

PUESTA EN MARCHA DE UN LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS A SOL REAL BAJO LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LIMA

IMPLEMENTATION OF A LABORATORY FOR THE OUTDOOR CHARACTERIZATION OF PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES UNDER THE CLIMATIC CONDITIONS OF LIMA

Luis Conde-Mendoza¹ , Jesús Montes-Romero² , Alejandro Carhuavilca-Vela¹ ,
Renzo Perich-Ibañez¹ , Jorge Guerra-Torres¹ , Miguel Sevillano-Bendezú¹ ,
Brando Calsi-Silva¹ , José Angulo-Abanto¹ , Juan de la Casa-Higueras² ,
Jan Palomino-Töfflinger^{1*} 

¹Departamento de Ciencias, Sección de Física, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

²Grupo IDEA, Departamento de Ingeniería Electrónica y Automatización, Universidad de Jaén, Jaén, España

Recibido (Received): 07/02/2020 Aceptado (Accepted): 05/03/2020

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño, la implementación y los primeros resultados de un Laboratorio de Investigación Fotovoltaica desarrollado en las instalaciones del Grupo de Ciencia de Materiales y Energías Renovables (MatER-PUCP) de la Pontificia Universidad Católica del Perú en colaboración con el Grupo de Investigación y Desarrollo en Energía Solar y Automática (IDEA) de la Universidad de Jaén (UJA) de España. Este laboratorio es uno de los primeros en el país con el equipamiento adecuado para la calibración y certificación de diferentes tecnologías, comerciales y emergentes, de módulos fotovoltaicos en el mercado peruano. Los resultados que se esperan obtener mediante una extensa campaña experimental, que inició en mayo del 2019, podrán ser ofertados a empresas u otras instituciones públicas, como estudios detallados del comportamiento y degradación de las diferentes tecnologías de módulos fotovoltaicos en función de las condiciones climáticas particulares de la ciudad de Lima (niveles de irradiancia y su componente difuso, temperatura de operación, humedad, distribución espectral, y polvo).

Palabras Clave: energía solar, laboratorio de investigación fotovoltaica, caracterización de módulos fotovoltaicos, curvas I-V, trazador de curvas

ABSTRACT

This paper presents the design, implementation and first results of a Photovoltaic Research Laboratory developed at the facilities of the Materials Science and Renewable Energy Group (MatER-PUCP) of the Pontifical Catholic University of Peru in collaboration with the IDEA Research Group (Research and Development in Solar Energy) of the University of Jaen (UJA), Spain. This laboratory is one of the first in the country with the appropriate equipment for calibration and certification of different commercial and emerging technologies of photovoltaic modules in the Peruvian market. The results that are expected to be obtained through an extensive experimental campaign, which began in May 2019, may be offered to companies or other public institutions, such as detailed studies of the behavior and degradation of the different technologies of photovoltaic modules depending on the particular climatic conditions from the city of Lima (irradiance levels and diffuse component, operating temperature, humidity, spectral distribution, and dust).

Keywords: solar energy, photovoltaic research laboratory, characterization of photovoltaic modules, I-V curves, curve plotter

* Corresponding author.:

E-mail: japalominot@pucp.edu.pe

1. INTRODUCCION

El rendimiento de los módulos fotovoltaicos (FV) se ve muy influenciados por las diferentes condiciones ambientales [1]. Los fabricantes categorizan a los módulos FV en “Condiciones Estándar de Medida” (CEM), que son: Irradiancia normal de 1000 W/m², temperatura constante de celda de 25 °C y una distribución espectral de AM 1.5 (IEC 60891). Como estas condiciones son difíciles de encontrarlas en exteriores, se requiere de una campaña experimental a sol real con el fin de tener un conocimiento del comportamiento eléctrico de los módulos FV bajo las condiciones ambientales del lugar de instalación [2].

El experimento que aporta mayor información del comportamiento eléctrico de un módulo FV y de su tecnología, es mediante la medición de la curva corriente-voltaje (I-V) [3]. El análisis de la forma de la curva I-V es una herramienta muy útil para detectar fallas en módulos individuales o en plantas FV, como sombras parciales, puntos calientes, subredes desconectadas o degradación en celdas, [4]. De la curva I-V se pueden obtener los parámetros eléctricos característicos: la corriente de corto-circuito (I_{SC}), el voltaje de circuito-abierto (V_{OC}), la potencia máxima (P_M), la corriente (I_M) y el voltaje (V_M) en el punto de potencia máxima y el factor de forma (FF).

El grupo de investigación IDEA de la Universidad de Jaén (UJA) tiene una vasta experiencia en el desarrollo de sistemas de caracterización con fines investigativos y en el análisis del desempeño de módulos FV a sol real [5]. Estos sistemas de caracterización están diseñados para medir la curva I-V de diferentes módulos FV [4] y las condiciones ambientales de operación.

