



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

APLICACIÓN DE LA NORMA IEC 61724:2017 SOBRE CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SERVICIOS SATELITALES. CASO DE ESTUDIO EN EL PERÚ

Alumno: Espinosa González, César Augusto

Tutor: Prof. D. Juan de la Casa Higuera
Dpto: Ingeniería Electrónica y Automática

Septiembre, 2021



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática

Don Juan de la Casa Higuera, tutor del Trabajo Fin de Máster titulado: APLICACIÓN DE LA NORMA IEC 61724:2017 SOBRE CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SERVICIOS SATELITALES. CASO DE ESTUDIO EN EL PERÚ, que presenta César Augusto Espinosa González, autoriza su presentación para defensa y evaluación en el Centro de Estudios de Postgrado.

Jaén, Septiembre de 2021

El alumno:

El tutor:

César Augusto Espinosa González

Juan de la Casa Higuera

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) tiene como principal objetivo llevar a cabo la aplicación de la norma IEC 61724:2017 sobre caracterización energética de sistemas fotovoltaicos utilizando servicios satelitales de libre acceso. El caso de estudio se centrará en el Perú.

En la actualidad, existen herramientas o plataformas online que ofrecen datos meteorológicos sobre el Perú; algunas son de libre acceso o gratuitas y para otras, su uso se ve restringido por un pago económico. Sin embargo, no existe ningún estudio que valide la bondad de su uso en el país. Estos tipos de herramientas son de sumo interés, tanto en la fase de diseño de los sistemas fotovoltaicos como en el posterior proceso de análisis y evaluación de su funcionamiento si se pretende implementar sistemas de monitoreo con la precisión Clase B o C definidos en la norma IEC 61724: 2017.

En este trabajo se analizará la consistencia de los resultados cuando se utilizan datos meteorológicos ofrecidos por las plataformas online de libre acceso disponibles y su utilidad al contrastarlos con datos experimentales de funcionamiento de tres sistemas reales instalados en diferentes localidades del Perú.

ABSTRACT

The main objective of this Master's Thesis (TFM) is to carry out the application of the IEC 61724:2017 standard on energy characterization of photovoltaic systems using open access satellite services. The case study will focus on Peru.

Currently, there are online tools or platforms that offer meteorological data on Peru; some are open access or free of charge and for others, their use is restricted by an economic payment. However, there is no study that validates their use in the country. These types of tools are of great interest, both in the design phase of photovoltaic systems and in the subsequent process of analysis and evaluation of their performance if monitoring systems are to be implemented with Class B or C accuracy as defined in the IEC 61724: 2017 standard.

This paper will analyze the consistency of the results when using meteorological data provided by freely available online platforms and their usefulness when contrasted with experimental operating data from three real systems installed in different locations in Peru.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Antecedentes.....	8
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivo General.....	9
1.2.2 Objetivos Específicos	10
1.3 Motivación	10
1.4 Alcance del Proyecto	11
2. NORMA IEC 61724:2017	12
2.1 Norma IEC 61724-1:2017	12
2.2 Parámetros Calculados	14
3. DESCRIPCIÓN DEL SETUP EXPERIMENTAL	16
3.1 Localización y Descripción de los Sistemas.....	16
3.2 Servicios Satelitales de Libre Acceso	21
3.3 Herramientas de Análisis y Procesamiento de Datos.....	23
4. RESULTADOS.....	26
4.1 Metodología.....	26
4.2 Resultados Aplicando Clase B.....	29
4.2.1 Índices de Rendimiento Mensuales	31
4.2.2 Factores de Rendimiento Mensuales.....	37
4.3 Resultados Aplicando Clase C.....	45
4.4 Comparativa Entre Clase B y Clase C	49
4.4.1 Análisis Mensual.....	49
4.4.2 Análisis Diario.....	54
5. CONCLUSIONES.....	56
6. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	57
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	58
BIBLIOGRAFÍA.....	60
SOFTWARE UTILIZADO	63
ANEXO 1: JOPES 2021	

1. INTRODUCCIÓN

Como puede apreciarse en la Figura 1, la producción de energía eléctrica en el Perú para el año 2018 estuvo concentrada básicamente en dos fuentes, hidráulica y gas natural, con las que en conjunto se generó el 92,4% del total de energía producida en este año. Por otra parte, las fuentes de energías renovables superaron apenas el 7% de participación. Teniendo la energía solar solamente un 1,5% de participación.

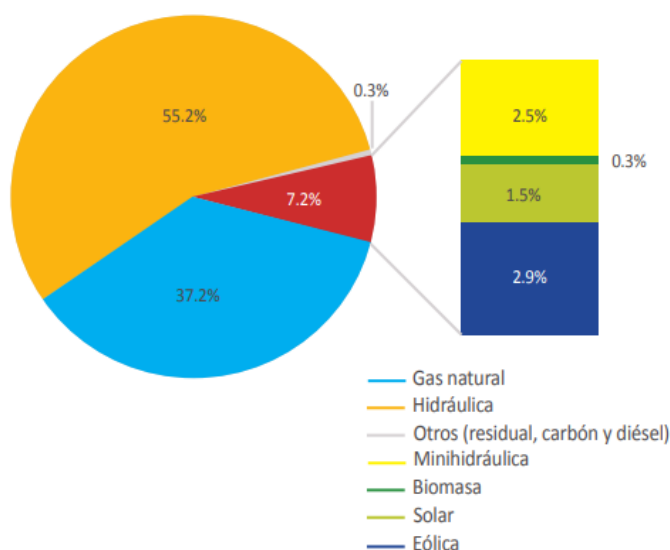


Figura 1. Participación en la producción de energía eléctrica según fuente energética en el Perú (2018). Fuente: GPAE-Osinergmin

El mercado de la energía solar fotovoltaica es un mercado de rápido crecimiento donde la mayoría de las instalaciones fotovoltaicas tanto a nivel doméstico como a gran escala, se han puesto en marcha en zonas con climas templados como Europa, Japón y Norteamérica. Esto ha permitido que se produzca una mayor comprensión de la tecnología en estas zonas en comparación con aquellas donde la aparición de sistemas fotovoltaicos no ha sido tan relevante o se ha producido de manera más tardía. Sin embargo, en los últimos años, se ha producido un aumento de la demanda de energía solar en los mercados emergentes, situados especialmente en las regiones tropicales y subtropicales. En estas zonas, surge la necesidad de realizar una gran cantidad de investigaciones para una correcta interpretación de la tecnología. La falta de información sobre la exposición de los avances fotovoltaicos en estas regiones,

puede provocar peligros técnicos y efectos financieros negativos en la ejecución de los proyectos fotovoltaicos.

La Figura 2 muestra la capacidad fotovoltaica instalada acumulada en GWp para las diferentes regiones del mundo desde el año 2010 hasta el año 2019, tomando en cuenta tanto sistemas fotovoltaicos autónomos como sistemas fotovoltaicos conectados a red.

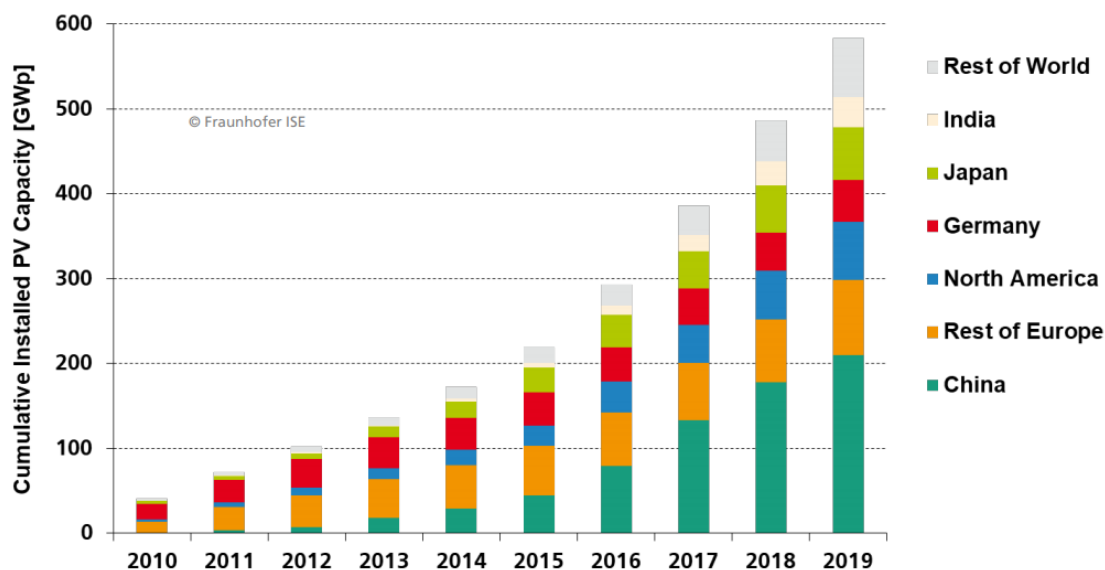


Figura 2. Capacidad fotovoltaica instalada acumulada en el mundo. Fuente: Fraunhofer ISE

El sol es la fuente de energía más importante de la tierra. Se estima que cada segundo produce 760.000 veces la producción energética anual a nivel mundial, por tanto, se abre un excelente abanico de posibilidades para desarrollar técnicas que permitan aprovechar esta gran cantidad de energía. Aparte de adquirir la energía del sol para calentar, convertir la radiación solar en electricidad a partir de módulos fotovoltaicos es una opción atractiva y con una mayor simplicidad que permite, entre otras muchas aplicaciones, la electrificación de viviendas alejadas de la red eléctrica, aplicaciones agrícolas y de ganado para el bombeo de agua, sistemas de riego e iluminación de invernaderos y granjas, señalización vial, repetidores de señal, alumbrado público, sistemas de depuración de aguas, etc. Protegiendo el medio ambiente y mejorando la calidad de vida de las personas.

Para evaluar el rendimiento de un sistema fotovoltaico, es necesario disponer de información fiable sobre el recurso disponible, la potencia efectiva del sistema y su comportamiento en diversas condiciones meteorológicas. Las fuentes de datos solares basadas en estimaciones por satélite proporcionan datos meteorológicos de interés para el diseño y evaluación de los sistemas fotovoltaicos en cualquier parte del mundo. Este hecho ha permitido la popularización de numerosas aplicaciones o plataformas informáticas, tanto de libre distribución como de pago, que contribuyen al desarrollo de la tecnología en todo el mundo.

1.1 Antecedentes

Según el análisis de los datos proporcionados por el Banco Mundial a través del Atlas Solar Mundial, un instrumento gratuito online que proporciona los datos más recientes sobre el potencial de los recursos solares de cada país, el Perú se encuentra entre los países con mayor potencial para la fotovoltaica del mundo tanto por su elevado recurso solar como por sus condiciones geográficas.

Sin embargo, el Perú goza de precios de electricidad bajos comparados con sus países vecinos y con el nivel internacional. Así, reemplazar fuentes de producción de energía tradicional con energías renovables es económicamente rentable solamente en zonas donde no llega la red pública y se produce la electricidad con generadores de diésel.

Este hecho, cambiará sin duda en el momento en que se produzca un cambio en el mix energético del país, reemplazando el uso del gas natural para la producción de electricidad por fuentes de energía renovables.

En el Perú, con su alta radiación solar, la energía solar fotovoltaica se utiliza, principalmente, en telecomunicaciones y cada vez más en la industria, por ejemplo, en agricultura para bombeo de agua, en minería y otros sectores. Sin embargo, el escaso poder adquisitivo de la mayoría de la población, el insuficiente conocimiento y la poca familiaridad con los sistemas fotovoltaicos, al igual que la falta de inversión, provoca que se produzcan barreras para aceptar ampliamente esta tecnología y propiciar su desarrollo pleno en el país.

Para el desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica se presenta como algo trascendental el contrastar los datos de radiación solar basados en imágenes de satélite mediante comparaciones con los datos medidos a nivel de suelo. La validación de los datos satelitales es algo habitual y se han publicado numerosos trabajos que tratan de la validación de datos para diferentes lugares del mundo. En este sentido, para el caso de la herramienta PVGIS, la validación de los datos satelitales puede dar lugar a sobreestimaciones del 11% y subestimaciones de hasta el 14%, dependiendo de la localidad estudiada. Sin embargo, hasta donde se tiene conocimiento, no se ha realizado un análisis teórico de este tipo para el Perú.

Destacar que en el presente trabajo no se pretende realizar un estudio de validación de datos porque no se cuenta con un laboratorio certificado para la medición de la irradiancia en superficie, pero lo que se pretende es utilizar los datos proporcionados por los satélites para compararlos con los datos reales de operación del sistema. Ya que, para comprobar el correcto funcionamiento de una determinada instalación fotovoltaica, utilizando exclusivamente los datos de los satélites como parámetros de entrada, un usuario final del Perú podría utilizar el sistema de monitorización de clase C descrito por las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, siglas en inglés); la norma de referencia es la IEC61724-1.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo principal del trabajo consiste en la realización de un análisis teórico acerca de la viabilidad técnica cuando se utilizan datos proporcionados por servicios satelitales de libre acceso a la hora de aplicar la norma IEC 61724:2017, norma que describe los procedimientos e índices de bondad y rendimiento que permiten una correcta caracterización energética de la operación de sistemas fotovoltaicos. El caso de estudio se centrará especialmente en el Perú ya que, hasta donde se conoce, no existen estudios de estas características aplicados a la región.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Conocer los sistemas de monitoreo definidos como de Clase B y C por la norma IEC 61724.
- Identificar las fuentes satelitales de libre acceso que permiten obtener datos meteorológicos para el Perú.
- Procesar los datos experimentales de funcionamiento de varios sistemas fotovoltaicos distribuidos por el Perú al igual que los datos experimentales medidos en tierra en estaciones meteorológicas que permitirán contractar la bondad de los datos ofrecidos por los servicios satelitales de libre acceso.
- Desarrollo de un modelo de análisis para llevar a cabo el estudio de viabilidad de la caracterización energética de Sistemas Fotovoltaicos utilizando los datos meteorológicos de servicios satelitales de libre acceso como parámetros de entrada.

1.3 Motivación

La principal motivación de este trabajo surge de la necesidad existente de llevar a cabo un mayor desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica y mejorar el conocimiento que se tiene de la misma en el Perú. Dando a conocer diferentes herramientas y técnicas que permitan llevar a cabo la caracterización de sistemas fotovoltaicos aplicando correctamente el estándar IEC 61724:2017.

La energía solar fotovoltaica se presenta como una gran oportunidad en el Perú para promover la transformación energética, ayudar a la mitigación del cambio climático y adoptar un crecimiento económico sobre la base de energías limpias y sostenibles. De ahí la necesidad de fomentar el desarrollo tecnológico y científico de las energías renovables en el Perú para sacarle el máximo provecho a su alto recurso solar. Ya que un aspecto interesante sobre las energías renovables es que la mayoría de ellas se originan o están relacionadas en una u otra manera con el Sol.

1.4 Alcance del Proyecto

El presente proyecto comprende la realización de las siguientes actividades:

- Recopilación bibliográfica y de referencia.
- Identificación, acceso y descarga de información de interés en diferentes servicios satelitales de libre acceso.
- Propuesta y desarrollo de modelos/ herramientas de análisis y procesamiento de datos.
- Caracterización energética de los sistemas utilizando datos experimentales y aplicando Clase B.
- Caracterización energética de los sistemas utilizando datos de satélite y aplicando Clase C.
- Comparación de resultados entre Clase B y Clase C.
- Elaboración de conclusiones y reflexiones finales.
- Por último, propuesta de futuras líneas trabajo.

2. NORMA IEC 61724:2017

2.1 Norma IEC 61724-1:2017

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) es una organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y de tecnologías relacionadas. Para alcanzar su objetivo, además de otras actividades, la CEI publica Normas Internacionales, Especificaciones Técnicas, Informes Técnicos, Especificaciones Disponibles al Público (PAS, siglas en inglés) y Guías.

La norma internacional IEC 61724-1 aborda la monitorización del sistema fotovoltaico y ha sido elaborada por el comité técnico 82 de la CEI: Sistemas de energía solar fotovoltaica. Esta primera edición anula y sustituye a la primera edición de la norma IEC 61724, publicada en 1998.

La norma IEC 61724-1:2017 define tres clasificaciones -clase A, B y C- de los sistemas de monitorización en función del número de variables que deben medirse in situ y de la precisión de la medición. Los sistemas definidos como clase B y C son los que permiten el uso de estimaciones por satélite de las variables meteorológicas.

Tal y como se indica en la Tabla 1, el sistema de monitorización de clase B se sugiere para una evaluación básica del rendimiento del sistema fotovoltaico, la documentación de la garantía de rendimiento y el análisis de las pérdidas del sistema. Por otra parte, se sugiere el sistema de monitorización de clase C para una evaluación básica del rendimiento del sistema.

Typical applications	Class A High accuracy	Class B Medium accuracy	Class C Basic accuracy
Basic system performance assessment	X	X	X
Documentation of a performance guarantee	X	X	
System losses analysis	X	X	
Electricity network interaction assessment	X		
Fault localization	X		
PV technology assessment	X		
Precise PV system degradation measurement	X		

Tabla 1. Clasificación de los diferentes sistemas de monitorización y sus aplicaciones propuestas.
Fuente: IEC 61724-1:2017

Dentro de los parámetros medidos y requisitos que exige la norma para cada una de las clases definidas anteriormente, con el objetivo de llevar a cabo la caracterización energética de un sistema fotovoltaico, ésta establece que para el sistema de monitorización de clase B deben realizarse mediciones in situ o estimaciones utilizando datos de satélite de la irradiancia en el plano del generador, la irradiancia global horizontal, la irradiancia directa normal y difusa, la temperatura (ambiente y del módulo), la velocidad del viento y las precipitaciones. Para el sistema de monitorización de clase C, solamente la irradiancia en el plano del generador y la temperatura ambiente deben medirse in situ o estimarse mediante datos de satélite, como sucede en la clase B para estos parámetros.

Las estimaciones por satélite, se pueden definir como único medio que le permite a un usuario final estimar si su instalación funciona correctamente, puesto que la mayoría de ellos no llevarán a cabo la instalación de estaciones meteorológicas que le permitan obtener, al menos, datos de irradiancia global y temperatura ambiente. Es aquí donde el sistema de monitorización de clase C se presenta como fundamental para desarrollar la metodología utilizada en este estudio y alcanzar los objetivos del mismo.

En la Tabla 2, la marca de verificación (✓) hace referencia a un parámetro que debe medirse, necesariamente, in situ. Mientras que el símbolo "E" indica un parámetro que puede estimarse basándose en datos meteorológicos locales o regionales o en datos de satélite, en lugar de medirse in situ.

Parameter	Symbol	Units	Monitoring purpose	Required?
				Class C - Medium accuracy
INPUT				
In-plane irradiance (POA)	G _i	W·m-2	Solar resource	√ or E
Ambient air temperature	T _{amb}	°C	Estimation of PV temperatures	√ or E
ELECTRICAL OUTPUT				
Output power (AC)	P _{out}	kW	Energy output	√
Output energy	E _{out}	kWh		√

Tabla 2. Parámetros medidos o estimados de entrada y de salida requeridos para el sistema de monitorización de clase C. Fuente: IEC 61724-1:2017

2.2 Parámetros Calculados

La norma IEC 61724:2017-1 define una serie de parámetros y factores de rendimiento que se calculan normalmente para periodos diarios, mensuales o anuales.

En las fórmulas que se describen a continuación y que involucran una sumatoria, τ_k hace referencia a la duración del intervalo de medida k^{th} dentro de un periodo de tiempo.

En primer lugar, la irradiación en el plano (H_i en $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$) se calcula mediante la sumatoria de la irradiancia incidente en el plano ($G_{i,k}$ en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) de la siguiente manera:

$$H_i = \sum_k G_{i,k} \times \tau_k$$

La energía en la parte de corriente continua (E_A en Wh) se calcula según la ecuación:

$$E_A = \sum_k P_{A,k} \times \tau_k$$

Donde $P_{A,k}$ (W) es el k-ésimo valor registrado de la potencia a la entrada en corriente continua.

Para la energía en la parte de corriente alterna (E_{out} en Wh) el cálculo se realiza según la ecuación:

$$E_{\text{out}} = \sum_k P_{\text{out},k} \times \tau_k$$

Donde $P_{\text{out},k}$ (W) es el k-ésimo valor registrado de la potencia a la salida en corriente alterna.

