0.71
Invierno	6.2	18.77	16.27	15.20	1.07
Primavera	6.4	19.37	16.79	15.70	1.09

$P_{ref}=3.03kW$; $P_{estim_correc}=2.62kW$.

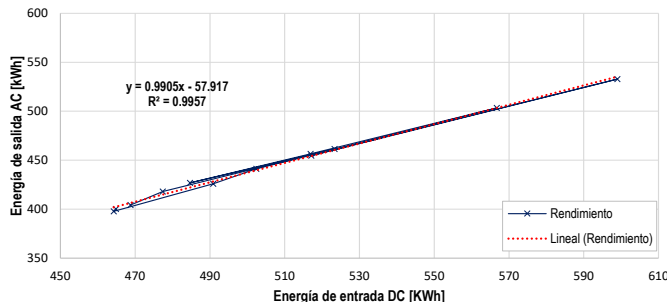


Fig. 10. Dispersión de datos estacional y curva de tendencia para el inversor String 3kW.

IV. CONCLUSIONES

La evaluación y caracterización estacional del SFcR, según los resultados presenta un buen desempeño, el PR es mayor al 80% en todas las estaciones, con una media de 81.14% y comparando con la simulación de 80.9% [14] siendo muy cercanos, el máximo PR es 81.85% presentado en *primavera* y

una pérdida del 18.86% en la potencia media neta de salida, debido a la incidencia de la radiación solar y la temperatura de celda de los módulos fotovoltaicos.

La L_c máx, acumulada es 45.95kWh que se presenta *en invierno* y la mínima de 36.61kWh *en verano*, la L_{BOS} máx, acumulada es 74.16kWh *en verano* y la mínima de 60.63kWh *en otoño*, debidas a la operación del SFcR con inversor string, según la época del año [13].

La energía máxima acumulada en CC es 1,616.43 kWh y en CA de 1,425,67 kWh se da *en el equinoccio de primavera*.

La estación más favorable de mejor desempeño del SFcR es en primavera y la menos favorable se presenta en verano, debido a la baja irradiación y el aumento de la temperatura.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC-FONDECYT, en el marco de la convocatoria E041-01, contrato N°180-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV. Así mismo al grupo de investigación GRIDSOLAR de la EPIER-UNAJ, a la Universidad de Jaén-UJA-España, al grupo de investigación GEDAE de la UFPA-Brasil, y la colaboración del CER-UNI, Lima-Perú.

REFERENCIAS

- [1] J. R. Núñez A., I. F. Benítez P., R. Proenza Y., L. Vázquez S., D. Díaz M., 2020. Metodología de diagnóstico de fallos para sistemas fotovoltaicos de conexión a red.
- [2] Mejias-Brizuela, Nildia, Ruiz-Herrera, Sandra, Galán-Hernández, Néstor y Correa-Fierro, Irving, 2017. Caracterización eléctrica de un sistema fotovoltaico de 3 kWp de potencia conectado a red eléctrica.
- [3] Paúl W. Potes y Xavier A. Proaño, 2020. Design of a Photovoltaic System Connected to the Grid in the Engineering Faculty Facilities of the Technical University of Cotopaxi.
- [4] Aissa Chouder, Santiago Silvestre, Nawel Sadaoui, Lazhar Rahmani, 2011. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters.
- [5] Kymakis E, Kalykakis S., 2009. Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. Energy Convers Manage Vol 50 n 3, pp 433-4338.
- [6] Firman Andrés D., Cáceres Manuel, Toranzos Víctor J., Busso Arturo, Vera Luis, 2012. Monitoreo y Caracterización de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red, Universidad Nacional del Nordeste, FaCENA. Grupo en Energías Renovables, Universidad Nacional de Salta, CONICET.
- [7] Khalid, A. M.; Mitra, I.; Warmuth, W.; Schacht, V. 2016. Performance ratio – Crucial parameter for grid connected PV plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 65, p. 1139-1158, ISSN 1364-0321.
- [8] Tatiana Vargas y Augusta Abrahamse, 2014. An Open-Source Hardware I-V Curve Tracer For Monitoring Pv Output In Bolivia.
- [9] Cabello García Salvador. Reconfiguración dinámica del campo solar de una planta fotovoltaica para maximizar la producción de energía. Dpto. de Ingeniería Eléctrica Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. pp 27-66. Sevilla, 2018. Disponible en: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/87356/TFG-CABELLO%20GARCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10] IEC 61724, 2017. Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring, Ed. 1.
- [11] Sunmodule Plus SW250-260 Poly (2015, Junio 09). Panel fotovoltaico SolarWorld 250Wp. Disponible en: <https://movegry.mx/images/SW-250-poly.pdf>
- [12] COOLCEPT-X StecaGrid 3010x. (2018, Julio 25). Datos técnicos Steca A Katek Brand. Disponible en: <https://www.steca.com/index.php?coolcept-x-StecaGrid-1500x-4200x-es#productdescription>.
- [13] Buele Avila Carlos O., Chasi Solis Andrés M. Modelación del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica en la Universidad Politécnica de Salesiana sede Cuenca, pp 61-96. Ecuador, 2019. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18210>
- [14] Simulación en Software PVsyst. Disponible <https://www.pvsyst.com/>