Con la colaboración del grupo IDEA de la Universidad de Jaén se ha desarrollado un laboratorio de Investigación FV en Lima, situado en los laboratorios del grupo MatER en la Sección Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). El laboratorio está habilitado para las mediciones de las curvas I-V de módulos FV de diferentes tecnologías [1], y simultáneamente, el registro y almacenamiento de la temperatura del módulo, irradiancia global y difusa, distribución espectral global y difusa, temperatura ambiental, humedad relativa, presión ambiental, densidad del aire, dirección y velocidad del viento.

Este laboratorio de Investigación Fotovoltaica es uno de los primeros en el Perú con la instrumentación adecuada para procesos de calibración, control de calidad y certificación de módulos FV que podrían ser ofertados, tras un proceso de homologación, a empresas u otras instituciones públicas. El laboratorio de Investigación Fotovoltaica comenzó su etapa de instalación y pruebas a partir de enero del 2019 y

empezó a operar completamente a partir de mayo del 2019.

2. ANTECEDENTES

En los últimos años, la economía peruana ha tenido un acelerado avance, con una tasa de crecimiento promedio del PBI de 6.1% anual entre el 2002 y 2013, siendo una de las economías más atractiva para los inversionistas en toda América Latina [6]. Según estudios realizados por Zambrano-Monserrate et al. [7], el crecimiento económico implica un mayor consumo de energía y como la mayoría de fuentes de energía en el Perú provienen de combustibles fósiles y gas natural, esto implica una mayor emisión de gases de efecto invernadero, por lo que en un reporte del Banco Mundial [8] se muestra como se ha incrementado la emisión de CO₂ en toneladas métricas de 0.96 en el 2003 a 2.05 en el 2014.

A finales del 2018, el Perú tenía un total de 284.5 MW de potencia instalada a base de energía solar [9] y, por ejemplo, una de las plantas solares más grandes como la de Rubí en Moquegua genera 440 GWh de energía eléctrica al año [10]. Estos reportes e instalaciones a gran escala nos da una visión de cómo la tecnología FV está progresando en el Perú, pero actualmente se tiene un desconocimiento del rendimiento real de las diferentes tecnologías fotovoltaicas comerciales en las diversas zonas del Perú, debido a que nuestro país cuenta con una gran variedad de climas [11].

Lima está ubicada en la costa este del Perú (12° 2'S, 77° 1'W) con un clima categorizado como “Desierto Árido Caliente” [12] y al ser la capital del Perú es una de las ciudades más importantes de Sudamérica con una población de 10 millones de personas [13].

En trabajos recientes, como el de Romero-Fiances et al. [14] y Espinoza et al. [15] en el marco del proyecto “Emergiendo con el sol”, se analizaron el rendimiento de sistemas FV conectados a la red (SFCR) de tres diferentes tecnologías de módulos FV: Silicio monocristalino (mono-Si) en Arequipa y Tacna, Silicio policristalino (poly-Si) y tándem de Silicio amorfo/Silicio microcristalino (a-Si/ μ c-Si) en Lima. Se reportó como el rendimiento energético y económico de estas tecnologías de módulos FV son afectados por los diferentes climas de estas ciudades, concluyendo que se deben hacer campañas de caracterización de módulos FV más extensas y con una instrumentación más completa.

Además, existen pocos trabajos que reportan el comportamiento de diferentes tecnologías de módulos FV en climas similares al de Lima, como el de Ferrada et. al [16] en el norte de Chile, que tiene un clima

desértico costero, donde se analizaron dos tecnologías de módulos FV: Silicio monocristalino (mono-Si) y tándem de Silicio amorfo/Silicio microcristalino (a-Si/ μ c-Si), conectados a red, y donde se analizaron principalmente los efectos de la temperatura y de la deposición de polvo en el rendimiento energético de los módulos FV.

Por lo tanto, la puesta en marcha de un laboratorio de investigación FV, será de un gran aporte a la comunidad científica, donde se podrá reportar el desempeño de diferentes tecnologías FV en las condiciones climáticas particulares de Lima y con la finalidad de promover las instalaciones FV en el Perú. La disponibilidad de un laboratorio de investigación FV, los datos almacenados y los resultados encontrados, serán útiles para futuros trabajos de investigación y un gran aporte para diferentes sectores como el científico, técnico y empresarial.

3. DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO

En esta sección se describe el Laboratorio de Investigación FV implementado en las instalaciones del grupo MatER de la Pontificia Universidad Católica del Perú ($12^{\circ}2'S$, $77^{\circ}1'W$). En la Fig. 1 se muestra el diagrama esquemático del laboratorio.