Por otra parte, la norma establece que el rendimiento energético del array fotovoltaico (Y_A en $\text{Wh}\cdot\text{W}^{-1}$) hace referencia a la producción de energía en corriente continua del sistema por cada kW nominal instalado:

$$Y_A = E_A/P_0$$

Donde P_0 es la potencia pico del sistema.

El rendimiento final del sistema fotovoltaico (Y_f en $\text{Wh}\cdot\text{W}^{-1}$) se define como la producción de energía neta en corriente alterna de todo el sistema por cada kW nominal instalado:

$$Y_f = E_{\text{out}}/P_0$$

El rendimiento de referencia (Y_r en $\text{Wh}\cdot\text{W}^{-1}$) se puede calcular dividiendo la irradiación total recibida en el plano por la irradiancia en condiciones estándar de medida ($G_{i,\text{ref}}$ en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$):

$$Y_r = H_i/G_{i,\text{ref}}$$

El factor de rendimiento global o Performance Ratio (PR) se define, según la norma, como el cociente entre el rendimiento final del sistema, Y_f , y su rendimiento de referencia, Y_r , e indica el efecto global de las pérdidas en el rendimiento del sistema debido tanto a los efectos de la temperatura como a las ineficiencias o fallos de los componentes del sistema. Se define como:

$$PR = Y_f/Y_r$$

Por último, el factor de rendimiento en la parte de corriente continua (PR_{DC}) tiene el mismo fundamento que el factor de rendimiento global y se calcula según la ecuación:

$$PR_{\text{DC}} = Y_A/Y_r$$

3. DESCRIPCIÓN DEL SETUP EXPERIMENTAL

3.1 Localización y Descripción de los Sistemas

En el marco del proyecto "Emergiendo con el Sol", dirigido por la Universidad de Jaén y financiado en su totalidad por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID), se instalaron en el Perú tres Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red (SFCR) con sus respectivos sistemas de monitorización. Estos tres SFCRs fueron instalados en diferentes ciudades del país que disfrutan de condiciones climáticas muy dispares. Los mismos conforman el setup experimental del presente trabajo, sirviendo como base para llevar a cabo este estudio comparativo entre la aplicación de los sistemas de monitorización Clase B y Clase C definidos por la norma.

El SFCR #1 se puso en marcha en abril de 2015 y está ubicado en la Universidad Nacional de San Agustín en Arequipa, al sur del Perú, el SFCR #2 fue puesto en marcha en la misma fecha que el SFCR #1 en la Universidad Nacional de Jorge Basadre Grohmann en Tacna, también al sur del País, y el SFCR #3 está ubicado en la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima y se encuentra funcionando desde mayo de 2016.

Las Figuras 3-5 muestran las instalaciones fotovoltaicas bajo estudio en este trabajo.



Figura 3. Instalación fotovoltaica localizada en Arequipa. Fuente: Espinoza R, et al. (2019)



Figura 4. Instalación fotovoltaica localizada en Tacna. Fuente: Espinoza R, et al. (2019)



Figura 5. Instalación fotovoltaica localizada en Lima. Fuente: Espinoza R, et al. (2019)

Tal y como describe la Tabla 3, las instalaciones de Arequipa y Tacna son instalaciones gemelas con las mismas características, los mismos parámetros eléctricos y la misma tecnología de módulos fotovoltaicos, silicio monocristalino.

La Tabla 4 recoge las características de la instalación situada en Lima, incluyendo sus parámetros eléctricos y tecnología de los módulos fotovoltaicos que la componen, la cual es de silicio microamorfo. A partir de julio de 2018, se produjo un cambio en dicha instalación, sustituyéndose una de las cadenas de silicio microamorfo por 2 kWp de silicio policristalino. Quedando la instalación de la forma en la que se presenta en la Figura 6.



Figura 6. Instalación fotovoltaica localizada en Lima tras los cambios realizados en su generador fotovoltaico. Fuente: UJAEN

Arequipa y Tacna			
Módulo FV		Generador FV	
SOLARWORLD Mod. SW275		Estático	
Tipo	Mono c-Si	Orientación Norte	
TONC	46 °C	Inclinación 15°	
Células en serie	60	Nº módulos en serie	12
Células en paralelo	1	Nº de string	1
Células totales	60	Nº total de módulos	12
Características eléctricas del módulo FV		Características eléctricas del generador FV	
ISC,M,STC	8,9 A	ISC,gen,STC	8,9 A
VOC,M,STC	38,3 V	VOC,gen,STC	459,6 V
IM,M,STC	8,42 A	IM,gen,STC	8,42 A
VM,M,STC	32,1 V	VM,gen,STC	385,2 V
PM,M,STC	275 W	PM,gen,STC	3300 W
Inversor de conexión a red			
Steca modelo Colcept-x 3010x, 3kW			

Tabla 3. Descripción de las instalaciones en Arequipa y Tacna. Fuente: UJAEN

Lima			
Módulo FV		Generador FV	
SHARP NAF128GK		Estático	
Tipo	Microamorfo	Orientación Norte	
TONC	44 °C	Inclinación 15°	
		Nº módulos en serie	9
		Nº de string	3
		Nº total de módulos	27
Características eléctricas del módulo FV		Características eléctricas del generador FV	
ISC,M,STC	3,45 A	ISC,gen,STC	10 A
VOC,M,STC	59,8 V	VOC,gen,STC	538 V
IM,M,STC	2,82 A	IM,gen,STC	8 A
VM,M,STC	45,4 V	VM,gen,STC	409 V
PM,M,STC	128 W	PM,gen,STC	3456 W
Inversor de conexión a red			
Sunny Boy 3000TL			

Tabla 4. Descripción de la instalación en Lima. Fuente: UJAEN

Para cada uno de los tres sistemas fotovoltaicos descritos previamente, se han medido y registrado, durante los últimos cinco años, tanto las variables eléctricas como las ambientales de interés que permiten la aplicación de la norma IEC61724-1.

Los sistemas de monitorización utilizados en cada SFCR se basan en componentes de calidad disponibles en el mercado (marca Carlo Gavazzi) y se controlan mediante la tecnología 'OLE for Process Control', un estándar de comunicación basado en la tecnología de Microsoft, en combinación con el software LabVIEW™. Se utilizaron dispositivos EOS-Array® para la medición de las variables de las diferentes cadenas del generador fotovoltaico mientras que la monitorización de la energía generada por el sistema se llevó a cabo con el medidor y analizador de energía EM24®.

Se utilizaron detectores térmicos resistivos Pt100 (RTD) pegados a la superficie posterior de los módulos fotovoltaicos para medir su temperatura. De igual forma, se utilizó un termopar con protector de radiación solar para medir la temperatura ambiente. En todos los sistemas, se midió la irradiancia en el plano utilizando una célula solar calibrada de silicio monocristalino coplanar al generador fotovoltaico.

Al considerar los sensores de irradiancia de una tecnología similar a la de los módulos fotovoltaicos, con el mismo nivel de limpieza que estos, todas las pérdidas espectrales y de reflexión se consideran intrínsecamente en las estimaciones para las instalaciones de Arequipa y Tacna. De este modo, se mitigan las incertidumbres y los errores de medición de la irradiancia, ya que se tienen en cuenta los efectos climáticos y del suelo.

Para el caso de la instalación en Lima, las mediciones de irradiancia hubieran requerido una célula calibra de la misma tecnología y mismo nivel de limpieza que el generador fotovoltaico. Sin embargo, los problemas de estabilidad en el uso de una célula calibrada de silicio microamorfo, propiciaron el uso de una célula calibrada de tecnología silicio monocristalino, a costa de aumentar la incertidumbre en las mediciones. Cabe destacar, que no es el primer estudio en el que se utiliza una célula solar calibrada de silicio monocristalino para medir la irradiancia incidente sobre sistemas fotovoltaicos de capa delgada.

En definitiva, los sistemas de monitorización puestos en marcha en estas instalaciones, permiten registrar los siguientes parámetros en la parte de corriente alterna:

- Tensión.
- Corriente.
- Potencia aparente, activa y reactiva a la salida.
- Frecuencia.
- Factor de potencia.
- Energía acumulada a la salida.

En la parte de corriente continua, permiten medir:

- Tensión.
- Corriente.
- Potencia a la entrada.

Estos sistemas de monitorización también permiten registrar los datos de:

- Irradiancia en el plano.

- Temperatura del módulo.
- Temperatura ambiente.

Todos los datos de los parámetros descritos anteriormente se toman a intervalos de 15 segundos. Por todo ello, estos sistemas se clasifican como sistemas de monitorización de clase B según la norma IEC61724-1.

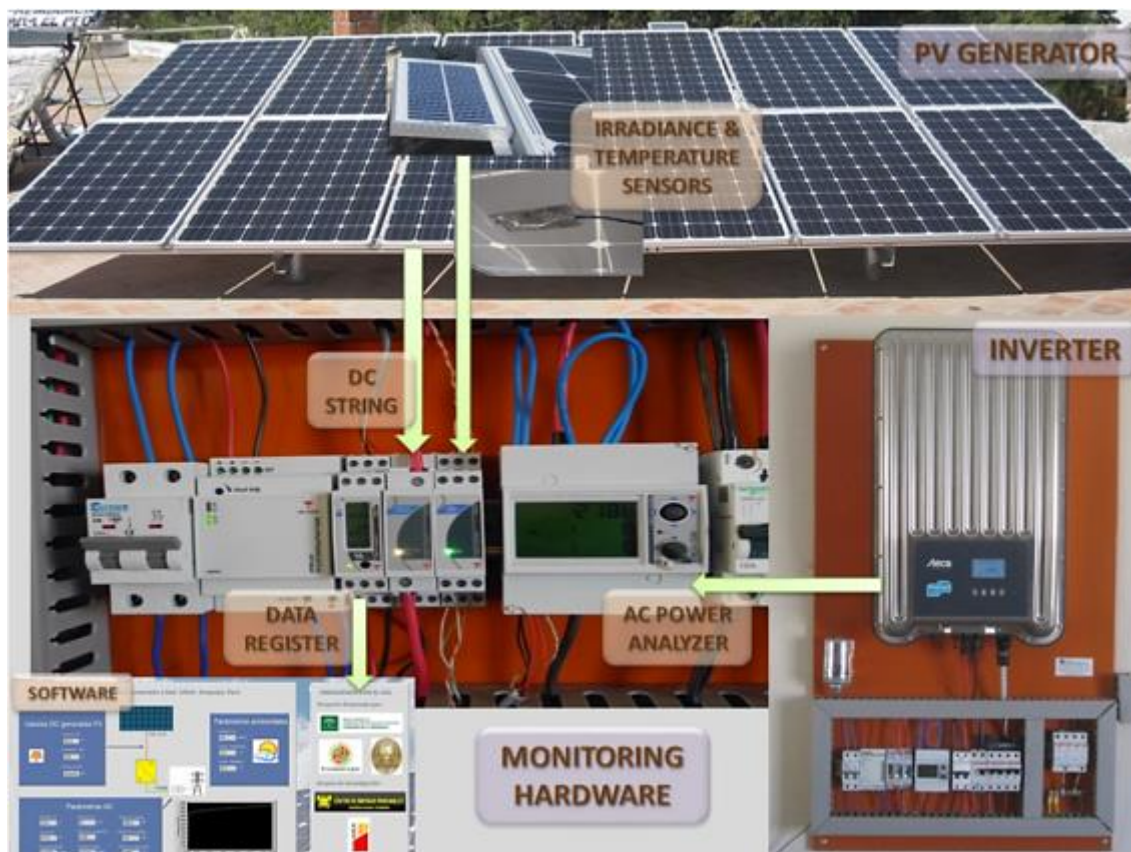


Figura 7. Sistema de monitorización. Fuente: Espinoza R, et al. (2019)

3.2 Servicios Satelitales de Libre Acceso

En la actualidad, todos los programas de diseño comerciales que existen utilizan los datos meteorológicos estimados por satélite como fuente de recurso. Incluso, existen ya empresas de pago que ofrecen tanto servicios gratuitos como de pago. Por tanto, Para desarrollar este estudio, en primer lugar, es necesario identificar las fuentes satelitales de libre acceso que permitan obtener las variables meteorológicas de interés para el cumplimiento de la norma en el Perú.

Primeramente, se encuentra el servicio de la NASA llamado 'NASA POWER Data Access Viewer' que a través de la opción 'SSE-Renewable Energy' proporciona los siguientes datos diarios acumulados:

- Precipitación.
- Temperatura ambiente.
- Velocidad del viento.
- Irradiación global incidente sobre superficie horizontal.

En segundo lugar, mediante la herramienta 'Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications' en su versión 2 (MERRA-2, siglas en inglés), fácilmente accesible a través de la empresa SoDa[®], se pueden obtener los siguientes datos meteorológicos de interés para diferentes resoluciones temporales:

- Temperatura ambiente.
- Velocidad del viento.
- Precipitación.
- Irradiación global incidente sobre superficie horizontal.



Figura 8. Página web de SoDa. Fuente: www.soda-pro.com

Ambas plataformas descritas previamente, ofrecen datos solares estimados con un retraso de sólo dos días.

Finalmente, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, siglas en inglés) ofrece los siguientes datos para años completos y diferentes resoluciones temporales:

- Precipitación.
- Temperatura ambiente.
- Velocidad del viento.

- Irradiación global, directa y difusa incidente sobre superficie horizontal.

Es importante recalcar que, aunque existen diferentes servicios satelitales de libre acceso para el Perú, todos ellos dependen de los datos que provee la NASA. Siendo la NASA la fuente de datos matriz.

3.3 Herramientas de Análisis y Procesamiento de Datos

Para el procesamiento de los datos obtenidos de los sistemas de monitorización de los diferentes montajes experimentales, se ha desarrollado dentro del Grupo de Investigación y Desarrollo en Energía Solar y Automática (Grupo IDEA) de la Universidad de Jaén, un software en el lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos MATLAB®. Durante este estudio se han ido produciendo mejoras en el software que han permitido optimizar y adaptar el análisis y procesamiento de datos a los cambios llevados a cabo en las instalaciones experimentales.

Este software permite, en primer lugar, realizar una serie de gráficas que ayudarán a decidir si el fichero de datos correspondiente a un día en concreto es correcto o, por si lo contrario, presenta algún tipo de fallo. En segundo lugar, una vez se han detectado y eliminados los días que han presentado algún tipo de fallo en el sistema de monitorización, se pasa a realizar un filtrado de los días válidos, dicho filtrado se realiza a partir de una irradiancia de 50 W/m². Una vez se obtienen los diferentes datos filtrados, el programa permite generar un resumen mensual de toda la información diaria obtenida.

Las Figuras 9 y 10 muestran las dos interfaces del software utilizado para el procesamiento de los datos experimentales.

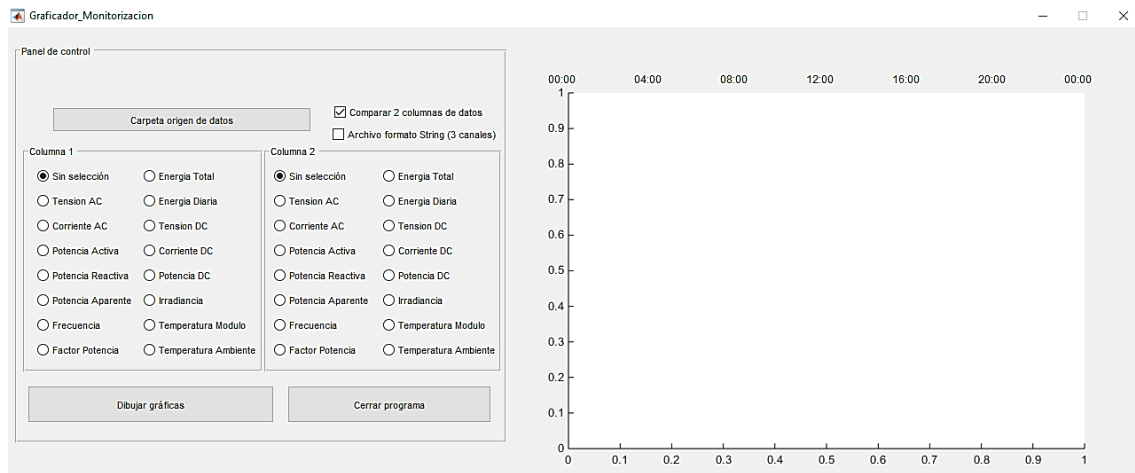


Figura 9. Graficador para el análisis de los datos experimentales. Fuente: UJAEN

Figura 10. Interfaz gráfica para el procesamiento de los datos experimentales. Fuente: UJAEN

La interfaz gráfica dedicada al procesamiento o tratamiento de los datos experimentales, se divide en dos zonas:

- Parte superior dedicada al filtrado de los datos que entrega la monitorización propia del sistema. Eliminándose así posibles errores

de offset fruto de cualquier problema en la puesta a punto de los diferentes sensores.

- Parte inferior orientada a la generación del resumen del mes tratado, utilizando los datos diarios del mes en cuestión, que han sido filtrados en el paso anterior.

Todo esto permite obtener los diferentes índices de bondad y rendimiento, que permiten una correcta caracterización energética de la operación de los sistemas fotovoltaicos experimentales utilizados para el presente trabajo, según la norma IEC 61724:2017.

4. RESULTADOS

4.1 Metodología

A partir de los datos de satélite de irradiación incidente sobre superficie horizontal, se desarrolló un programa en el lenguaje de programación Python, con la ayuda de la biblioteca de código abierto PVLIB, que permitió transformar los datos de irradiación diaria sobre superficie horizontal a datos de irradiación diaria para una cierta inclinación y orientación. Permitiendo llevar a cabo la caracterización energética de Clase C de las instalaciones fotovoltaicas bajo investigación.

Teniendo en cuenta todo esto, se calcularon los factores de rendimiento diarios y mensuales tanto para los sistemas experimentales aplicando Clase B como aplicando Clase C, siguiendo las recomendaciones de la norma IEC61724-1. Para las instalaciones fotovoltaicas de Arequipa y Tacna se llevó a cabo el cálculo del factor de rendimiento global (PR). Mientras que para la instalación fotovoltaica de Lima se calculó el factor de rendimiento en la parte de corriente continua (PR_{DC}).

El factor de rendimiento de Clase C (PR_{sat}) se ha calculado conforme a la siguiente ecuación:

$$PR_{sat} = \frac{Y_{f,exp}}{Y_{r,sat}} = \frac{\frac{E_{out,exp}}{P_0}}{\frac{H_{i,sat}}{G_{i,ref}}}$$

Donde $Y_{f,exp}$ es el rendimiento final experimental o medido in situ del sistema fotovoltaico, $Y_{r,sat}$ es el rendimiento de referencia obtenido a partir de los datos de satélite, $E_{out,exp}$ es la energía experimental o medida a la salida en la parte de corriente alterna, P_0 es la potencia pico instalada del sistema, $H_{i,sat}$ es la irradiación en el plano del generador obtenida a partir de los datos de satélite y $G_{i,ref}$ es la irradiancia en condiciones estándar de medida.

De la misma forma, el factor de rendimiento de Clase C en la parte de corriente continua ($PR_{DC,sat}$) viene dado por la siguiente fórmula:

$$PR_{DC,sat} = \frac{Y_{A,exp}}{Y_{r,sat}} = \frac{\frac{E_{A,exp}}{P_0}}{\frac{H_{i,sat}}{G_{i,ref}}}$$

Donde $Y_{A,exp}$ es el rendimiento energético experimental del array fotovoltaico y $E_{A,exp}$ es la energía experimental medida a la entrada en la parte de corriente continua.

El factor de rendimiento experimental (PR_{exp}) se ha calculado de la siguiente forma:

$$PR_{exp} = \frac{Y_{f,exp}}{Y_{r,exp}} = \frac{\frac{E_{out,exp}}{P_0}}{\frac{H_{i,exp}}{G_{i,ref}}}$$

Donde $Y_{r,exp}$ es el rendimiento de referencia experimental o medido in situ en el sistema y $H_{i,exp}$ es la irradiación medida en el plano del generador fotovoltaico.