3.1 MODULOS FOTOVOLTAICOS

El Laboratorio de investigación FV tiene una capacidad de medición de 16 módulos FV individuales, los módulos y los instrumentos meteorológicos se

encuentran posicionados viendo hacia el norte en un ángulo de inclinación de 20° (Fig. 2). Actualmente, se tienen bajo análisis cuatro tipos de tecnologías de módulos FV: Aluminium Back Surface Field (Al-BSF), Heterojunction con Intrinsic Thin-Layer (HIT), Bifacial Passivated Emitter Rear Totally diffused (PERT) y Tándem de Amorphous/Microcrystalline Silicon (a-Si/ μ c-Si), y para una correcta campaña experimental estos módulos FV son limpiados semanalmente. En la tabla I se encuentran las especificaciones y los parámetros eléctricos de los módulos FV bajo investigación.

La Fig. 3 muestra el arreglo de los módulos FV en el sistema de caracterización, a los módulos FV de la fila inferior se mide la curva I-V individualmente cada cinco minutos y de manera simultánea se mide la irradiancia incidente, temperatura de celda, distribución espectral, temperatura y densidad del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento. En paralelo (fila superior) se han dispuesto de módulos FV, de la misma tecnología, modelo y fabricante, donde se encuentran conectados a micro-inversores que inyectan la energía generada a la red eléctrica de la PUCP y, por tanto, están trabajando de manera constante en su punto de potencia máxima. En la esquina superior derecha se tiene un módulo de Al-BSF que se mantiene sin limpiar y midiendo la curva I-V cada cinco minutos, con el fin de estudiar los efectos de la deposición del polvo en la energía generada por el módulo FV.

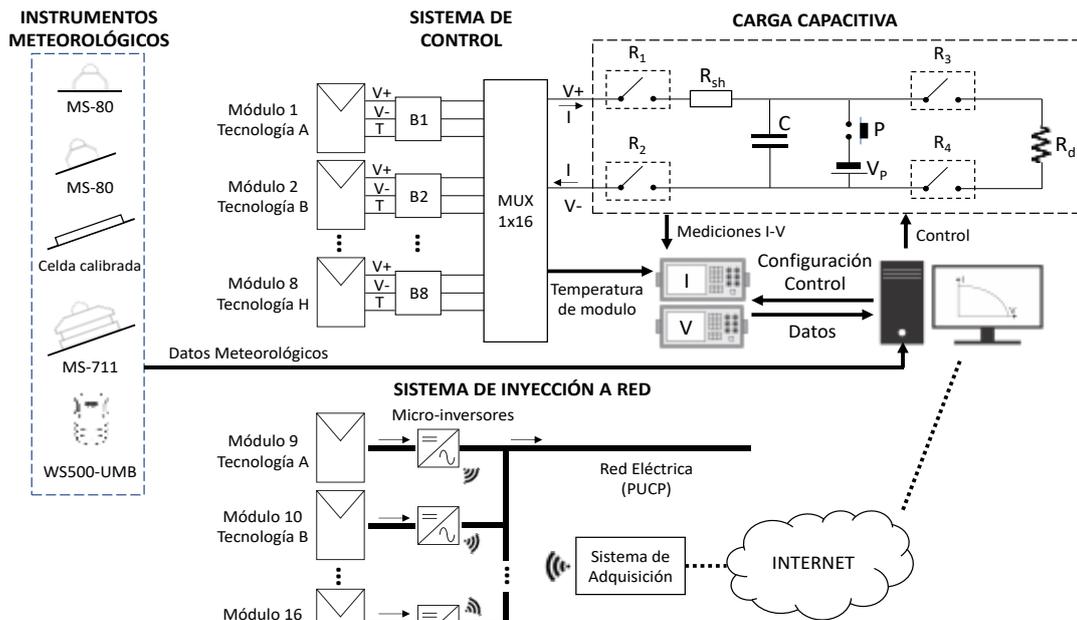


Fig. 1. Diagrama esquemático del laboratorio de Investigación Fotovoltaica.

TABLA I
Parámetros eléctricos de los módulos FV.

Módulo FV	P_M (W)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_M (A)	V_M (V)	γ (%/°C)	α (%/°C)	β (%/°C)	Eficiencia (%)
HIT	330	6.07	69.7	5.70	58.0	-0.26	0.05	-0.23	19.7
Al-BSF	270	9.32	37.9	8.75	30.8	-0.41	0.05	-0.31	16.5
a-Si/ μ c-Si	128	3.45	59.8	2.82	45.4	-0.24	0.07	-0.30	9.0
Bifacial PERT	355	9.52	47.13	8.90	39.89	-0.37	0.04	-0.29	17.9

Nota: Estos parámetros fueron extraídos de las hojas de datos del fabricante.



Fig. 2. Módulos FV e instrumentos meteorológicos.

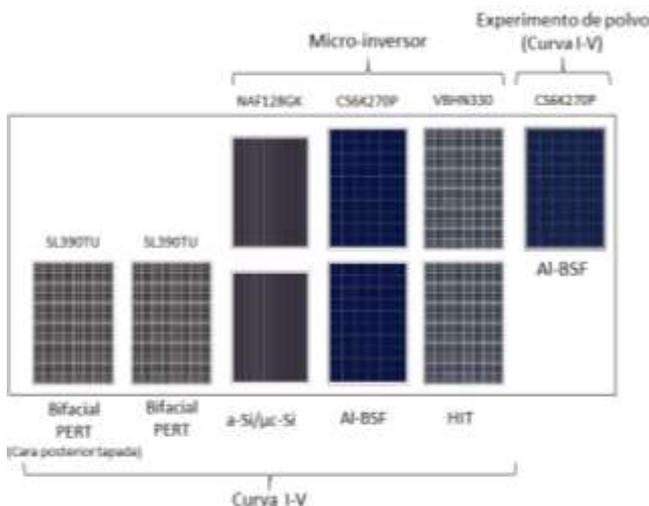


Fig. 3. Arreglo experimental de los módulos FV.

3.2 INSTRUMENTOS METEOROLOGICOS

Los valores de irradiancia se miden con tres sensores: dos piranómetros EKO MS-80 (0-4000 W/m²) y una celda calibrada (módulo de 5W) en corto-circuito. Como se puede observar en la Fig. 4, un primer piranómetro se tiene en 0° para la medición de la irradiancia global en un plano horizontal, el segundo piranómetro y la celda calibrada se tienen en 20° para la medición de la irradiancia en un plano inclinado, con el mismo ángulo de los módulos FV.



Fig. 4. Instrumentos meteorológicos para la medición de la irradiancia y la distribución espectral.

La distribución de la irradiancia espectral se mide con un espectroradiómetro EKO MS-711 (300-1100 nm) en un ángulo de 20° (en la misma inclinación de los módulos FV). La Fig. 5 muestra la medición de una distribución espectral del 13 de marzo del 2019 a las 12:05 horas, donde se le compara con el espectro estándar AM 1.5. En ese momento se registró una irradiancia de 1003.5 W/m² con el piranómetro inclinado.

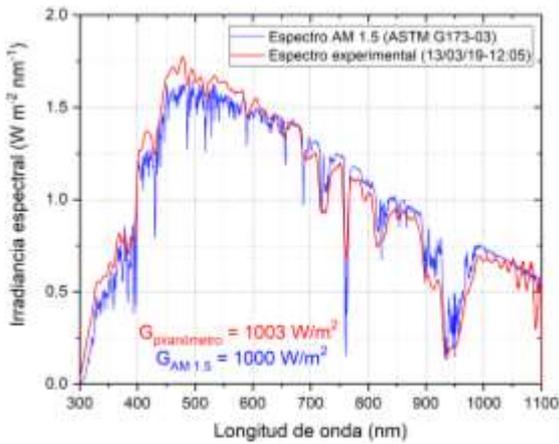


Fig. 5. Distribución espectral experimental del 13 de marzo del 2019 comparado con el espectro estándar AM 1.5.

Las variables ambientales (temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, densidad del aire, velocidad y dirección del viento) se miden con una estación meteorológica LUFFT WS500-UMB. La Fig. 6 muestra la medición de la temperatura del aire en contraste con la humedad relativa durante todo el día del 13 de marzo del 2019.

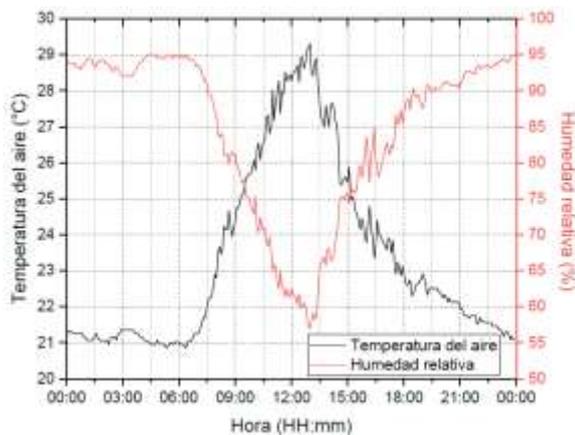


Fig. 6. Medición de la temperatura del aire y humedad relativa del 13 de marzo del 2019.

3.3 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control este compuesto a base de un Arduino Mega 2560, que es una placa de desarrollo basado en el microcontrolador ATmega2560 y que tiene 54 entradas/salidas digitales. Las salidas digitales permiten el control de multiplexores, relés y optoacopladores.

En la Fig. 7 se muestra el diagrama esquemático del trazador de curvas para un solo módulo FV, el funcionamiento básico consiste en tres fases: pre-carga, carga y descarga [4].