Por último, el factor de rendimiento experimental en la parte de corriente continua ($PR_{DC,exp}$) se ha calculado siguiendo la siguiente fórmula:

$$PR_{DC,exp} = \frac{Y_{A,exp}}{Y_{r,exp}} = \frac{\frac{E_{A,exp}}{P_0}}{\frac{H_{i,exp}}{G_{i,ref}}}$$

Es importante recalcar que, para los cálculos de todos los factores de rendimiento, sólo se han estudiado los días en los que se considera que el funcionamiento de las instalaciones experimentales ha sido perfecto y que no se ha tenido ningún tipo de problema ni con la operación propia del sistema ni con la medida.

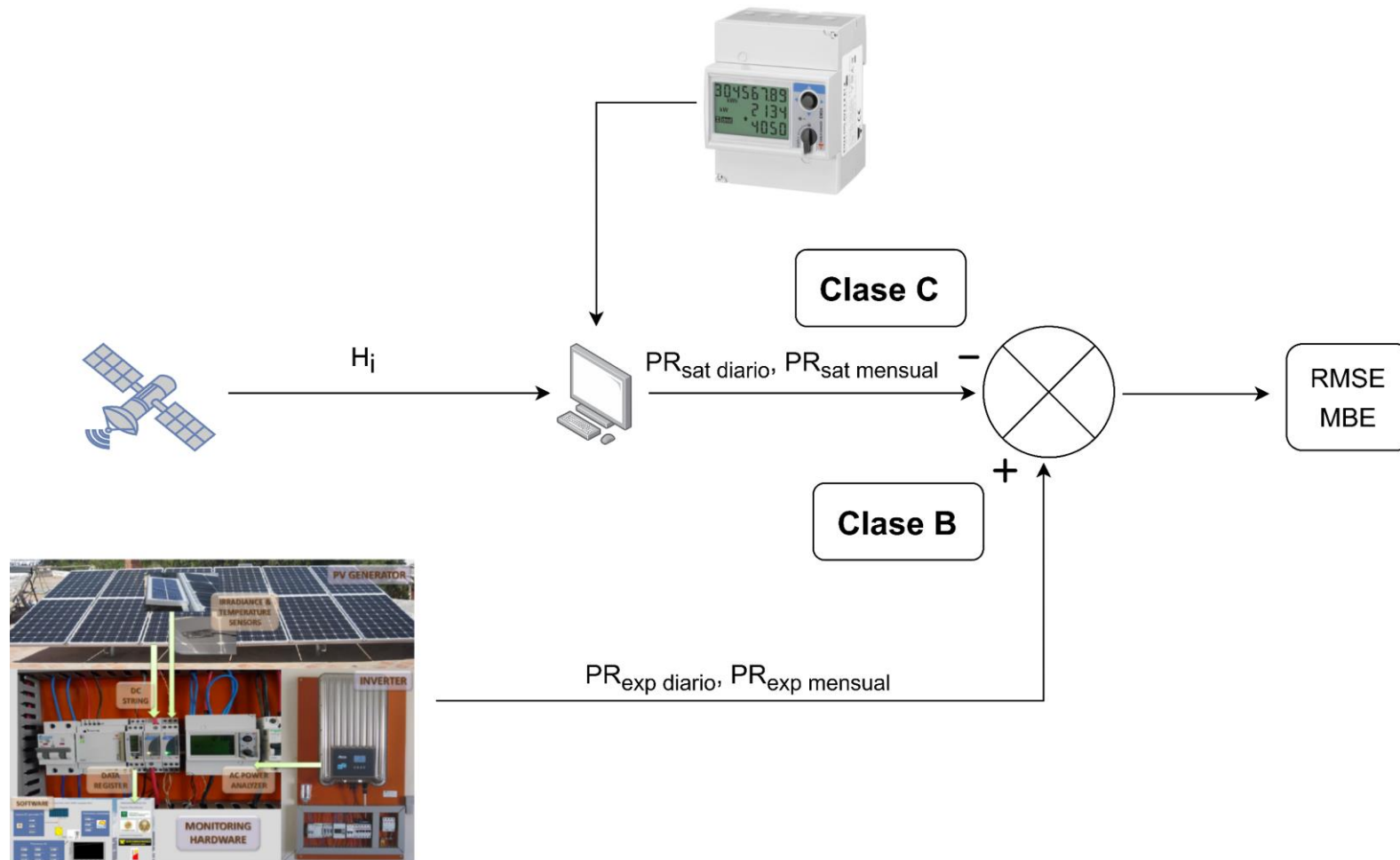


Figura 11. Esquema de la metodología empleada en el estudio. Fuente: Elaboración propia

Para establecer la bondad de los resultados obtenidos a través de esta metodología, se aplicarán dos métricas estadísticas. Por un lado, el error cuadrático medio (*RMSE*), que proporciona información sobre la dispersión de los factores de rendimiento del sistema aplicando Clase C con respecto a las mediciones llevadas a cabo experimentalmente aplicando Clase B de los mismos y, por otro lado, el sesgo medio del error (*MBE*), que muestra la subestimación o sobreestimación de los valores obtenidos de los sistemas aplicando Clase C.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (PR_{sat_i} - PR_{exp_i})^2}{n}}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (PR_{exp_i} - PR_{sat_i})}{n}$$

Dónde PR_{sat_i} y PR_{exp_i} representan el i -ésimo valor de los factores de rendimiento estimados y medidos experimentalmente, respectivamente, y n hace referencia al número de valores tomados en cuenta durante el periodo de análisis (diario o mensual).

4.2 Resultados Aplicando Clase B

A continuación, se presentan los índices y factores de rendimiento mensuales obtenidos durante toda la campaña experimental para las instalaciones enmarcadas dentro del proyecto “Emergiendo con el Sol” al igual que para otras dos instalaciones fotovoltaicas situadas en Lima y Juliaca de 3,01 kWp y 3 kWp respectivamente, ambas de tecnología silicio policristalino. Estas instalaciones no se han incluido en los estudios presentados en el apartado 4.4 ya que, no se cuenta, o bien con datos experimentales de funcionamiento suficientemente fiables debido a problemas relacionados con el polvo para el caso de la instalación situada en los jardines de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima (Figura 12) o con una serie temporal de datos experimentales suficiente amplia en el caso de la instalación situada en la Universidad Nacional de Juliaca (Figura 13).



Figura 12: Instalación fotovoltaica localizada en la UNI. Fuente: UJAEN



Figura 13. Instalación fotovoltaica localizada Juliaca. Fuente: UJAEN

El periodo de estudio para la instalación de Arequipa ha sido de 71 meses, desde agosto de 2015 hasta junio de 2021, y tanto la célula calibrada usada como sensor de irradiancia como el generador fotovoltaico han sido sometidos a los mismos protocolos de limpieza. Para la instalación situada en Tacna, la duración del estudio ha sido de 57 meses, desde mayo de 2015 hasta enero de 2020, y al igual que ocurre en Arequipa, tanto el sensor de irradiancia como el

generador fotovoltaico se dejaron sin limpiar durante la campaña experimental. Para la instalación de silicio microamorfo situada en Lima, el periodo analizado ha sido de 24 meses que van desde julio de 2016 hasta junio de 2018 (periodo previo al cambio de tecnología en una de las cadenas del generador fotovoltaico). En este caso tanto el sensor de irradiancia como el generador fotovoltaico se limpiaron semanalmente.

Para la instalación de tecnología silicio policristalino de Lima, el periodo bajo estudio ha sido de 49 meses, desde abril de 2015 hasta abril de 2019. Mientras que, para el sistema fotovoltaico situado en Juliaca, el periodo estudiado ha sido de 14 meses, desde marzo de 2019 a abril de 2020.

4.2.1 Índices de Rendimiento Mensuales

Las Figuras 14-17 muestran los índices de rendimiento $Y_{f,exp}$ y $Y_{r,exp}$ para las instalaciones de Arequipa, Tacna, Lima con tecnología silicio policristalino y Juliaca respectivamente, mientras que la Figura 18 representa los índices de rendimiento $Y_{A,exp}$ y $Y_{r,exp}$ para la instalación situada en Lima con tecnología silicio microamorfo. Es importante tener en cuenta que, aunque $Y_{r,exp}$ ha sido calculado a partir de los datos obtenidos de la célula calibrada de silicio monocristalino, existe una notable correlación entre la energía a la salida del sistema y el recurso solar, tanto para la parte de corriente continua en la instalación de Lima con tecnología silicio microamorfo como para la parte de corriente alterna en las instalaciones de Arequipa, Tacna, Lima con tecnología silicio policristalino y Juliaca.

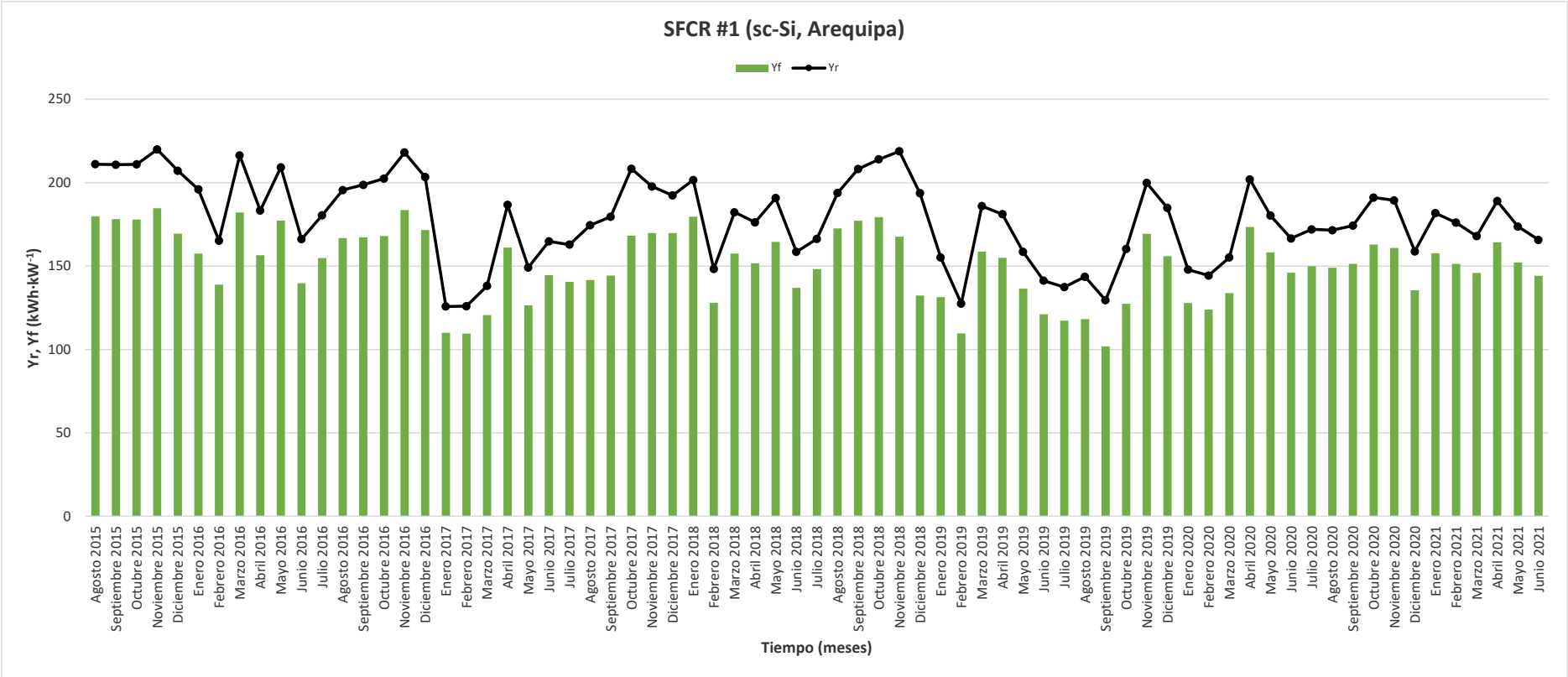


Figura 14. Valores de Yf y Yr para el SFCR situado en Arequipa durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

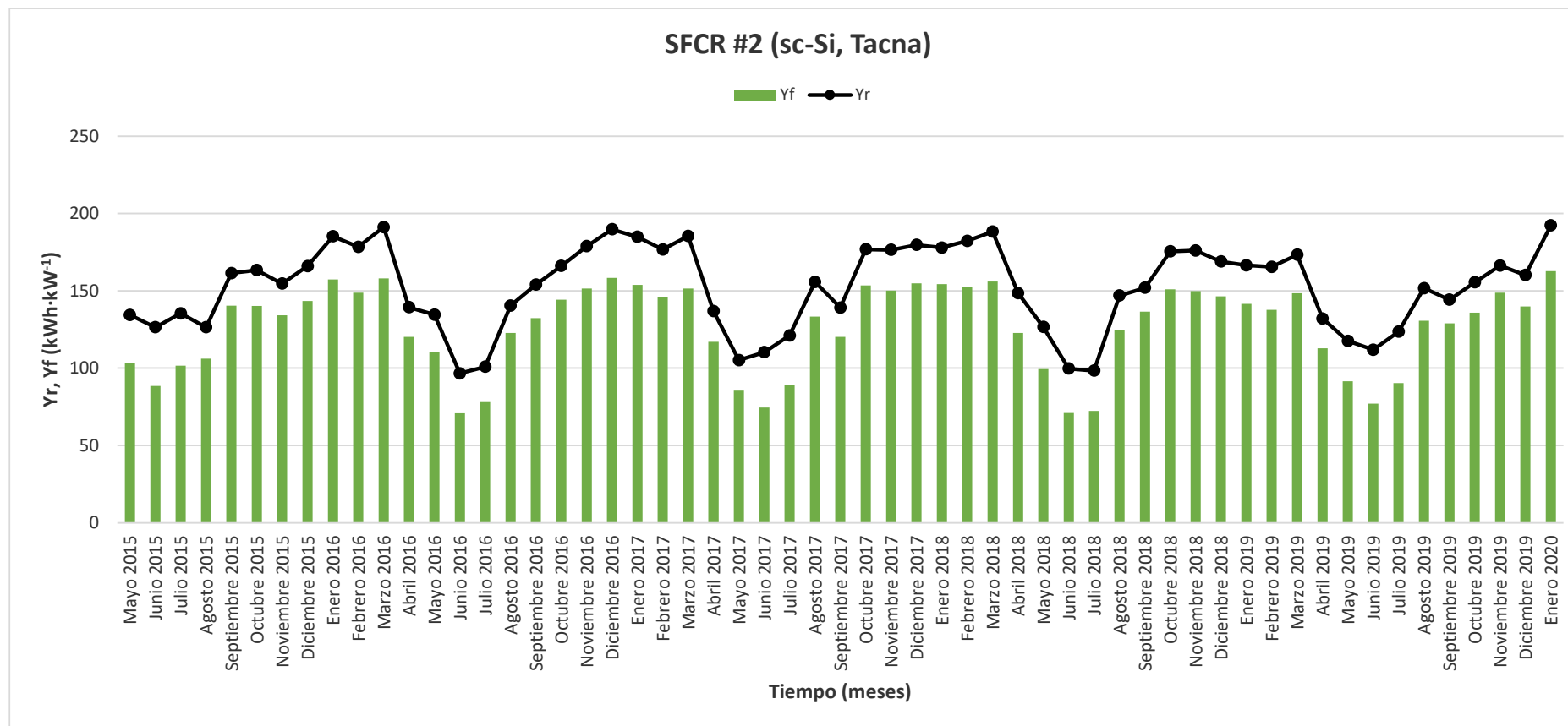


Figura 15. Valores de Yf y Yr para el SFCR situado en Tacna durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

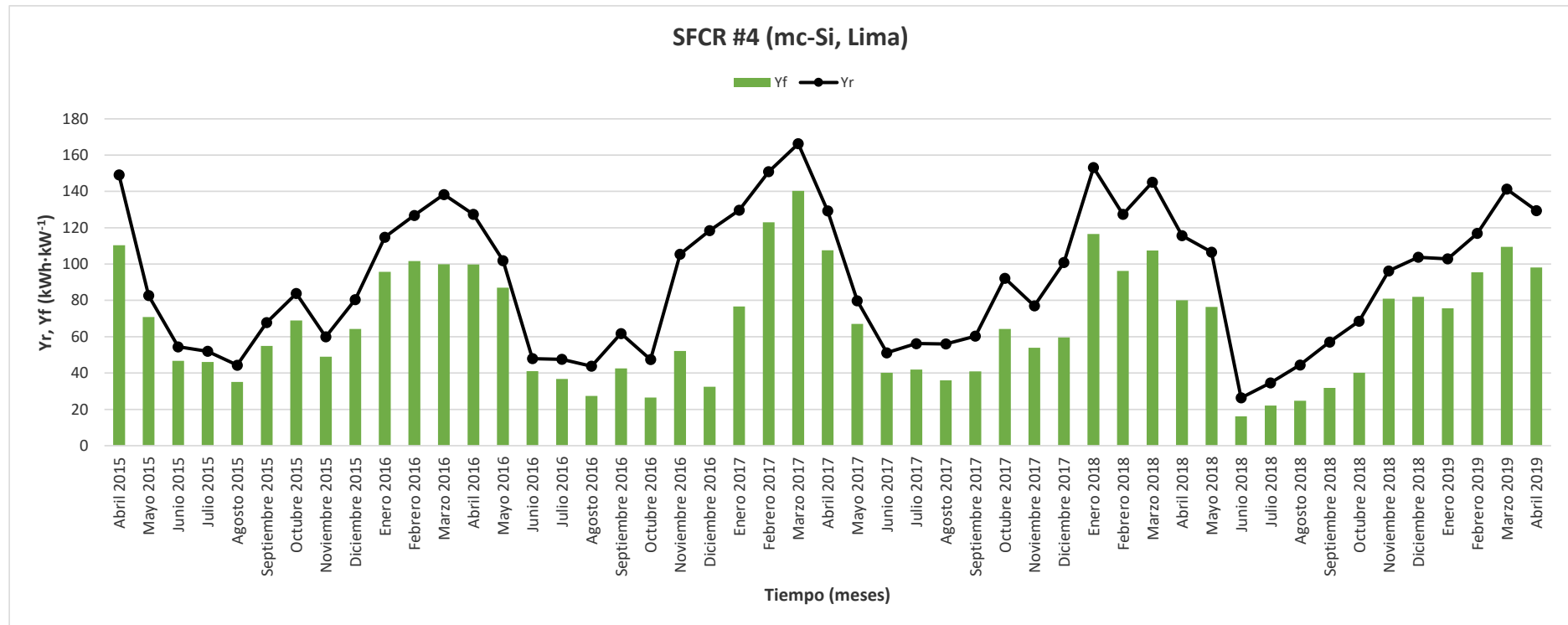


Figura 16. Valores de Yf y Yr para el SFCR situado en Lima con tecnología silicio mc-Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