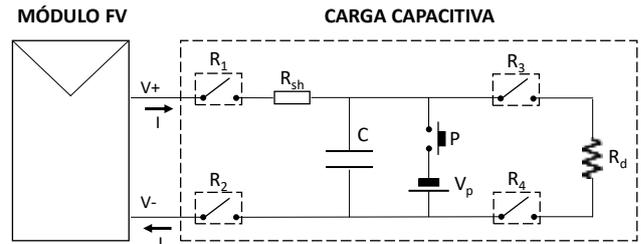


Fig. 7. Esquema de un trazador de curvas I-V para un módulo FV.

Previamente al trazado de la curva I-V, se mide la irradiancia (G) y la temperatura del módulo (T_c), con el fin de calcular la corriente de corto-circuito (I_{SC}) (Ecuación 1) y el voltaje de circuito-abierto (V_{OC}) (Ecuación 2) respectivamente, y poder estimar el tiempo de carga del condensador (t_c) (Ecuación 3).

$$I_{SC} = I_{SC}^* \frac{G}{G^*} \quad (1)$$

$$V_{OC} = V_{OC}^* - \beta(T_c - T_c^*) \quad (2)$$

$$t_c = C \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (3)$$

Donde I_{SC}^* , G^* , V_{OC}^* y T_c^* son los valores característicos del módulo en CEM, β es el coeficiente de temperatura para el voltaje de circuito-abierto y C es valor de la capacitancia del condensador.

Primero, en la fase de pre-carga, se cierra el pulsador P , por un breve tiempo, y se aplica un voltaje negativo V_p al condensador C , el objetivo de cargar negativamente al condensador es que cuando llegue el voltaje positivo del módulo FV, la curva I-V pasará necesariamente por el punto $V=0$, donde se podrá obtener el valor de la corriente en corto-circuito, I_{SC} .

En la fase de la carga (donde se mide la curva I-V) se cierran los relés R_1 y R_2 y el condensador se conecta al módulo FV donde empieza a cargar, la medición del voltaje y de la corriente se hace con dos multímetros Keysight 34465A sincronizados, el voltaje se mide en paralelo a la carga capacitiva y la corriente se mide mediante una resistencia shunt R_{sh} de precisión, cuando el condensador este completamente cargado y la curva I-V trazada se abrirán los relés R_1 y R_2 .

En la fase de descarga se cierran los relés R_3 y R_4 , la carga almacenada en el condensador se disipará por la resistencia R_d y el condensador se encontrará preparado para una nueva medición de la curva I-V.

Como se requiere la medición de la curva I-V de múltiples módulos FV, a cada módulo FV se le añadió una caja de control ($B_1, B_2 \dots B_{16}$). Esta caja de control permite el paso selectivo de la señal de voltaje y de la temperatura del módulo, la activación de cada caja se hace mediante un multiplexor de 16 canales (MUX 1x16) (Fig. 8).

En la tabla II se muestran las combinaciones necesarias para la activación de cada caja de control, el 0 y el 1 representan los voltajes lógicos de 0V y 5V respectivamente. El Enable (E), habilita o deshabilita el multiplexor, las combinaciones de los valores de A_3 , A_2 , A_1 y A_0 , selecciona la caja que se va a activar. Por ejemplo, para activar la caja 2 (B_2 , marcado en color naranja), se debe poner en 1 el E y en 1 el A_0 .

TABLA II
Combinaciones lógicas para la activación de una caja de control

E	A_3	A_2	A_1	A_0	B
1	0	0	0	0	B_1
1	0	0	0	1	B_2
1	0	0	1	0	B_3
1	0	0	1	1	B_4
1	0	1	0	0	B_5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	1	0	B_{15}
1	1	1	1	1	B_{16}
0	-	-	-	-	-

Nota: Combinaciones lógicas para la activación de cada caja de control.

La Fig. 9 muestra el diagrama de flujo para la medición automática de las curvas I-V del sistema de caracterización. Al iniciar se verifica si todos los instrumentos de medición están conectados, después se deben cumplir las condiciones de dos filtros: el filtro horario, que establece las horas de medición, se selecciona entre las 6:00 y las 18:30 horas y el filtro de irradiancia permite que sólo se hagan mediciones con irradiancias mayores a 25 W/m^2 . Si no se cumplen estas dos condiciones el sistema solo medirá y guardará las variables ambientales.

Cuando se cumplen las dos condiciones de los filtros el sistema de control seleccionara un módulo según el orden en el que fue instalado, luego se medirá y guardará los datos de la curva I-V, la temperatura del módulo, la irradiancia, las variables ambientales y la distribución espectral.

La Fig. 10 es una captura de pantalla de la interfaz de control desarrollada en LabVIEW, donde se muestra una curva I-V (gráfica superior), los parámetros eléctricos extraídos de la curva I-V, la distribución espectral experimental comparada con la del AM0 y AM1.5 (gráfica inferior), y también las variables ambientales. En la Fig. 11 se muestra la PC, que se encarga del control de los equipos de medición y del almacenamiento de los datos, los dos multímetros y el trazador con la carga capacitiva.

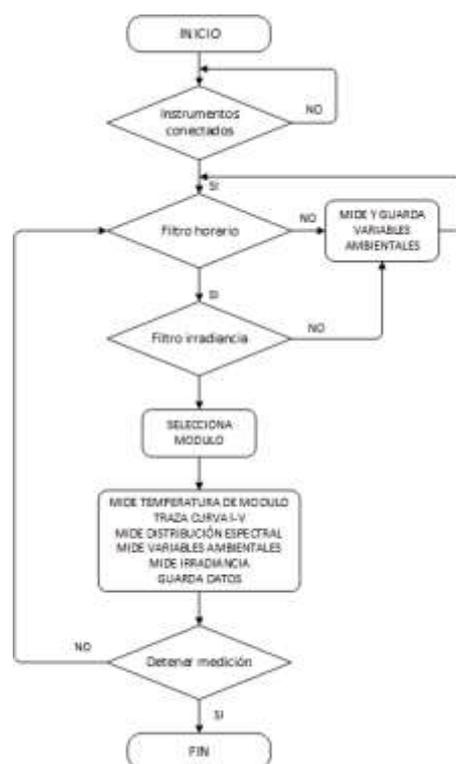


Fig. 8. Diagrama de flujos para la medición automática de curvas I-V.

Como se comentó anteriormente, las pruebas realizadas con el fin de evaluar el comportamiento a sol real de las distintas tecnologías de módulos FV comerciales se ha ampliado. Se agregó un sistema de inyección a la red eléctrica de la PUCP (Fig. 12), que es un experimento independiente del trazador de curvas, donde se tienen módulos FV de la misma tecnología que los se están usando en el trazador de curvas (Fig. 3). Los módulos FV se encuentran conectados a micro-inversores ENPHASE IQ7 y IQ7+, donde su función es mantener a los módulos FV en su punto de máxima potencia y convertir la señal DC de los módulos FV a AC y luego se inyectarlos a la red eléctrica de la PUCP. Para la adquisición y el almacenamiento de los datos (voltaje y corriente DC de entrada, la potencia AC de salida y la temperatura del micro-inversor) se tiene un Datalogger IQ ENVOY.

El objetivo de tener este sistema de inyección a red funcionando en paralelo con el trazador de curvas I-V, es para hacer un estudio comparativo de dos tipos de experimentos de caracterización. Cuando se traza la curva I-V a un módulo FV cada cinco minutos, la medición se hace en un corto tiempo (de pocos segundos) y el módulo se encuentra en circuito-abierto durante el resto del tiempo. Mientras que cuando se conecta un micro-inversor, el módulo FV se mantiene en el punto de máxima potencia y operando continuamente por lo que no se puede conocer experimentalmente la curva I-V completa.

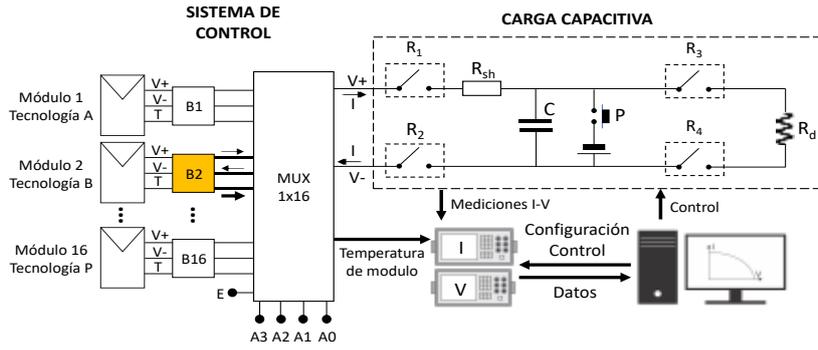


Fig. 9. Sistema de control para la medición de la curva I-V de múltiples módulos FV.