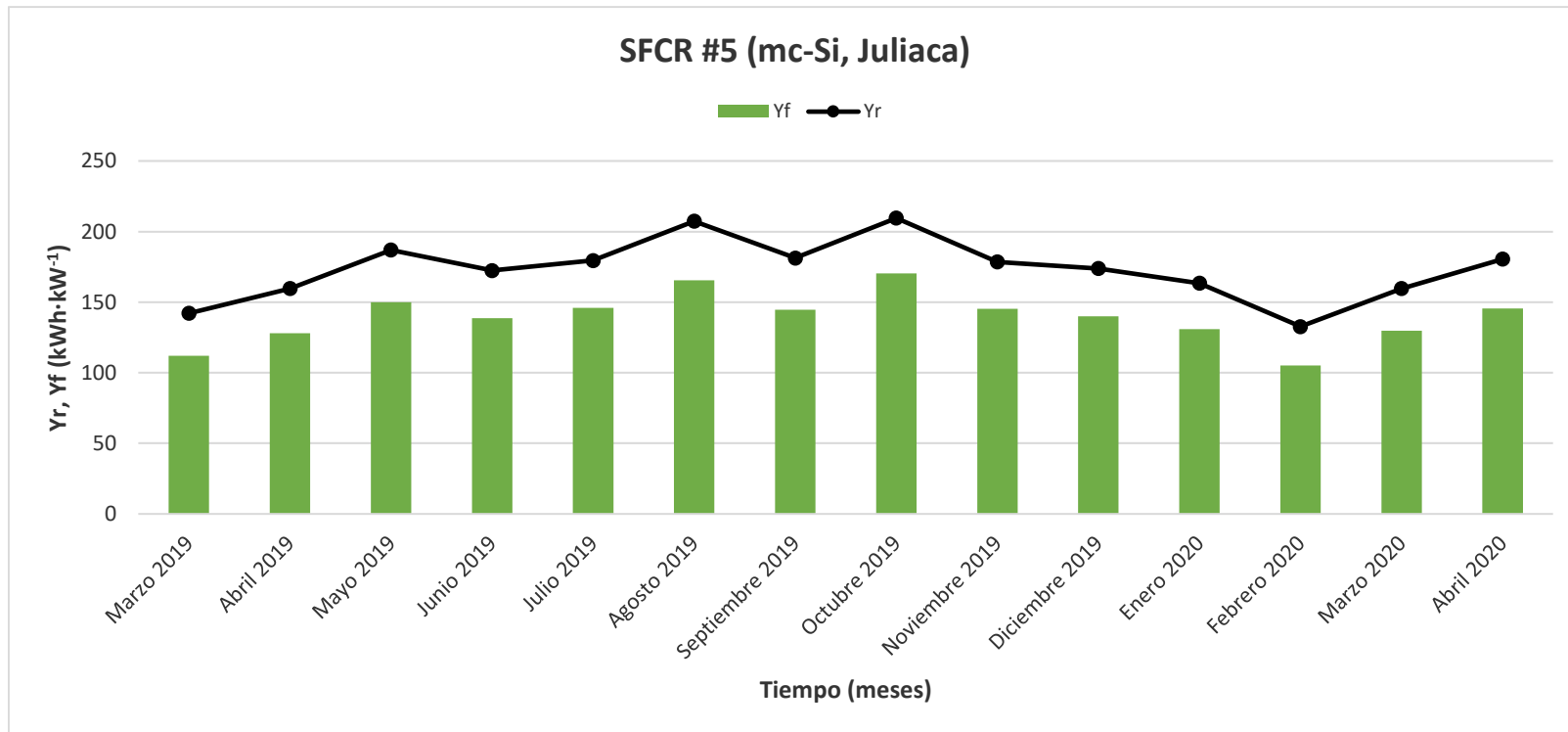


Figura 17. Valores de Yf y Yr para el SFCR situado en Juliaca durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

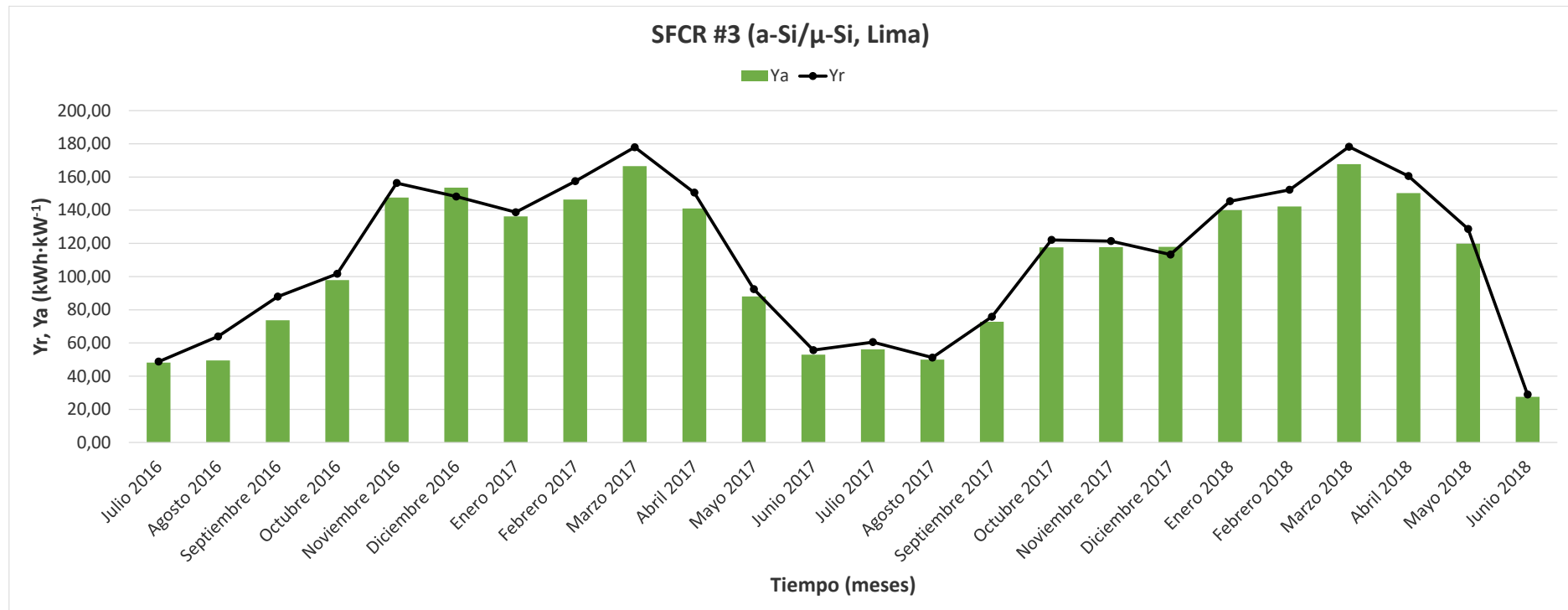


Figura 18. Valores de YA y Yr para el SFCR situado en Lima con tecnología a-Si/μ-Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

El sistema fotovoltaico situado en Arequipa, presenta un perfil de irradiación mensual bastante constante que se sitúa aproximadamente entre los 150 – 200 kWh·W⁻¹ para toda la campaña experimental. Por otro lado, donde se nota claramente el efecto de la estacionalidad es en la instalación situada en Tacna, donde los valores de $Y_{r,exp}$ han sido más altos en los meses de verano, que van desde diciembre a marzo, mientras que han sido más bajos en los meses de invierno, que van desde mayo a julio. Concretamente, la variación que puede llegar a experimentar el parámetro de $Y_{r,exp}$ entre una estación y otra para este sistema en Tacna puede llegar hasta casi los 100 kWh·W⁻¹.

Para la instalación situada en la ciudad de Juliaca, no se aprecia una clara relación entre la irradiación incidente y la estación del año. Sin embargo, la variación que puede llegar a experimentar el parámetro de $Y_{r,exp}$ entre un mes y otro puede llegar a ser de hasta casi los 80 kWh·W⁻¹.

Finalmente, se puede apreciar que el lugar donde se dispone de menos recurso solar es Lima. Ambas instalaciones experimentales situadas en esta ciudad presentan unos índices de rendimiento claramente menores que los de las instalaciones situadas en Arequipa, Tacna o Juliaca. En las instalaciones de Lima, es donde más se nota el efecto de la estacionalidad, por ejemplo, para la instalación de silicio microamorfo, los valores de $Y_{r,exp}$ pueden llegar hasta los 28,90 kWh·W⁻¹, como sucede para el mes de junio de 2018, o hasta los 178,21 kWh·W⁻¹, como sucede para el mes de marzo de 2018.

4.2.2 Factores de Rendimiento Mensuales

Las Figuras 19-22 muestran los valores de Performance Ratio experimental (PR_{exp}) para las instalaciones de Arequipa, Tacna, Lima con tecnología silicio policristalino y Juliaca respectivamente, mientras que la Figura 23 representa los valores de Performance Ratio experimental para la parte de corriente continua ($PR_{DC,exp}$) en la instalación de Lima con tecnología silicio microamorfo. Con el fin de obtener una mejor interpretación de estos parámetros, también se representan los valores medios mensuales de temperatura de módulo (T_{mod}) y temperatura ambiente (T_{amb}) para cada una de las instalaciones durante todo el

periodo bajo estudio. La temperatura tiene un gran impacto en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, de ahí la importancia de representar todos estos valores juntos y obtener así una visión global que permita entender mejor el impacto de la temperatura de los módulos fotovoltaicos sobre el rendimiento energético de un sistema fotovoltaico.

Durante la campaña experimental, se sufrieron en las instalaciones algunos problemas esporádicos de saturación del inversor durante ciertos meses de verano. Problemas causados por el subdimensionado del inversor respecto a la potencia pico instalada del generador fotovoltaico. Además, para la instalación de Tacna, se experimentaron ciertos problemas de sombreado durante algunos meses de invierno y otoño, afectando esto negativamente al rendimiento del sistema.

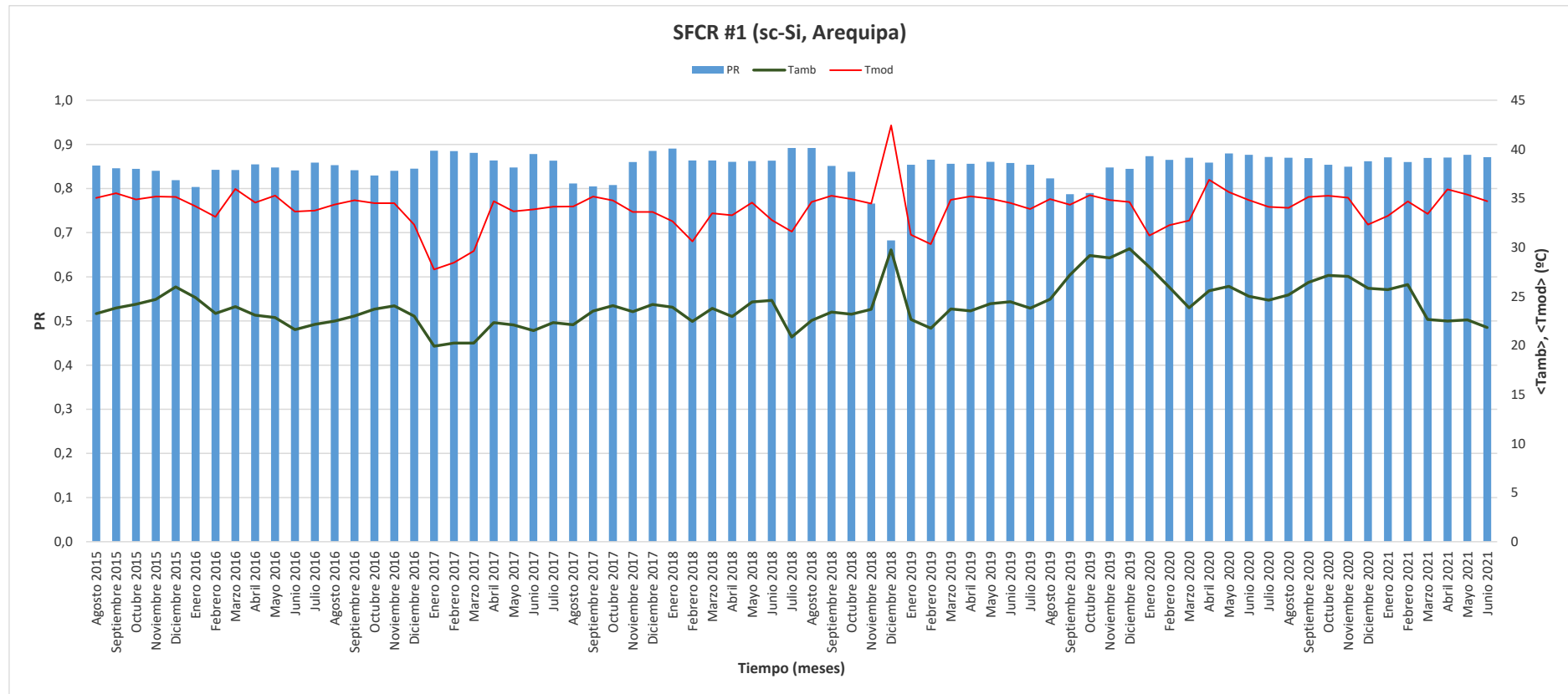


Figura 19. Valores de PR, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Arequipa durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

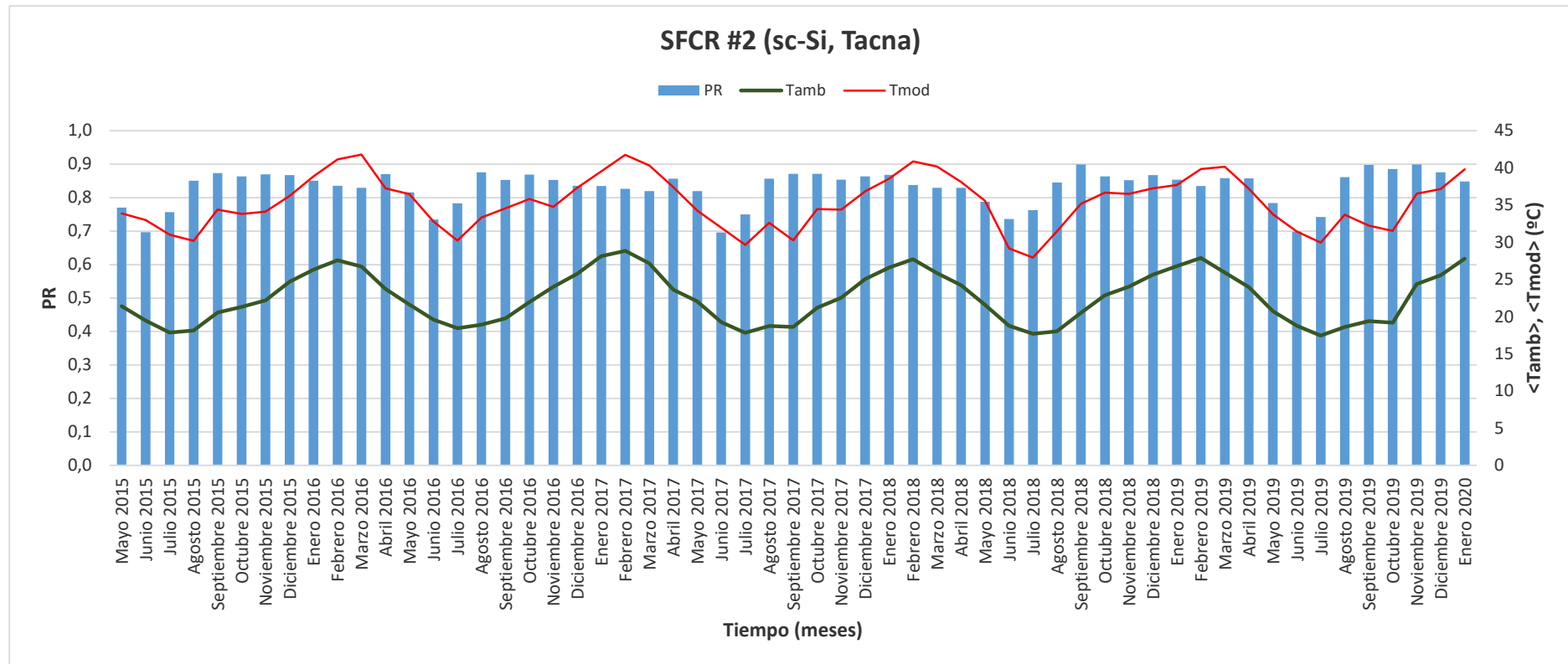


Figura 20. Valores de PR, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Tacna durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

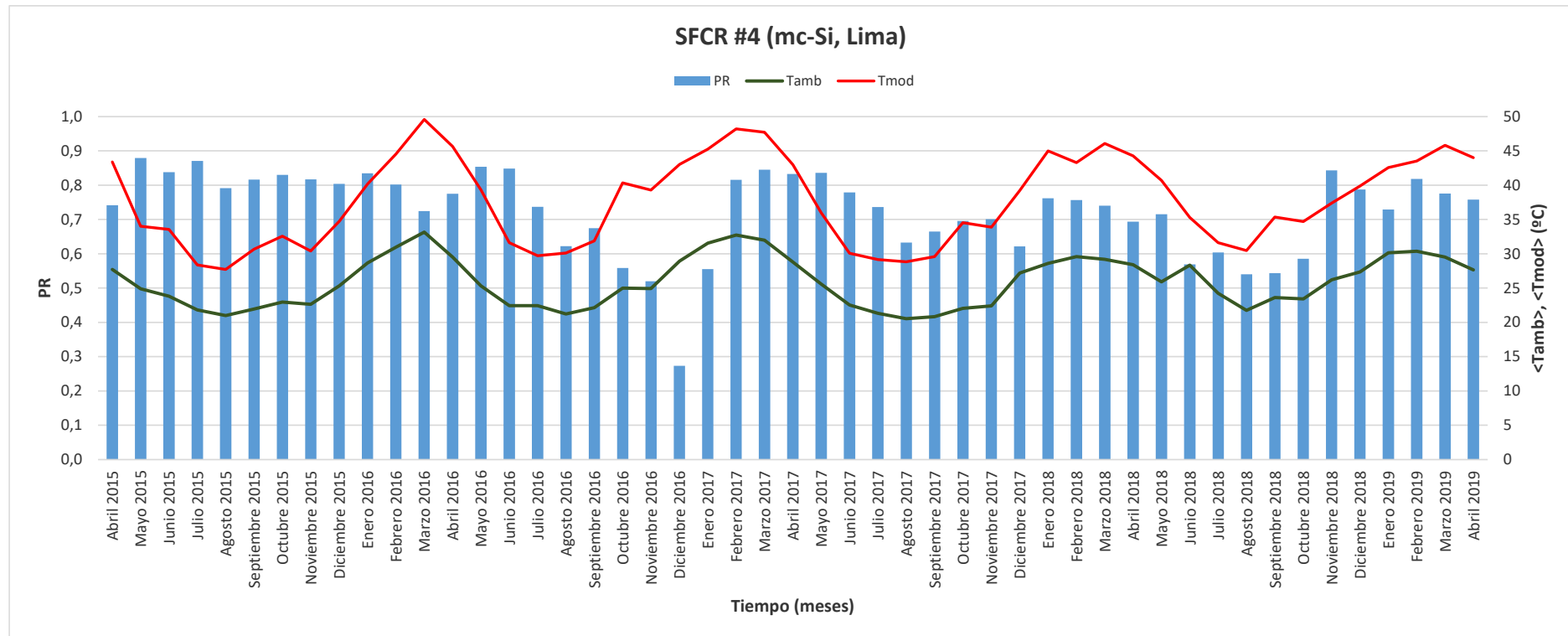


Figura 21. Valores de PR, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Lima con tecnología mc-Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

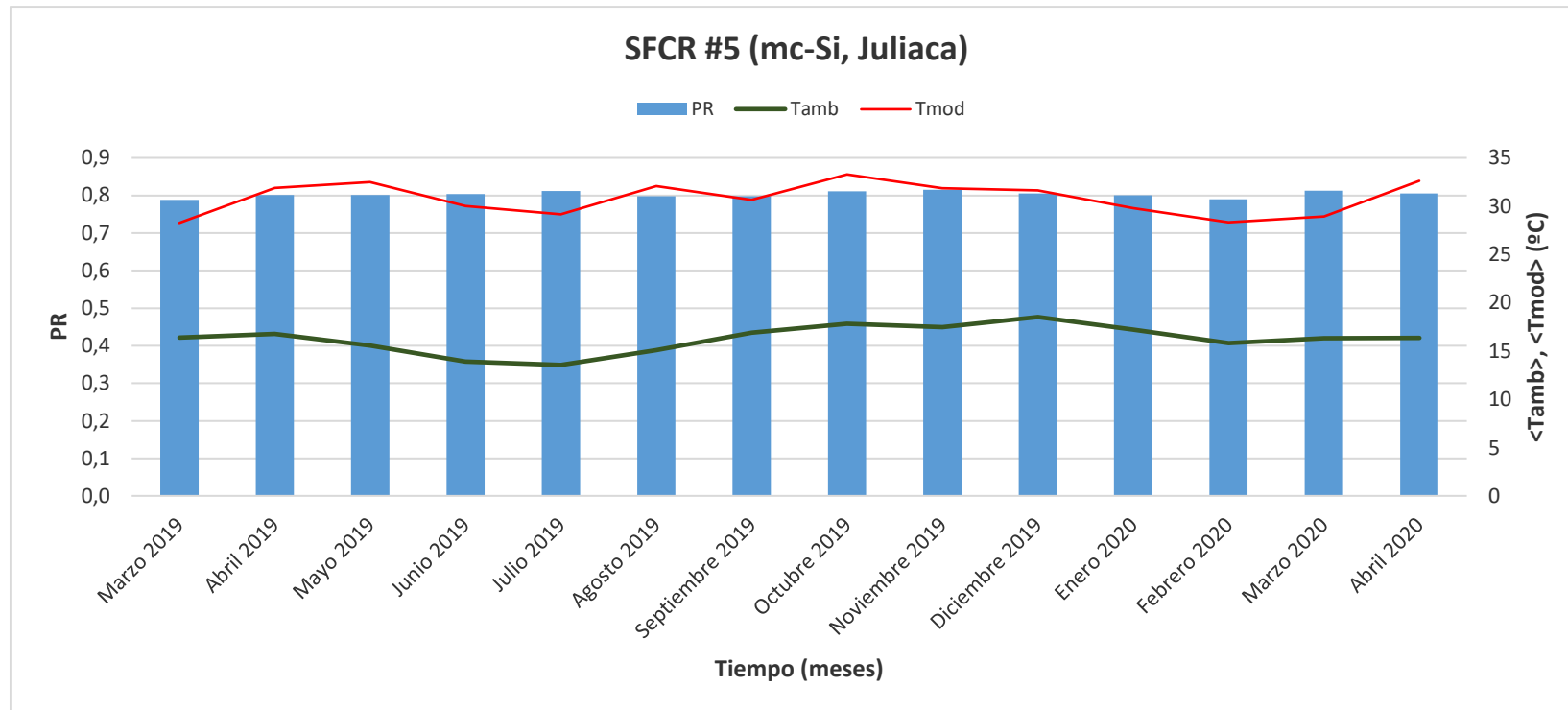


Figura 22. Valores de PR, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Juliaca durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