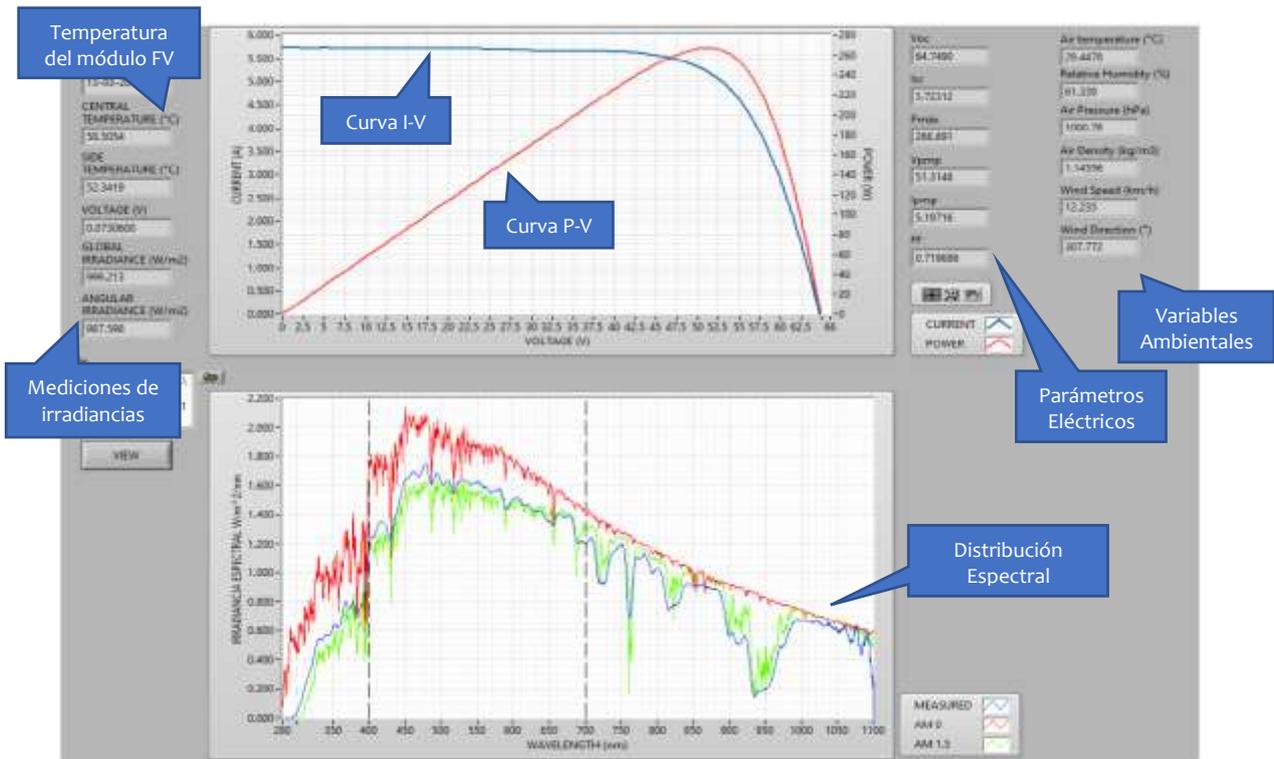


Fig. 10. Interfaz de control para el laboratorio de Investigación Fotovoltaica desarrollado en LabVIEW.



Fig. 11. Vista general de la PC e instrumentos que controlan y miden el sistema de caracterización, se encuentran instalados en el laboratorio interior del grupo MaTER.

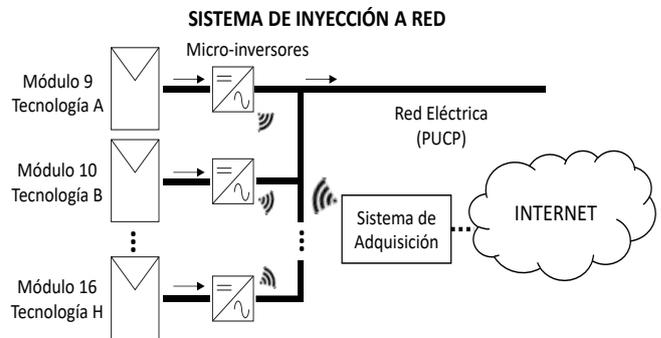


Fig. 12. Sistema de inyección a red de los módulos FV bajo estudio.

4. PRIMERAS CAMPAÑAS EXPERIMENTALES

En las primeras campañas experimentales se aplicaron modelos clásicos a los datos de los primeros meses de medición para verificar su confiabilidad.

4.1 CALIBRACIÓN DE MÓDULOS FV

En la calibración se seleccionaron 100 curvas I-V con irradiancias mayores a 800 W/m² para cada módulo FV en los primeros días de instalación [18]. Se extrajeron los parámetros eléctricos característicos de las curvas I-V y se utilizaron las ecuaciones (4), (5), (6) y (7) para extrapolar los valores experimentales de P_M , I_{SC} , V_{OC} y FF a CEM.

$$P_M^* = \frac{G_i^*}{G_i} \frac{P_M}{[1 - \gamma(T_c - 25)]} \quad (4)$$

$$I_{SC}^* = \frac{G_i^*}{G_i} \frac{I_{SC}}{[1 + \alpha(T_c - 25)]} \quad (5)$$

$$V_{OC}^* = V_{OC} + \beta(T_c - 25) \quad (6)$$

$$FF^* = \frac{P_M^*}{I_{SC}^* V_{OC}^*} \quad (7)$$

De los valores P_M^* , I_{SC}^* , V_{OC}^* y FF^* en CEM que se obtuvieron en cada módulo se calculó el promedio (Ec. 8), la desviación estándar (Ec. 9) y el coeficiente de variación (Ec. 10)

$$\bar{x} = \frac{\sum X(i)}{N} \quad (8)$$

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum (X(i) - \bar{x})^2}{N}} \quad (9)$$

$$CV(\%) = \frac{\sigma_I}{\bar{x}} \times 100 \quad (10)$$

La tabla III muestra los resultados obtenidos en la calibración experimental de los módulos FV. Como se puede apreciar los parámetros eléctricos son muy cercanos a los proporcionados por la ficha técnica del fabricante. En la potencia máxima (P_M) se alcanza una diferencia relativa de 0.3 %, 1.6 % y 0.1 % para los módulos de Al-BSF, HIT y a-Si/ μ c-Si, respectivamente. Este resultado verifica la confiabilidad del sistema de medición.