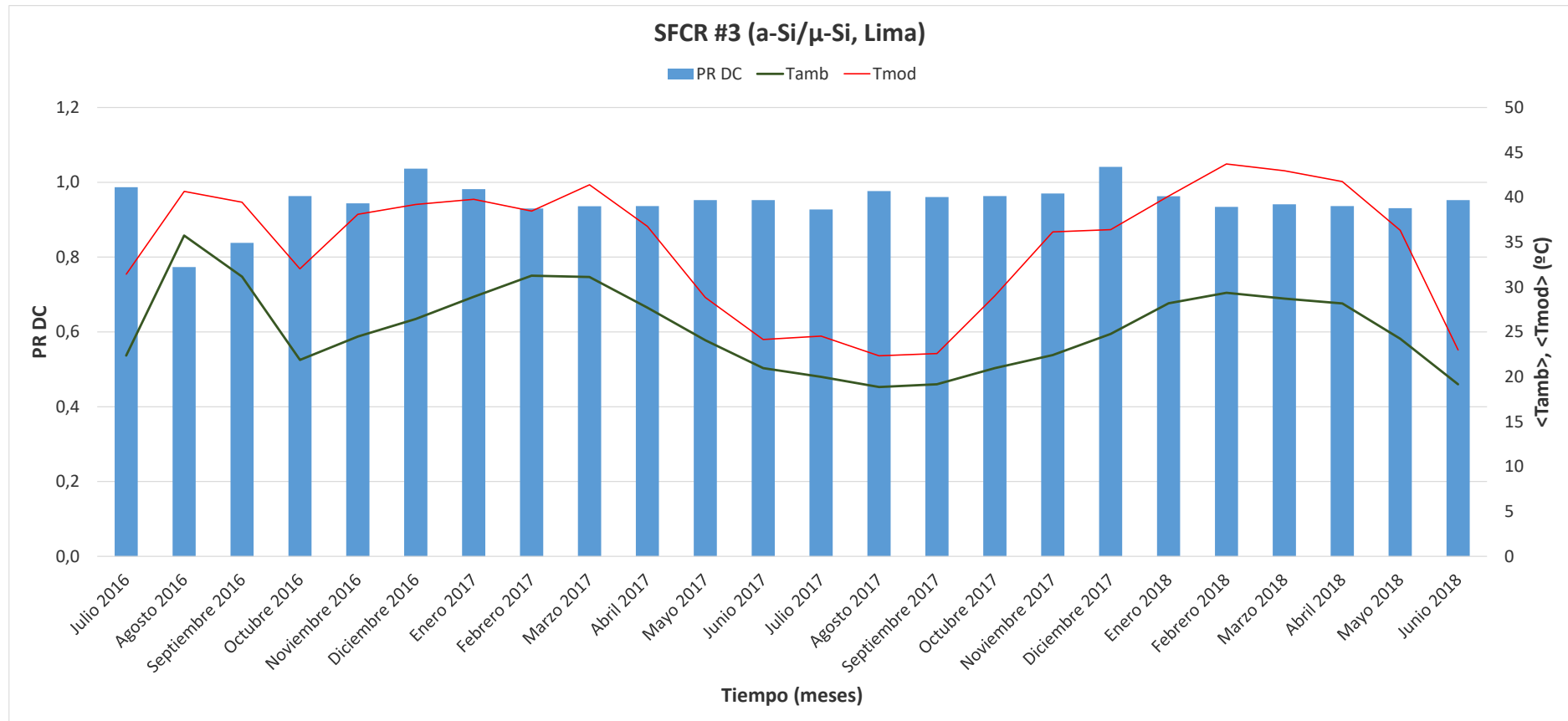


Figura 23. Valores de PR_{DC}, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Lima con tecnología a-Si/ μ -Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

En líneas generales, para la instalación de Arequipa se observa una cierta estabilidad en términos de rendimiento para prácticamente todo el periodo estudiado. Esto se debe a que el suave y constante viento en esta localidad hace que se mantenga la temperatura de los módulos en un margen de entre 28°C y 43°C. Así, los valores de PR fluctúan entre 0,68 y 0,89, con valores más altos o más bajos conforme disminuye o aumenta la temperatura de los módulos respectivamente.

La instalación situada en Tacna presenta un rendimiento marcado claramente por la estacionalidad. Los valores de PR varían entre 0,69 y 0,89 durante toda la campaña experimental y al contrario de lo que se creería, se presentan valores de PR más bajos en los meses invernales de junio y julio que en aquellos más cálidos. Esto se debe a que se produjeron pérdidas por sombreado en los meses de mayo a julio, donde el sol se encuentra en sus puntos más bajos, por la construcción de un edificio en las proximidades a esta instalación.

La instalación de silicio policristalino situada en Lima, presenta valores de PR ligados al efecto de la estacionalidad, produciéndose valores de PR más altos cuando las temperaturas son más bajas y viceversa. En la misma línea, la instalación de Juliaca, presenta valores constantes de PR durante todo el periodo estudiado, principalmente, por las suaves y estables temperaturas que se presentan en esta localidad para todo el año.

Finalmente, en el sistema fotovoltaico de Lima con tecnología silicio microamorfo, se presenta un rendimiento que no presenta relación con la estación del año. Los valores de PR varían entre 0,77 y 1,04 debido a las ganancias espectrales. El bajo coeficiente de temperatura para el punto de máxima potencia del silicio microamorfo hace que este sistema sea menos vulnerable a los efectos de la temperatura que aquellos sistemas de silicio monocristalino. Además, ciertos estudios sugieren que la tecnología de silicio microamorfo presenta un gran rendimiento en localidades con bajos niveles de irradiancia como Lima.

4.3 Resultados Aplicando Clase C

A continuación, para los sistemas fotovoltaicos de Arequipa, Tacna y Lima con tecnología silicio microamorfo se lleva a cabo su caracterización energética utilizando única y exclusivamente como datos de entrada aquellos datos de irradiación obtenidos de los servicios satelitales de libre acceso para el Perú. Todo esto, siguiendo la metodología descrita en el apartado 4.1.

Las Figuras 24-26 muestran los valores de PR para las instalaciones nombradas previamente aplicando Clase C.

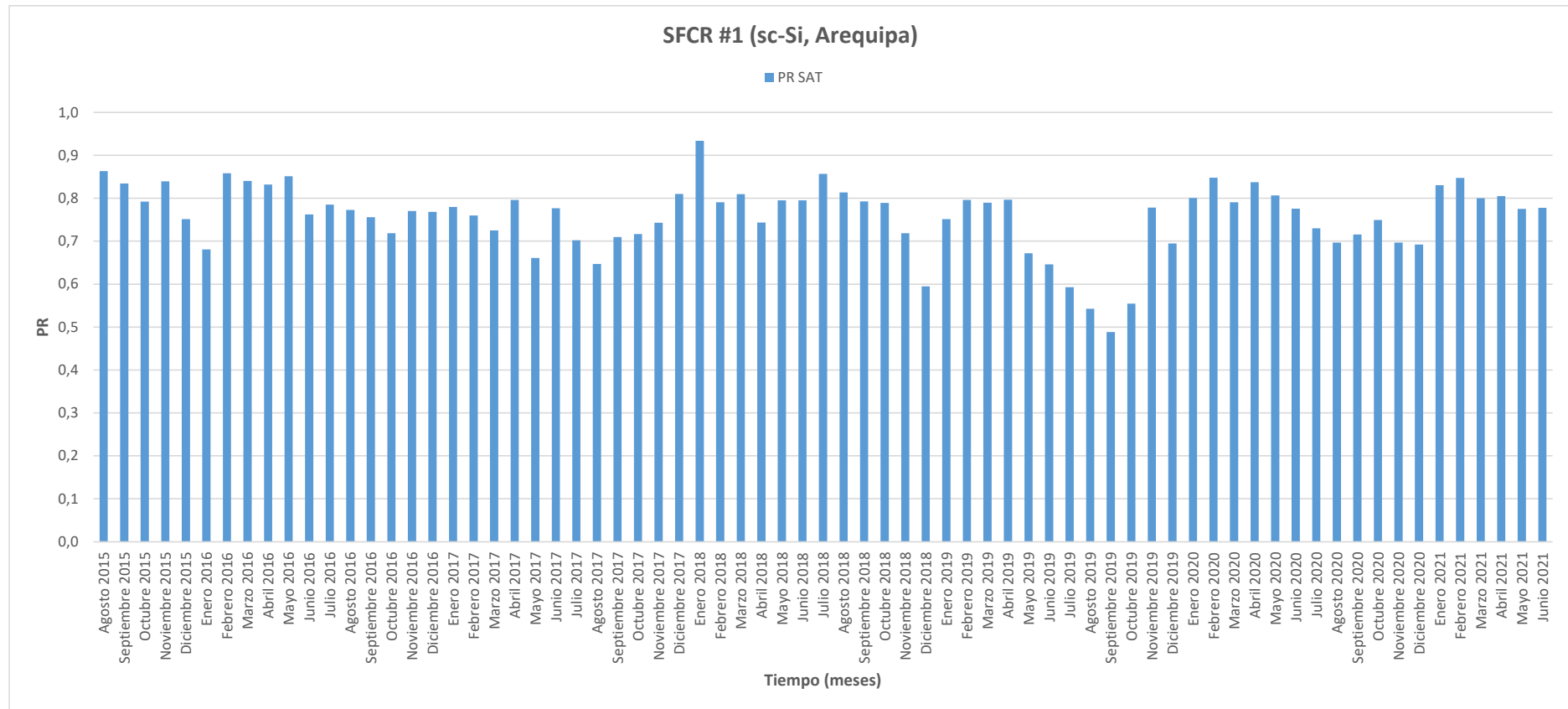


Figura 24. Valores de PR para el SFCR situado en Arequipa aplicando Clase C durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

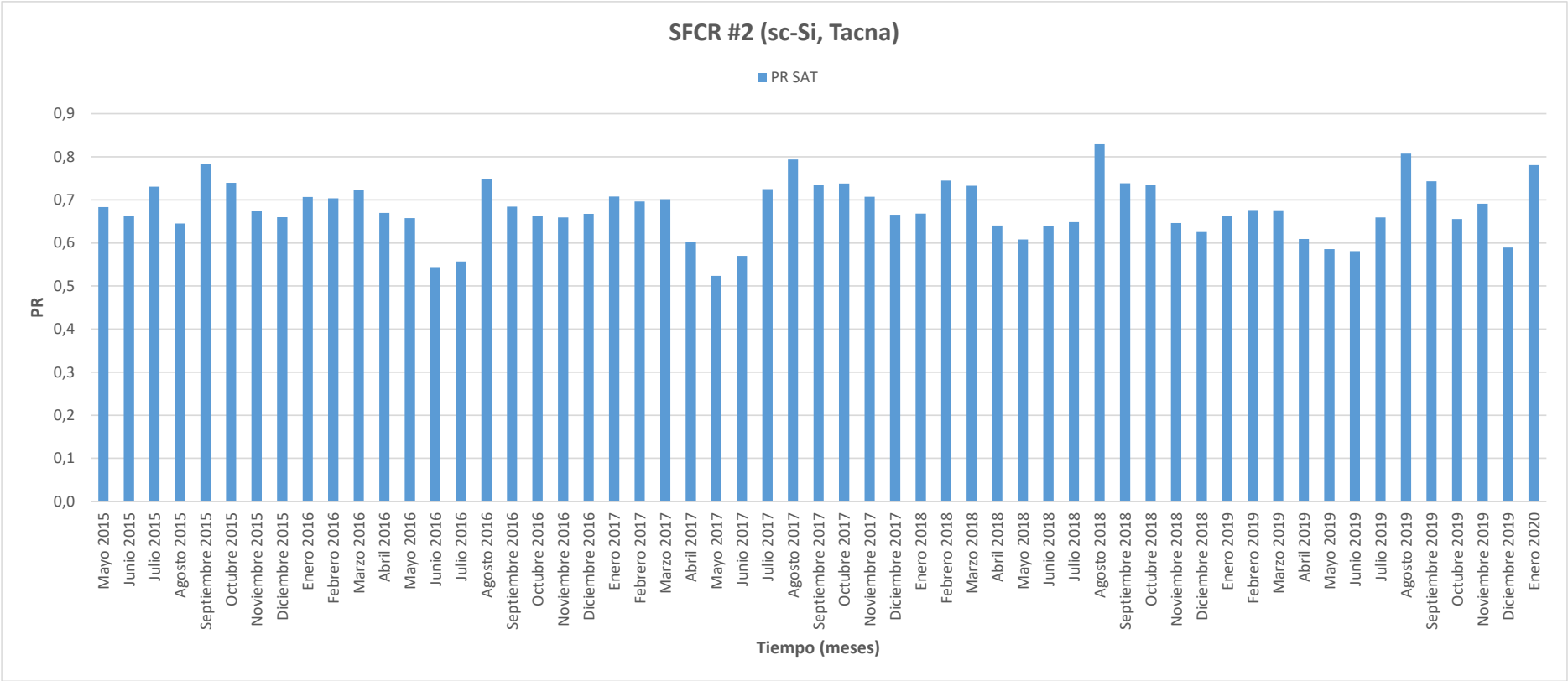


Figura 25. Valores de PR para el SFCR situado en Tacna aplicando Clase C durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

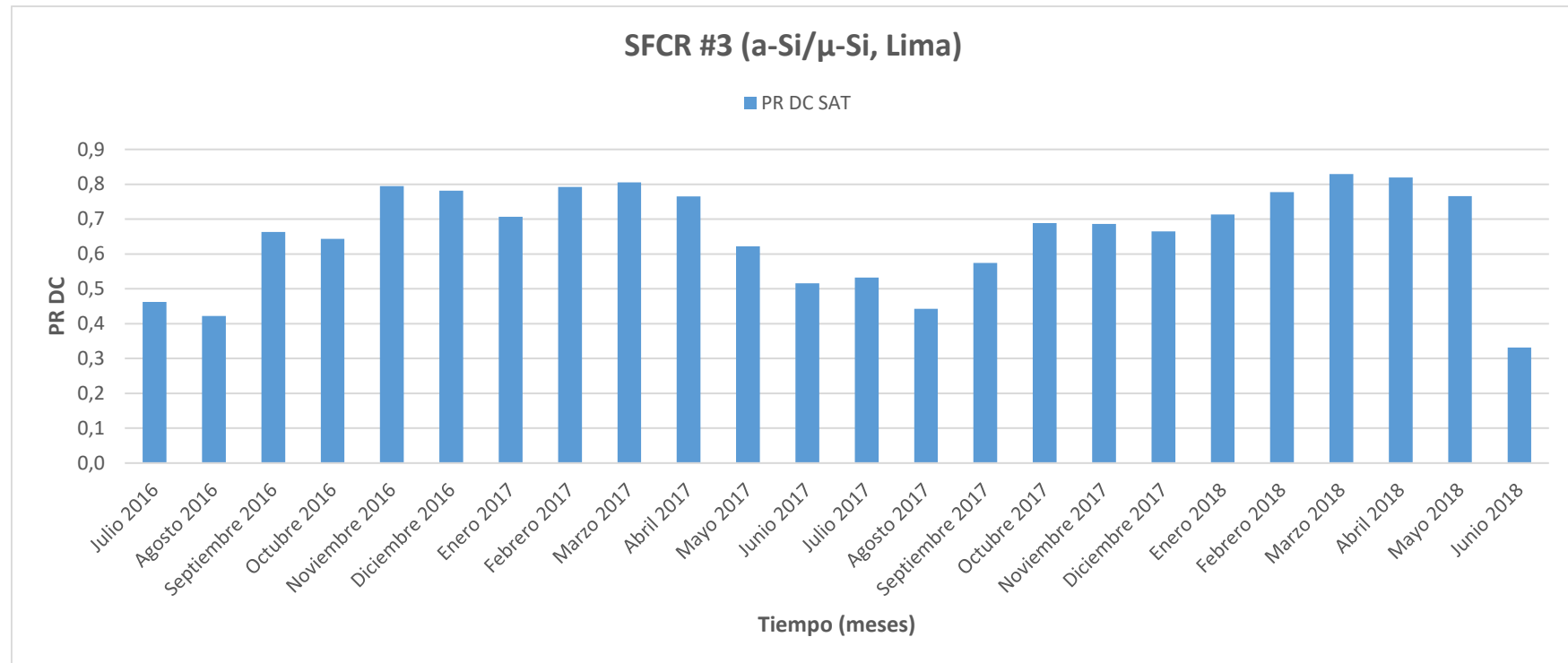


Figura 26. Valores de PR para el SFCR situado en Lima con tecnología a-Si/ μ -Si aplicando Clase C durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

Para la instalación de Arequipa, no se aprecia una constante en los valores de PR, obteniéndose fluctuaciones que varían desde valores de PR por debajo de 0,5 hasta valores de PR por encima de 0,9.

En Tacna, ocurre exactamente lo mismo que en Arequipa, fluctuaciones bastante grandes entre los diferentes valores de PR. Los valores de PR oscilan aproximadamente entre 0,5 y 0,8 para todo el periodo de estudio. El efecto de la estacionalidad en esta instalación es bastante notable.

Finalmente, en Lima, los valores de PR aplicando Clase C son bastante bajos, variando aproximadamente entre los valores de 0,3 y 0,8 para todo el periodo estudiado.

4.4 Comparativa Entre Clase B y Clase C

En este subapartado, los resultados obtenidos de la caracterización energética aplicando Clase C, se van a comparar con las medidas experimentales de funcionamiento, aplicando Clase B, de los tres sistemas elegidos durante todo el periodo estudiado. Además, se ha llevado a cabo una comparación diaria entre los diferentes factores de rendimiento, teniendo en cuenta para cada una de las instalaciones fotovoltaicas elegidas para la comparativa un mes de verano perfecto con 31 días de datos completos y un mes de invierno con las mismas condiciones.

4.4.1 Análisis Mensual

Las Figuras 27-29 muestran la comparativa entre los valores de PR_{exp} y PR_{sat} para las instalaciones de Arequipa y Tacna, al igual que la confrontación entre los valores de $PR_{DC,exp}$ y $PR_{DC,sat}$ para el sistema fotovoltaico en Lima.

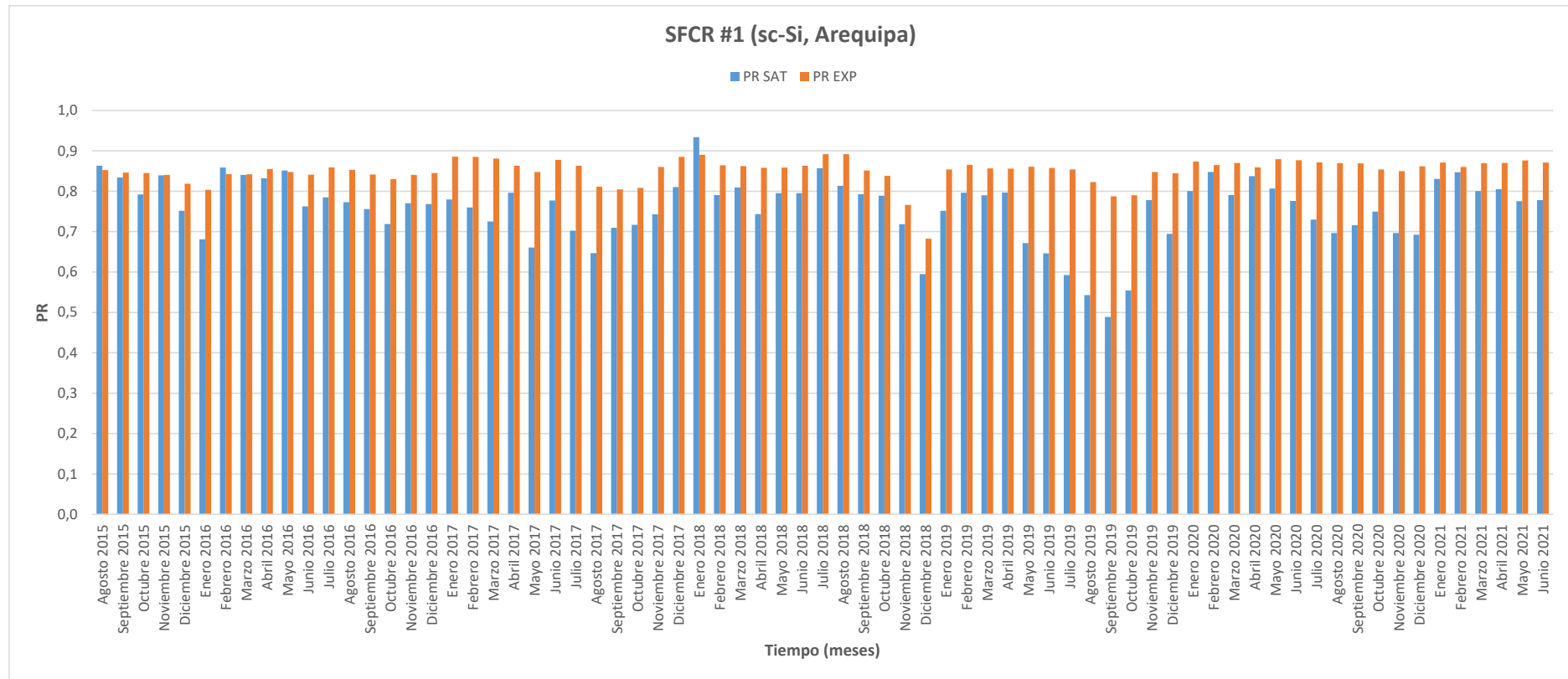


Figura 27. Variaciones entre los valores experimentales de PR y los valores de PR obtenidos aplicando Clase C para el SFCR en Arequipa durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

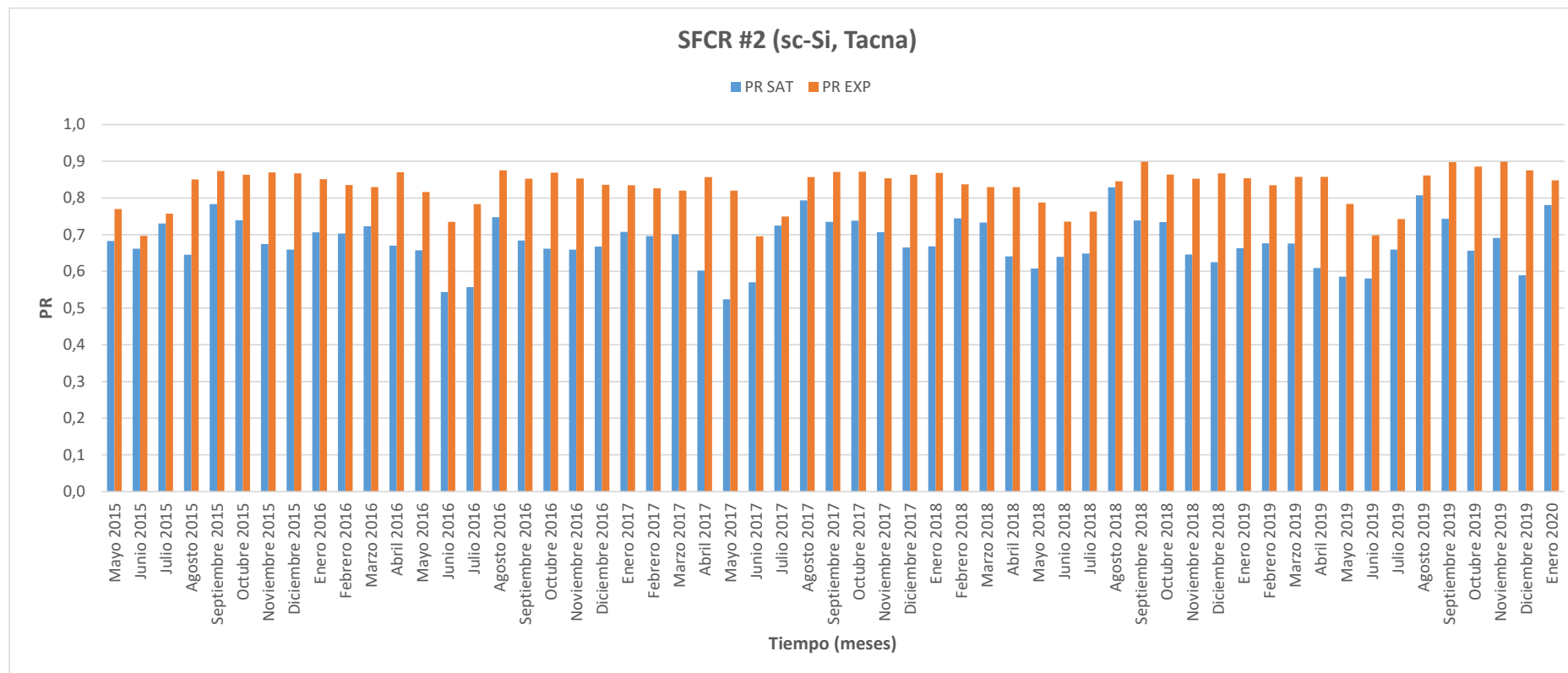


Figura 28. Variaciones entre los valores experimentales de PR y los valores de PR obtenidos aplicando Clase C para el SFCR en Tacna durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

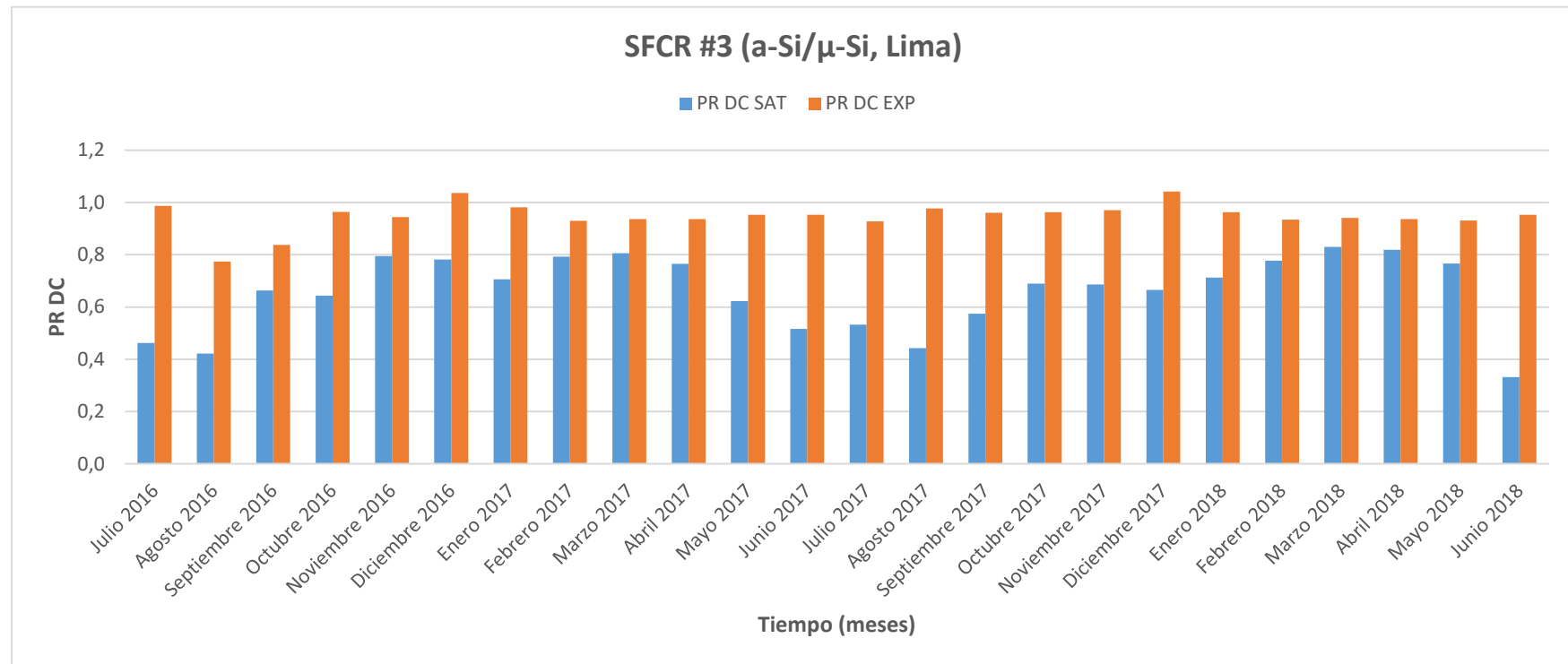


Figura 29. Variaciones entre los valores experimentales de PR y los valores de PR obtenidos aplicando Clase C para el SFCR en Lima con tecnología a-Si/μ-Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia

Para cada una de las tres instalaciones, se pueden observar notables discrepancias entre los valores medidos experimentalmente aplicando Clase B y los valores obtenidos de los sistemas aplicando Clase C. Siendo la instalación de Arequipa la que, a priori, presenta una menor diferencia con respecto a los otros dos sistemas de Tacna y Lima.

Para el sistema fotovoltaico en Arequipa, el valor de PR en Clase C oscila entre 0,50 y 0,95 sin verse muy afectado por la estacionalidad. En Tacna, la instalación presenta valores de PR en Clase C de entre 0,5 y 0,85 y, al igual que el parámetro de PR en Clase B, la influencia de las estaciones del año es notoria en sus valores a lo largo de todo el periodo bajo estudio. Finalmente, para la instalación fotovoltaica en Lima, los valores de PR_{DC} obtenidos del sistema aplicando Clase C oscilan entre 0,33 y 0,85. Donde claramente los valores de PR_{DC} para el sistema en Clase C, a lo largo de toda la campaña experimental, son mucho más bajos que los valores de PR_{DC} medidos in situ de manera experimental en Clase B.

En la Tabla 5 se recogen los valores mensuales de los parámetros calculados RMSE y MBE para todo el periodo estudiado. Para los tres SFCRs se presentan valores altos de RMSE y MBE, siendo el sistema fotovoltaico de Arequipa el que presenta los valores más bajos mientras que la instalación de Lima es la que presenta los valores más altos.

Sistema Fotovoltáico	RMSE (%)	MBE (%)
Arequipa	11,47	9,28
Tacna	16,47	15,17
Lima	32,10	28,86

Tabla 5. Valores mensuales de RMSE y MBE para los tres sistemas fotovoltaicos estudiados.
Fuente: Elaboración propia

Tal y como se puede apreciar para este análisis mensual, las diferencias existentes entre los parámetros reales o experimentales y los de Clase C son bastantes notables. Se llega a producir un error cuadrático medio de hasta el 32,10% como sucede para el caso del sistema fotovoltaico situado en Lima, el cual también presenta el sesgo medio del error más alto de los tres sistemas estudiados, cuyo valor llega hasta el 28,86%.

4.4.2 Análisis Diario

Según lo descrito previamente, con el objetivo de llevar a cabo un análisis diario de la caracterización energética de las tres instalaciones bajo estudio a partir de los datos obtenidos por satélite, se eligieron para cada uno de los sistemas un mes de verano perfecto con 31 días de datos completo y un mes de invierno con las mismas condiciones. La Tabla 6, presenta los resultados obtenidos de este análisis en el mes de verano para todas las instalaciones mientras que la Tabla 7 muestra los resultados hallados para el mes de invierno.

Sistema Fotovoltaico	RMSE (%)	MBE (%)
Arequipa	14,01	12,01
Tacna	20,79	19,74
Lima	21,68	16,24

Tabla 6. Valores diarios de RMSE y MBE en un mes de verano para los tres sistemas fotovoltaicos en estudio. Fuente: Elaboración propia

Sistema Fotovoltaico	RMSE (%)	MBE (%)
Arequipa	14,27	14,12
Tacna	24,89	8,23
Lima	42,81	33,13

Tabla 7. Valores diarios de RMSE y MBE en un mes de invierno para los tres sistemas fotovoltaicos en estudio. Fuente: Elaboración propia

Al igual que ocurre para el análisis mensual, tanto para el análisis diario del mes de verano como para el análisis diario del mes de invierno, se han presentado valores altos de los parámetros calculados RMSE y MBE. Siendo la instalación de Arequipa la que nuevamente presenta la diferencia más baja mientras que el sistema fotovoltaico de Lima es que el sigue presentando la mayor diferencia, alcanzando un valor de RMSE del 42,81% para el mes de invierno estudiado.

5. CONCLUSIONES

La elaboración de este estudio como TFM se ha realizado gracias a la aplicación de los conocimientos adquiridos a lo largo de las diferentes asignaturas que componen el Máster Universitario en Energías Renovables de la Universidad de Jaén.

La caracterización energética de estos sistemas fotovoltaicos utilizando exclusivamente como datos de entrada las variables meteorológicas ofrecidas por los diferentes servicios de satélite, ofrece notables discrepancias en comparación con las medidas experimentales de funcionamiento de los sistemas durante el periodo estudiado.

De este estudio se obtiene que se debe de ser cauto a la hora de llevar a cabo la predicción o evaluación del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos utilizando la información proporcionada por las fuentes satelitales. De los resultados se puede deducir que los datos satelitales tienden a sobreestimar el recurso solar y, en consecuencia, el rendimiento global real de los sistemas fotovoltaicos estudiados tiende a disminuir.

Por último, destacar que este trabajo ha sido presentado en formato de **comunicación oral** en las Jornadas Peruanas de Energía Solar 2021 (JOPES 2021). La revista **Journal of Physics: Conference Series**, publicada por el Institute of Physics e indexada en listas SJR, categoría “General Physics and Astronomy”, lo ha seleccionado para su posible publicación como artículo de investigación y actualmente se encuentra en fase de revisión. Se incluye en el anexo 1 del presente trabajo la versión final del artículo enviado a la revista, así como el certificado de presentación del trabajo en el congreso.

6. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

En concordancia con los resultados obtenidos de esta investigación, es importante recalcar que, aunque se trata de un estudio de primera aproximación y sus resultados no deben considerarse definitivos, gente con una amplia experiencia en el sector de la energía solar fotovoltaica afirma que es necesario ser prudente a la hora de utilizar los datos obtenidos de los satélites para la estimación y supervisión de los sistemas en Perú.

Por tanto, algo que se presenta como trascendental para obtener un mayor desarrollo de la energía solar fotovoltaica en el Perú, es seguir investigando. Y parece que el primer paso sería disponer de una red de estaciones meteorológicas certificadas que permitieran cotejar los datos proporcionados por los satélites con los datos medidos en tierra.

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

Figura 1. Participación en la producción de energía eléctrica según fuente energética en el Perú (2018). Fuente: GPAE-Osinergmin.....	6
Figura 2. Capacidad fotovoltaica instalada acumulada en el mundo. Fuente: Fraunhofer ISE.....	7
Figura 3. Instalación fotovoltaica localizada en Arequipa. Fuente: Espinoza R, et al. (2019).....	16
Figura 4. Instalación fotovoltaica localizada en Tacna. Fuente: Espinoza R, et al. (2019).....	17
Figura 5. Instalación fotovoltaica localizada en Lima. Fuente: Espinoza R, et al. (2019).....	17
Figura 6. Instalación fotovoltaica localizada en Lima tras los cambios realizados en su generador fotovoltaico. Fuente: UJAEN.....	18
Figura 7. Sistema de monitorización. Fuente: Espinoza R, et al. (2019).....	21
Figura 8. Página web de SoDa. Fuente: www.soda-pro.com.....	22
Figura 9. Graficador para el análisis de los datos experimentales. Fuente: UJAEN.....	24
Figura 10. Interfaz gráfica para el procesamiento de los datos experimentales. Fuente: UJAEN.....	24
Figura 11. Esquema de la metodología empleada en el estudio. Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 12. Instalación fotovoltaica localizada en la UNI. Fuente: UJAEN.....	30
Figura 13. Instalación fotovoltaica localizada Juliaca. Fuente: UJAEN.....	30
Figura 14. Valores de Yf y Yr para el SFCR situado en Arequipa durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 15. Valores de Yf y Yr para el SFCR situado en Tacna durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	33
Figura 16. Valores de Yf y Yr para el SFCR situado en Lima con tecnología silicio mc-Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 17. Valores de Yf y Yr para el SFCR situado en Juliaca durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 18. Valores de YA y Yr para el SFCR situado en Lima con tecnología a-Si/ μ -Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 19. Valores de PR, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Arequipa durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 20. Valores de PR, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Tacna durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 21. Valores de PR, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Lima con tecnología mc-Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 22. Valores de PR, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Juliaca durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 23. Valores de PRDC, Tamb y Tmod para el SFCR situado en Lima con tecnología a-Si/ μ -Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 24. Valores de PR para el SFCR situado en Arequipa aplicando Clase C durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 25. Valores de PR para el SFCR situado en Tacna aplicando Clase C durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 26. Valores de PR para el SFCR situado en Lima con tecnología a-Si/ μ -Si aplicando Clase C durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 27. Variaciones entre los valores experimentales de PR y los valores de PR obtenidos aplicando Clase C para el SFCR en Arequipa durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 28. Variaciones entre los valores experimentales de PR y los valores de PR obtenidos aplicando Clase C para el SFCR en Tacna durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 29. Variaciones entre los valores experimentales de PR y los valores de PR obtenidos aplicando Clase C para el SFCR en Lima con tecnología a-Si/ μ -Si durante el periodo bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	52

Tablas

Tabla 1. Clasificación de los diferentes sistemas de monitorización y sus aplicaciones propuestas. Fuente: IEC 61724-1:2017	12
Tabla 2. Parámetros medidos o estimados de entrada y de salida requeridos para el sistema de monitorización de clase C. Fuente: IEC 61724-1:2017	13
Tabla 3. Descripción de las instalaciones en Arequipa y Tacna. Fuente: UJAEN	18
Tabla 4. Descripción de la instalación en Lima. Fuente: UJAEN	19
Tabla 5. Valores mensuales de RMSE y MBE para los tres sistemas fotovoltaicos estudiados. Fuente: Elaboración propia	53
Tabla 6. Valores diarios de RMSE y MBE en un mes de verano para los tres sistemas fotovoltaicos en estudio. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 7. Valores diarios de RMSE y MBE en un mes de invierno para los tres sistemas fotovoltaicos en estudio. Fuente: Elaboración propia.....	55

BIBLIOGRAFÍA

Documentación y libros consultados

- Ise.fraunhofer.de. 2021. [online] Available at: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>> [Accessed 27 June 2021].
- Allied Market Research. [online] Available at: <<https://www.alliedmarketresearch.com/solar-energy-market>> [accessed on 27 June 2021].
- Osinergmin.gob.pe. 2021. [online] Available at: <https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf> [Accessed 27 June 2021].
- Molina, P., 2021. Argentina, Chile, México y Perú, entre los países con mejor potencial de la fotovoltaica del mundo. [online] pv magazine Latin America. Available at: <<https://www.pv-magazine-latam.com/2020/08/07/argentina-chile-mexico-y-peru-entre-los-paises-con-mejor-potencial-de-la-fotovoltaica-del-mundo/>> [Accessed 27 June 2021].
- Moser D, Buono M Del, Jahn U, Herz M, Richter M and Brabandere K De 2017 Identification of technical risks in the photovoltaic value chain and quantification of the economic impact Prog. Photovoltaics Res. Appl. 25 592–604.
- Balaska A, Tahri A, Tahri F and Stambouli A 2017 Performance assessment of five different photovoltaic module technologies under outdoor conditions in Algeria Renewable Energy 107 53-60.
- Gracia Amillo A, Huld T and Müller R 2014 A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation Remote Sens 6 8165–8189.
- Habte A, Sengupta M and Lopez A 2017 Evaluation of the National Solar Radiation Database (NSRDB): 1998–2015 National Renewable Energy Laboratory Technical Report NREL/TP-5D00-67722.

- J.S. Stein, W.F. Holmgren, J. Forbess, and C.W. Hansen, “PVLIB: Open-Source Photovoltaic Performance Modeling Functions for MATLAB and Python,” in 43rd Photovoltaic Specialists Conference, 2016.
- IEC 61724-1 2017 Photovoltaic System Performance Part 1: Monitoring, 1st ed., International Electrotechnical Commission (IEC) Switzerland.
- Espinoza R, Muñoz-Cerón E, Aguilera J and De la Casa J 2019 Feasibility evaluation of residential photovoltaic self-consumption projects in Peru Renewable Energy 136 414-427.
- Romero-Fiances I, Muñoz-Cerón E, Espinoza-Paredes R, Nofuentes G and De la Casa J 2019 Analysis of the Performance of Various PV Module Technologies in Peru Energies 12 186.
- Colantuono G, Everard A, Hall L and Buckley A 2014 Monitoring nationwide ensembles of PV generators: Limitations and uncertainties. The case of the UK Solar Energy 108 252–263.
- Carr A and Pryor T 2004 A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates Solar Energy 76 285-294.
- Thevenard D and Pelland S 2013 Estimating the uncertainty in long-term photovoltaic yield predictions Solar Energy 91 432-445.
- Apuntes de las asignaturas del Máster Universitario en Energías Renovables de la UJA, curso académico 2020/2021.

Páginas web consultadas

- news.soliclima.com
- ec.europa.eu/jrc/en/pvgis
- www.soda-pro.com
- power.larc.nasa.gov/data-access-viewer
- www.nrel.gov
- dv.ujaen.es
- tauja.ujaen.es
- pvlib-python.readthedocs.io
- pandas.pydata.org

SOFTWARE UTILIZADO

- MATLAB.
- Anaconda with Python 3.8.
- PVGIS.
- App.diagrams.net
- Microsoft Excel.
- Microsoft Word.

ANEXO 1: JOPES 2021

Certificado de participación



Presentación utilizada



Is the information provided by satellite sources suitable for predicting or evaluating the performance of photovoltaic systems in Peru? (In memoriam to Heinrich Berg)

C.A. Espinosa-González¹, J. R. Angulo², L. A. Conde², A. M. Carhuavilca², E. F. Alfaro³, R. Espinoza³,
J. A. Töfflinger² and J. de la Casa^{1†}

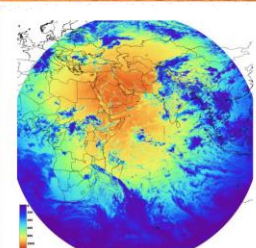
¹IDEA Research Group, Electronics and Automation Engineering Department, University of Jaen, Spain
²MatER Research Group, Science Department, Pontifical Catholic University of Peru
³Renewable Energy Center - CER, National Engineering University. Lima, Peru



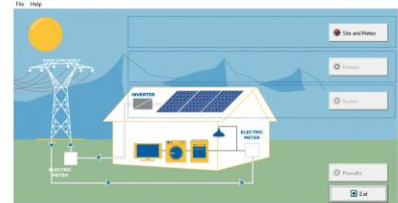
Objectives

Solar data sources based on satellite-based estimates:

- Provide meteorological data of interest for PV systems design or operation.
- Contribute to the development of the technology worldwide.



https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/sg_201508010900.png



Solar Energy Services for Professionals



<http://www.soda-pro.com/web-services#radiation>

- Necessity to contract the solar radiation data based on satellite images by means of comparisons with the data measured at ground level.



This is known as the validation of the data.

2






Objectives

- A number of scientific papers have presented validation results for the satellite solar radiation data used in PVGIS by comparing with ground station measurements.

Location	Latitude	Longitude	% difference between satellite and station		Reference
			PVGIS-CMSAF	PVGIS-SARAH	
Lindenberg (DE)	52.22N	14.12E	-3.4	-3.2	[1,3]
Liepāja (LV)	56.48N	21.02E	+2.5	NA	[4]
Sonnblick (AT)	47.05N	12.95E	-14.0	NA	[4]
A Coruña (ES)	43.37N	8.42W	+11.0	NA	[4]
Lleida (ES)	41.62N	0.60W	+2.4	NA	[4]
Madrid (ES)	40.45N	3.72W	-0.3	NA	[4]

[1] Faiman, D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. Prog. Photovolt. Res. Appl. 2008, 16, 307-315.

[3] Gracia Amillo, A.; Huld, T.; Müller, R. A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation. Remote Sens. 2014, 6, 8165-8169.

[4] Habte A.; Sengupta M. and Lopez A. Evaluation of the National Solar Radiation Database (NSRDB): 1998-2015. National Renewable Energy Laboratory Technical Report NREL/TP-5D00-67722. 2017.

3






IEC 61724: 2017 Standard

- Monitoring system classifications and suggested applications:

Typical applications	Class A High accuracy	Class B Medium accuracy	Class C Basic accuracy
Basic system performance assessment	X	X	X
Documentation of a performance guarantee	X	X	
System losses analysis	X	X	
Electricity network interaction assessment	X		
Fault localization	X		
PV technology assessment	X		
Precise PV system degradation measurement	X		

Class B and Class C monitoring system classifications allow the use of satellite estimates of meteorological variables.

- Measured parameters and requirements for class C monitoring system:

Parameter	Symbol	Units	Monitoring purpose	Required?
				Class C - Medium accuracy
INPUT				
In-plane irradiance (POA)	G_i	W-m ⁻²	Solar resource	✓ or E
Ambient air temperature	T_{amb}	°C	Estimation of PV temperatures	✓ or E
ELECTRICAL OUTPUT				
Output power (AC)	P_{out}	kW	Energy output	✓
Output energy	E_{out}	kWh		✓

$$PR_{DC} = \frac{Y_a}{Y_r} = \frac{\frac{E_A}{P_0}}{\frac{H_i}{G^*}}$$

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{\frac{E_{out}}{P_0}}{\frac{H_i}{G^*}}$$

4

IEC 61724-1, Photovoltaic System Performance Part 1: Monitoring, 1st ed., International Electrotechnical Commission (IEC), Switzerland, Geneva, 2017.






IEC 61724: 2017 Standard



Final users can use the class C monitoring system described by the IEC Standard, using exclusively satellital data, in order to check the correct operation of their photovoltaic installations. The purpose of this study is to show if it is suitable to establish this verification method in Peru if free access satellite sources are used.

5






Experimental Setup: "Emergiendo con el Sol" Project

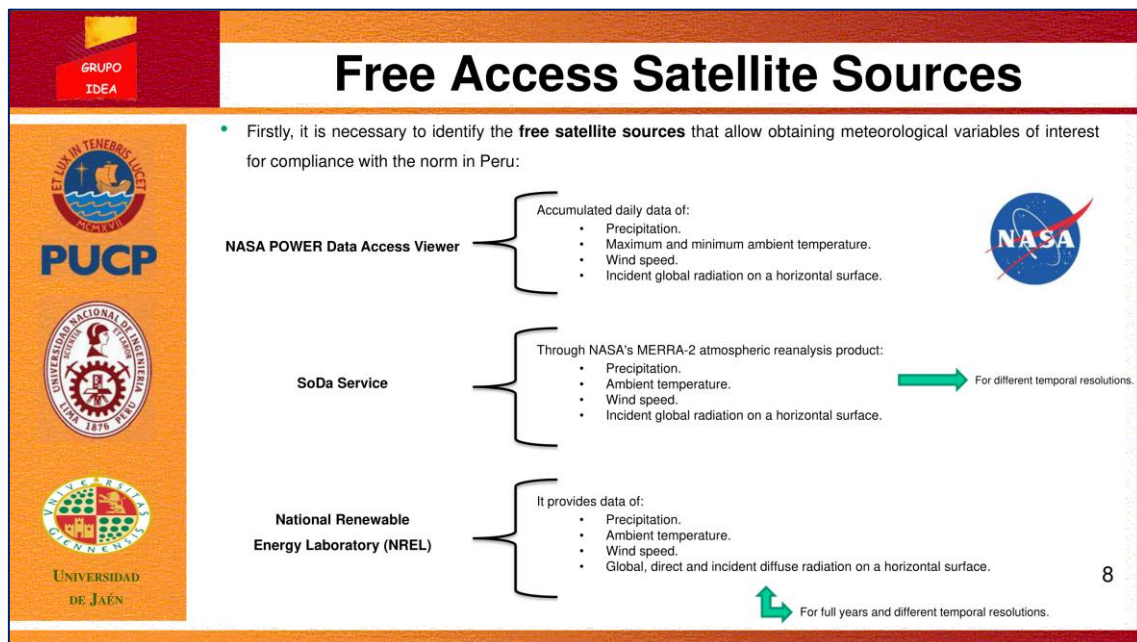
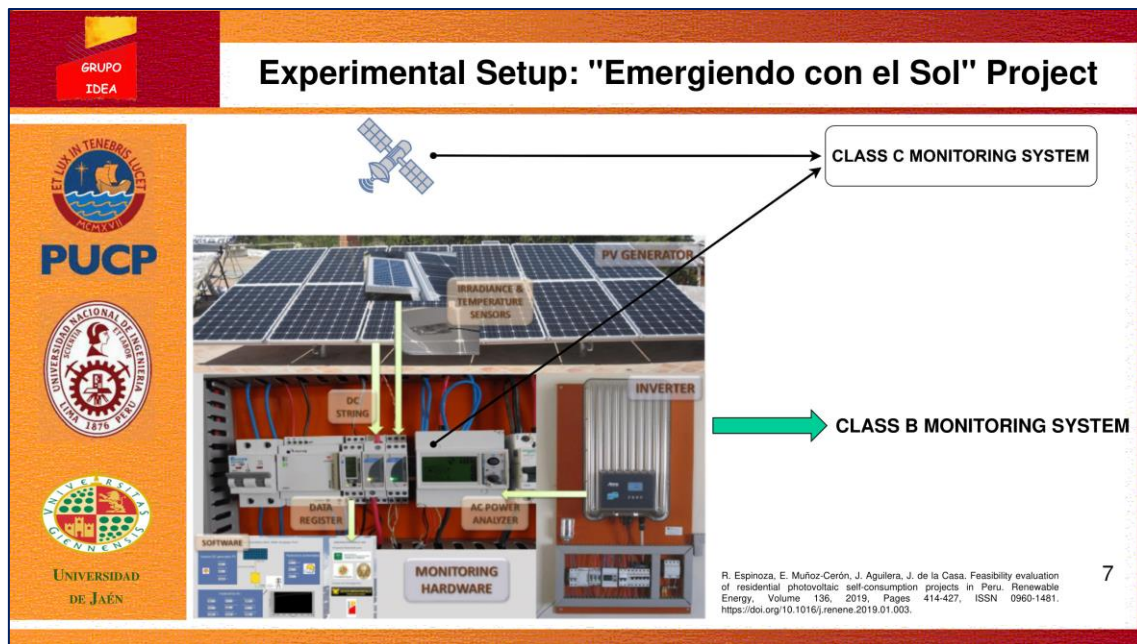
Electrical parameter	PVGCS #1 and #2 (Arequipa and Tacna, sc-Si)	PVGCS #3 (Lima, a-Si/ μ c-Si)
Maximum power at STC (W)	3300	3456
Short-circuit current at STC (A)	8.9	10.35
Open-circuit voltage at STC (V)	460	538
Module maximum power at STC (W)	270	128
Temperature coefficient (1/°C)	-0.0045	-0.0024

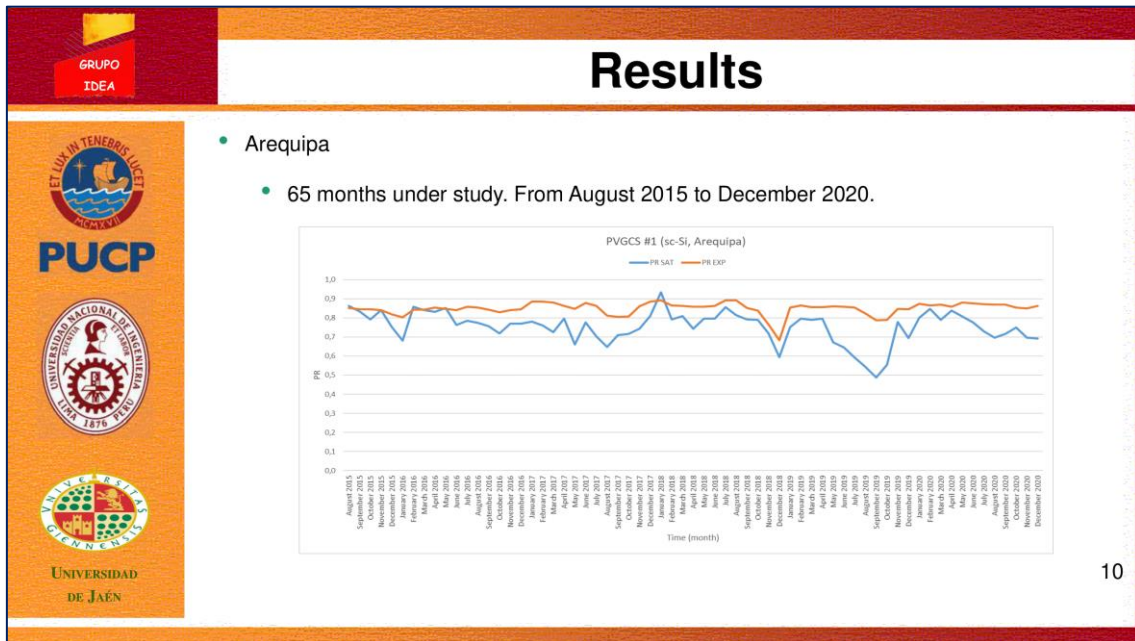
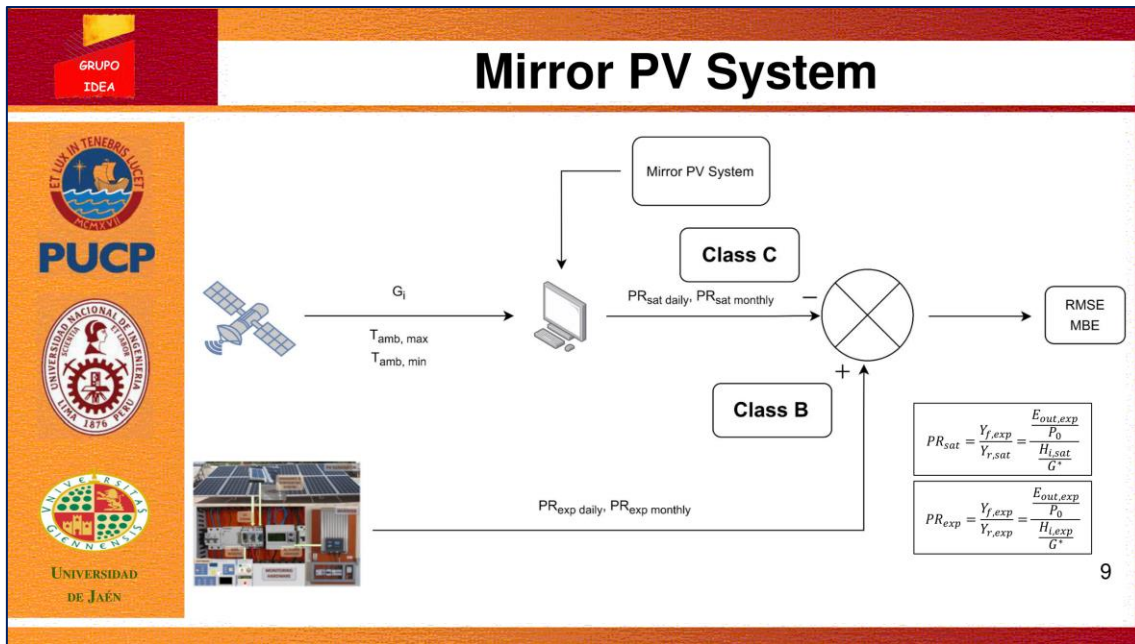


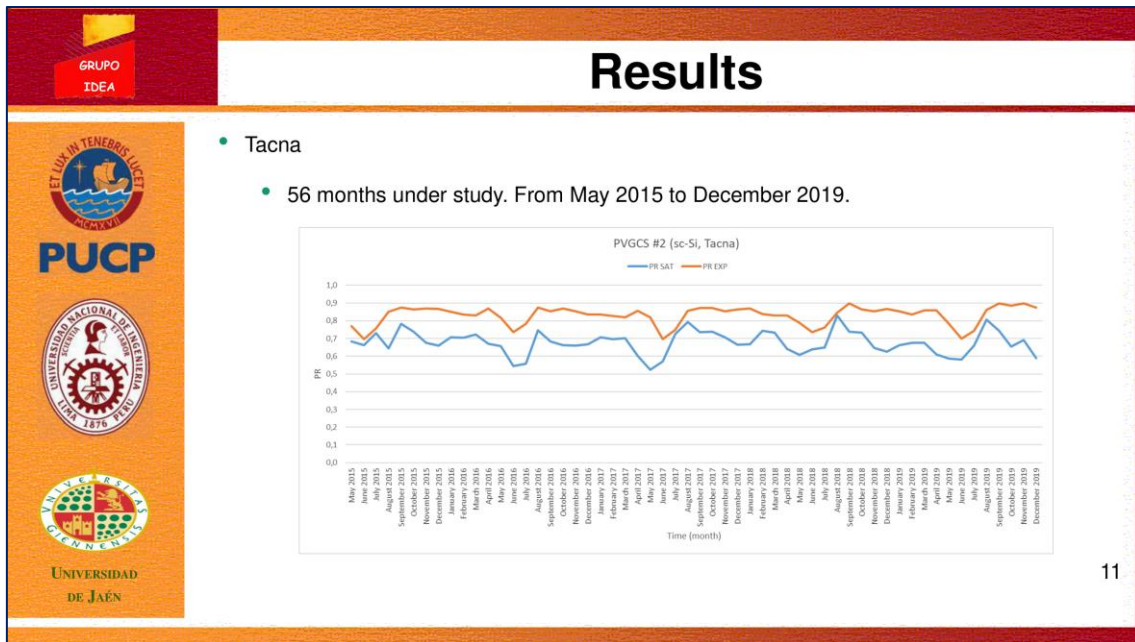


Romero-Fiances, I. ; Muñoz-Cerón, E. ; Espinoza-Paredes, R. ; Nofuentes, G. ; De la Casa, J. Analysis of the Performance of Various PV Module Technologies in Peru. Energies 2019, 12, 186. <https://doi.org/10.3390/en12010186>

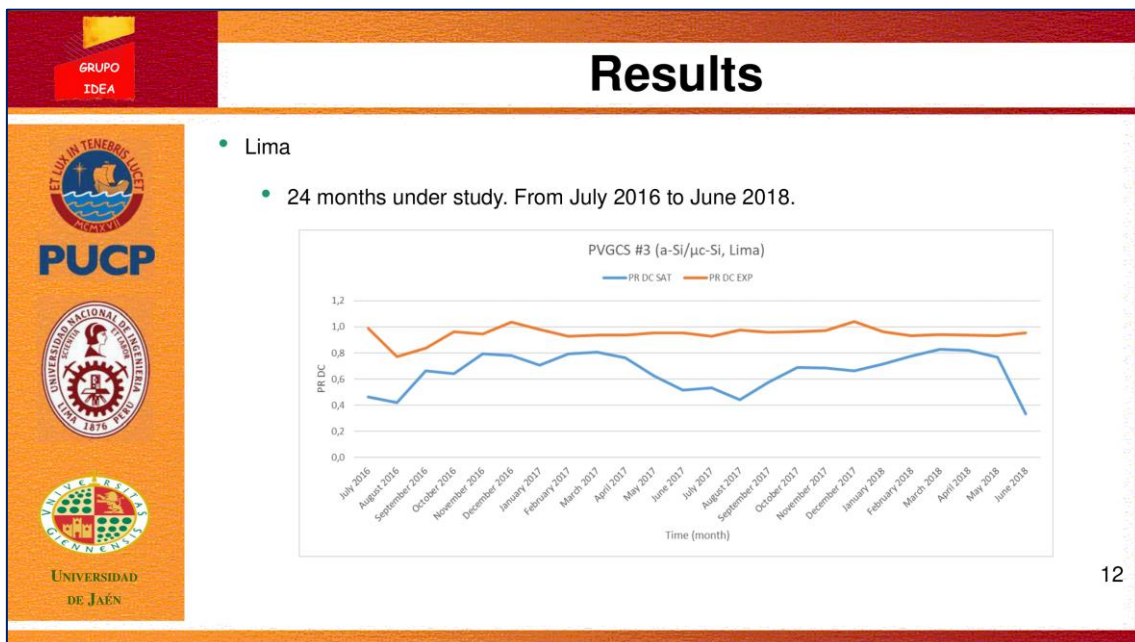
6







11



12



Error Analysis – RMSE and MBE

- RMSE: dispersion of the mirror PV system.
- MBE: over or under estimation of the mirror PV system.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (PRsat_i - PRexp_i)^2}{n}}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (PRexp_i - PRsat_i)}{n}$$

$PRsat_1, PRsat_2, \dots, PRsat_n$ are mirror PV system estimates of performance ratio.

$PRexp_1, PRexp_2, \dots, PRexp_n$ are experimental measures of performance ratio.

n is the number of observations.

	Monthly Error	
	RMSE	MBE
Arequipa	11,80%	9,55%
Tacna	16,59%	15,33%
Lima	32,10%	28,86%

	Daily Summer Error	
	RMSE	MBE
Arequipa	14,01%	12,01%
Tacna	20,79%	19,74%
Lima	21,68%	16,24%

	Daily Winter Error	
	RMSE	MBE
Arequipa	14,27%	14,12%
Tacna	24,89%	8,23%
Lima	42,81%	33,13%

13



Conclusions

- The energy characterization of these photovoltaic systems using as input the satellite data, offers notable discrepancies in compare with the experimental measures.
- Satellite data tend to overestimate the solar resource and, in consequence, the real global performance of the three photovoltaic systems tend to decrease.
- Although this is a first approximation study and its results should not be considered definitive.
- Further research is needed and it seems that the first step would be to have a network of certified weather stations that would allow the data provided by satellite to be cross-checked with ground data.





	Monthly Error	
	RMSE	MBE
Arequipa	11,80%	9,55%
Tacna	16,59%	15,33%
Lima	32,10%	28,86%

14

Artículo de investigación en fase de revisión**Is the information provided by satellite sources suitable for predicting or evaluating the performance of photovoltaic systems in Peru? (In memoriam to Heinrich Berg)**

C A Espinosa-González¹, J R Angulo², L A Conde², A M Carhuavilca², E F Alfaro³, R Espinoza³, J A Töfflinger², E Muñoz-Cerón¹ and J de la Casa^{1*}

¹ IDEA Research Group, Electronics and Automation Engineering Department, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas s/n. 23071-Jaén, Spain

² Materials Science and Renewable Energies (MatER-PUCP), Science Department, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32, Peru

³ Renewable Energy Centre, National University of Engineering, Av. Túpac Amaru 210 Rímac, Lima, Peru

* Correspondence: delacasa@ujaen.es

Abstract. At present, there are free access online platforms that offer, free of charge, meteorological data on Peru; however, there is no study that validates the goodness of its use in the country. These types of tools are of the utmost interest, both in the design phase of photovoltaic systems PV and in the subsequent process of analysis and evaluation of their operation if it is intended to implement monitoring systems with Class B or C precision defined in the IEC 61724: 2017 standard. In this work, the consistency of the data offered by any of these platforms and their usefulness will be analysed when they are contrasted with experimental data on the operation of real systems.

1. Introduction

Photovoltaics is a fast growing market but since the introduction of large-scale photovoltaic (PV) installations, the majority of them have been installed in temperate climates such as those in Europe, Japan, and North America [1]. Allowing a bigger development of the technology in these areas in compare with those where the installation of photovoltaic systems have been much less. Nevertheless, in the last years, there has been an increase of the demand for solar energy in emerging markets [2], located specially in tropical and subtropical regions. In these areas, the need arises to carry out largely amount of researches to maximize the solar potential. Missing information on the exhibition of PV advances in these regions, can prompt technical dangers and negative financial effects in the execution of PV projects [3].

To assess the performance of a PV system, dependable information of the power and its behaviour under various meteorological conditions is required [4]. Solar data sources based on satellite-based estimates provide meteorological data of interest for PV systems' design or operation anywhere on the world. This fact has allowed the popularization of many applications or computer platforms, both free distribution and paid, that contribute to the development of the technology worldwide.

As indicated in [5] for the case of the PVGIS platform, it is necessary to contrast the solar radiation data based on satellite images by means of comparisons with the data measured at ground level.

Validation of satellite data is commonplace and numerous papers have been published dealing with data validation for different locations around the world. In this regard, the validation of PVGIS tool satellite data can lead to overestimates of 11% and underestimates of up to 14%, depending on the locality studied [6]. However, as far as the authors are aware, no such theoretical analysis has been carried out for Peru. In this research, it is not intended to carry out a data validation study because there is no a certified laboratory for measuring surface irradiance, but what is intended is to use the data provided by the satellites to compare them with real system operation data.

In order to check the correct operation of a determined photovoltaic installation using exclusively satellite data as input parameters, a final user can use the class C monitoring system described by the standards of the International Electrotechnical Commission (IEC); the reference standard is IEC61724-1 [7]. The main objective of this work is to use freely available satellite data in Peru to compare it with real data on the operation of photovoltaic systems installed in three different locations.

2. Materials and methods

2.1. Experimental setup

Within the framework of the "Emergiendo con el Sol" project, three PV grid-connected systems (PVGCS) were installed in Peru with their respective monitoring systems [8]. These three PVGCS were installed in different locations in Peru and have been considered for this study. PVGCS #1 is located at the National University of San Agustín in Arequipa, PVGCS #2 was installed at the National University of Jorge Basadre Grohmann in Tacna and PVGCS #3 is located at the National University of Engineering in Lima [9]. During the last five years, both the electrical variables and the environmental variables of interest that allow the application of the IEC61724-1 standard [7] have been measured and recorded. This standard defines three classifications - Class A, B and C - of monitoring systems based on the number of variables that must be measured in situ and the precision of the measurement. The systems defined as class B and C being those that allow the use of satellite estimates of meteorological variables.

The uncertainties and measurement errors of irradiance were mitigated as the climatic and soil effects are intrinsically considered in the estimations [10-12]. More detailed descriptions of these PVGCS, including the monitoring systems used in each, can be found in [8, 9].

2.2. Free access satellite sources

In order to develop this research, in the first place, it is necessary to identify the free access satellite sources that allow obtaining meteorological variables of interest for compliance with the norm in Peru. The NASA POWER Data Access Viewer, from the SSE-Renewable Energy option, provides accumulated daily data of precipitation, ambient temperature, wind speed and incident global radiation on a horizontal surface. Through NASA's MERRA-2 atmospheric reanalysis product, data on ambient temperature, wind speed, precipitation and incident global radiation on a horizontal surface are obtained for different temporal resolutions. Both platforms offer solar data estimated with a delay of only two days. The National Renewable Energy Laboratory (NREL) provides data on precipitation, ambient temperature, wind speed, global radiation, direct radiation, and incident diffuse radiation on a horizontal surface for full years and different temporal resolutions.

Although there are different free access satellite services for Peru, all of them depend on the data provided by NASA. Therefore, NASA is considered as the parent data source.

2.3. Mirror PV system

The method used to obtain the results of this research is based on the philosophy of the mirror or digital twin system that simulates the behaviour of the experimental installation with the difference that the environmental parameters used as input come from satellite estimations. Thus, the mirror PV system is a class C monitoring system.

The mirror PV system is nothing more than a deterministic model of the real operation of the experimental PV installation. A grid-connected photovoltaic system, like any other engineering system, can be modelled with different levels of complexity, such as a mathematical model of constant

coefficients. Daily and monthly performance metrics for both experimental and simulated systems were calculated for the three PVGCS under study, as recommended in the IEC61724-1 standard [7]. Performance ratio (PR) was calculated for the PV installations in Arequipa and Tacna. Whereas DC performance ratio (PR_{DC}) was calculated for the PV installation in Lima.

The simulated performance ratio (PR_{sat}) and the simulated DC performance ratio ($PR_{DC,sat}$) are given by the following equations:

$$PR_{sat} = \frac{Y_{f,exp}}{Y_{r,sat}} = \frac{\frac{E_{out,exp}}{P_0}}{\frac{H_{i,sat}}{G^*}} \quad (1) \quad PR_{DC,sat} = \frac{Y_{A,exp}}{Y_{r,sat}} = \frac{\frac{E_{A,exp}}{P_0}}{\frac{H_{i,sat}}{G^*}} \quad (2)$$

Where $Y_{f,exp}$ ($\text{Wh}\cdot\text{W}^{-1}$) is the experimental final yield of the PV system, $Y_{r,sat}$ ($\text{Wh}\cdot\text{W}^{-1}$) is the reference yield obtained from the satellite data, $E_{out,exp}$ (Wh) is the experimental AC output energy of the photovoltaic system, P_0 (W) is the PV system rating, $H_{i,sat}$ ($\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$) is the in-plane irradiation obtained from the satellite data, G^* ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) is the reference in-plane irradiance ($1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) at which P_0 was determined, $Y_{A,exp}$ ($\text{Wh}\cdot\text{W}^{-1}$) is the experimental PV array energy yield and $E_{A,exp}$ (Wh) is the experimental DC energy of the PV array.

The experimental performance ratio (PR_{exp}) and the experimental DC performance ratio ($PR_{DC,exp}$) are calculated as follows:

$$PR_{exp} = \frac{Y_{f,exp}}{Y_{r,exp}} = \frac{\frac{E_{out,exp}}{P_0}}{\frac{H_{i,exp}}{G^*}} \quad (3) \quad PR_{DC,exp} = \frac{Y_{A,exp}}{Y_{r,exp}} = \frac{\frac{E_{A,exp}}{P_0}}{\frac{H_{i,exp}}{G^*}} \quad (4)$$

Where $Y_{r,exp}$ ($\text{Wh}\cdot\text{W}^{-1}$) is the experimental reference yield and $H_{i,exp}$ ($\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$) is the experimental in-plane irradiation.

For the performance metrics calculations, only days have been studied in which it is considered that the operation has been perfect and that there have been no problems either with the operation of the system itself or with the measurement.

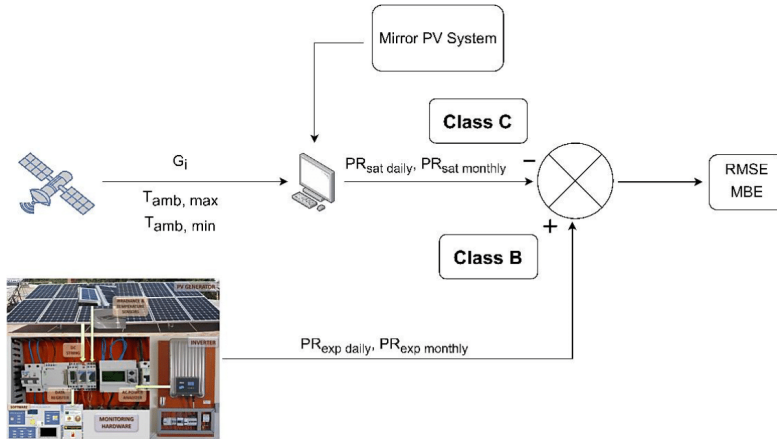


Figure 1. Diagram of the methodology used in the study, differences between the performance ratio obtained from the class C mirror PV system and the performance ratio obtained from the class B experimental monitoring system.

Two statistical metrics were applied to evaluate the goodness of the afore-mentioned methodology. The root mean square error (RMSE) provides information on the dispersion of the mirror or digital twin system performance metrics with respect to the experimental measurements. Whereas the mean bias error (MBE) displays the under or over estimation of simulated values.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(PR_{sat_i} - PR_{exp_i})^2}{n}} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (PR_{exp_i} - PR_{sat_i})}{n} \quad (6)$$

Where PR_{sat_i} and PR_{exp_i} represent the i -th value of the estimated and measured performance ratio, respectively, and n is the number of values considered during the period (day or month).

3. Results and discussion

The energy characterization of the three PVGCS studied will be presented in this section using exclusively as input data the meteorological variables offered by the different satellite services. The results obtained will be compared with the experimental measures of operation of the systems during the period under scrutiny. For the PV installation located in Arequipa the period under study was from August 2015 to December 2020, for the one installed in Tacna was from May 2015 to December 2019 and for the PV system in Lima was from July 2016 to June 2018. There has carried out also a daily comparison between the performance metrics, taking into account for each of the PV installations a perfect summer month with 31 days of complete data and a winter month with the same conditions.

3.1. Monthly analysis

Figures 2-4 represent the comparison between the estimated and measured values of PR for the PVGCS located in Arequipa and Tacna and the comparison between the estimated and measured values of PR_{DC} for the grid-connected photovoltaic system in Lima.

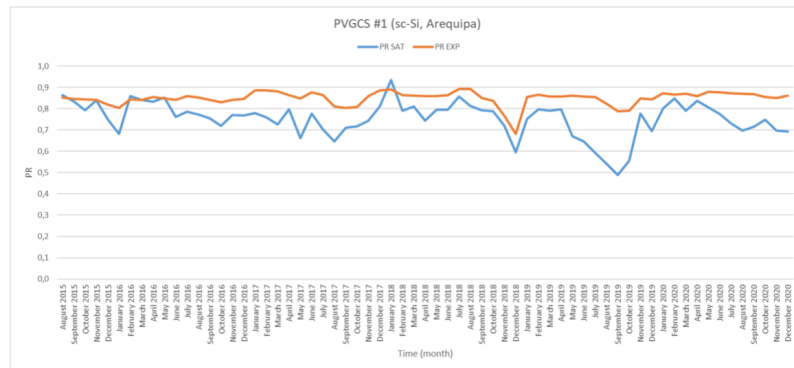


Figure 2. Variations between the experimental PR values and the PR values obtained from the mirror PV system for PVGCS #1 over the period under study.

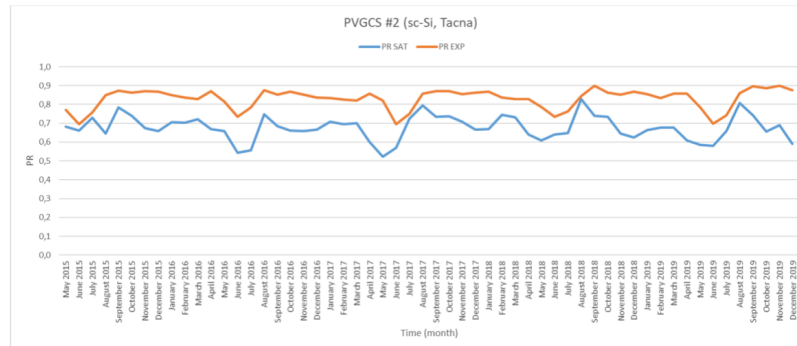


Figure 3. Variations between the experimental PR values and the PR values obtained from the mirror PV system for PVGCS #2 over the period under study.

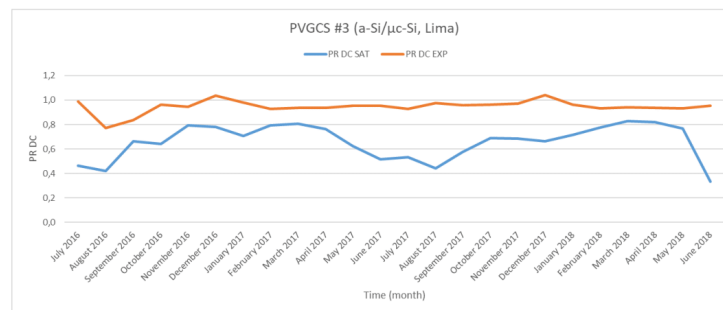


Figure 4. Variations between the experimental PR_{DC} values and the PR_{DC} values obtained from the mirror PV system for PVGCS #3 over the period under study.

In table 1, it is summarized the monthly values of the calculated parameters RMSE and MBE for all the period under study. For the three PVGCS, high values of RMSE and MBE are presented, being the PV system in Arequipa the one which presents the lowest values and the installation in Lima the one which presents the highest values.

Table 1. Monthly values of RMSE and MBE for the three PV systems under study.

	RMSE (%)	MBE (%)
Arequipa	11.80	9.55
Tacna	16.59	15.33
Lima	32.10	28.86

3.2. Daily analysis

In order to do a daily analysis, for each of the PV installations a perfect summer month with 31 days of complete data and a winter month with the same conditions have been considered. High values of RMSE and MBE are also presented as in the monthly analysis. Being the installation in Arequipa the one who has the lowest values and the one in Lima which presents the highest values. Table 2 presents the results for the analysis carried out for both the summer and the winter month.

Table 2. Daily summer and winter values of RMSE and MBE for the three PV systems under study.

	Summer		Winter	
	RMSE (%)	MBE (%)	RMSE (%)	MBE (%)
Arequipa	14.01	12.01	14.27	14.12
Tacna	20.79	19.74	24.89	8.23
Lima	21.68	16.24	42.81	33.13

4. Conclusions

The energy characterization of these photovoltaic systems using exclusively as input data the meteorological variables offered by the different satellite services, offers notable discrepancies in compare with the experimental measures of operation of the systems during the period under study. Therefore, for none of the different locations taken into account in this study, is recommended the prediction or evaluation of the performance of photovoltaic systems using the information provided by satellite sources. Satellite data tend to overestimate the solar resource and, in consequence, the real global performance of the three photovoltaic systems tend to decrease.

Although this is a first approximation study and its results should not be considered definitive, Henrich Berg was right when he stated that it was necessary to be cautious when using satellite data for the estimation and supervision of systems in Peru. Further research is needed and it seems that the first step would be to have a network of certified weather stations that would allow the data provided by satellite to be cross-checked with ground data.

References

- [1] Fraunhofer ISE. Available online: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (accessed on 25 May 2021)
- [2] Allied Market Research. Available online: <https://www.alliedmarketresearch.com/solar-energy-market> (accessed on 26 May 2021)
- [3] Moser D, Buono M Del, Jahn U, Herz M, Richter M and Brabandere K De 2017 Identification of technical risks in the photovoltaic value chain and quantification of the economic impact *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **25** 592–604
- [4] Balaska A, Tahri A, Tahri F and Stambouli A 2017 Performance assessment of five different photovoltaic module technologies under outdoor conditions in Algeria *Renewable Energy* **107** 53–60
- [5] Gracia Amillo A, Huld T and Müller R 2014 A new database of global and direct solar radiation using the eastern meteosat satellite, models and validation *Remote Sens* **6** 8165–8189
- [6] Habte A, Sengupta M and Lopez A 2017 Evaluation of the National Solar Radiation Database (NSRDB): 1998–2015 *National Renewable Energy Laboratory Technical Report NREL/TP-5D00-67722*
- [7] IEC 61724-1 2017 *Photovoltaic System Performance Part 1: Monitoring, 1st ed., International Electrotechnical Commission (IEC) Switzerland*
- [8] Espinoza R, Muñoz-Cerón E, Aguilera J and De la Casa J 2019 Feasibility evaluation of residential photovoltaic self-consumption projects in Peru *Renewable Energy* **136** 414–427
- [9] Romero-Fianes I, Muñoz-Cerón E, Espinoza-Paredes R, Nofuentes G and De la Casa J 2019 Analysis of the Performance of Various PV Module Technologies in Peru *Energies* **12** 186
- [10] Colantuono G, Everard A, Hall L and Buckley A 2014 Monitoring nationwide ensembles of PV generators: Limitations and uncertainties. The case of the UK *Solar Energy* **108** 252–263
- [11] Carr A and Pryor T 2004 A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates *Solar Energy* **76** 285–294
- [12] Thevenard D and Pelland S 2013 Estimating the uncertainty in long-term photovoltaic yield predictions *Solar Energy* **91** 432–445