4.2 ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL

En el análisis de la distribución espectral se analizaron diferentes espectros solares mediante el cálculo de la Energía Promedio del Fotón (inglés: Average Photon Energy, APE) en eV (Ec. 11)

$$APE = \frac{\int_a^b E(\lambda) d\lambda}{\int_a^b \phi(\lambda) d\lambda} \quad (11)$$

Donde (λ) [W/m² nm] es la irradiancia espectral, (λ) [1/m² nm s] es la densidad del flujo de fotones, a [nm] y b [nm] son los límites inferiores y superiores. Como referencia se usa el valor del APE para el espectro estándar AM 1.5 (1.88 eV) y el cálculo se hace entre los límites de 350 nm y 1050 nm [19]. En la Fig. 13 se muestra los valores del APE calculados en espectros medidos por el MS-711 en contraste con la medición de la irradiancia medido por el piranómetro MS-80 durante el 13 de marzo del 2019.

TABLA III
Comparación de los parámetros eléctricos obtenidos del fabricante y los valores experimentales obtenidos en la calibración.

Módulo FV	Parámetros eléctricos	Información del fabricante	Calibración experimental	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Diferencia relativa
Al-BSF	P_M^*	270 W	269.2 W	1.87	0.7 %	0.3 %
	I_{SC}^*	9.32 A	9.45 A	0.13	1.4 %	-1.4 %
	V_{OC}^*	37.9 V	37.2 V	0.15	0.4 %	1.8 %
	FF	0.76	0.77	0.008	1.0 %	-0.1 %
HIT	P_M^*	330 W	324.6 W	5.90	1.8 %	1.6 %
	I_{SC}^*	6.07 A	6.05 A	0.13	2.1 %	0.3 %
	V_{OC}^*	69.7 V	70.4 V	0.49	0.7 %	-0.9 %
	FF	0.78	0.76	0.01	1.3 %	2.2 %
a-Si/ μ c-Si	P_M^*	128 W	127.9 W	2.08	1.6 %	0.1 %
	I_{SC}^*	3.45 A	3.32 A	0.07	2.0 %	3.8 %
	V_{OC}^*	59.8 V	59.1 V	0.17	0.3 %	1.1 %
	FF	0.62	0.65	0.004	0.6 %	-5.1 %

Nota: Comparación de los parámetros eléctricos del fabricante y los valores experimentales obtenidos en la calibración.

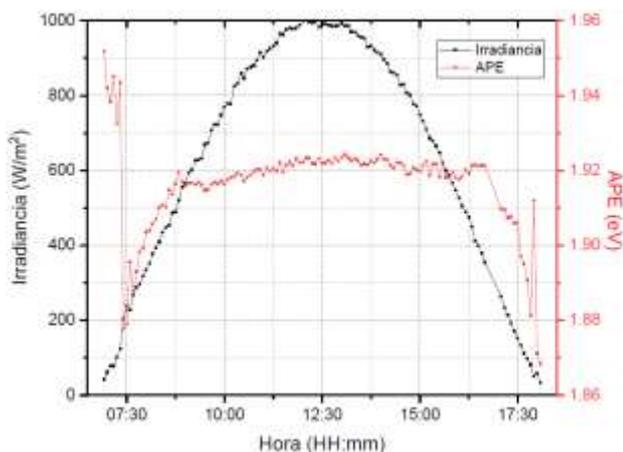


Fig. 13. Cálculo del APE de la distribución espectral con respecto a la medición de la irradiancia para el 13/03/19.

El valor del APE es un índice que da información acerca del desplazamiento del espectro, un valor de APE mayor a 1.88 eV indica un espectro con una mayor componente de azul, mientras que un APE con un valor menor que 1.88 eV indica un espectro con una mayor componente de rojo [20]. En la figura 13 se muestra los valores calculados del APE durante todo un día, que en promedio tiene un valor de 1.92 eV, lo cual indicaría que la distribución espectral en promedio para Lima en esa fecha (incluso con irradiancias de 1000 W/m² al mediodía) tuvo una mayor componente de azul. La importancia del estudio y la caracterización de la distribución espectral es que se podría conocer los efectos de cómo las diferentes tecnologías de módulos FV responden a los espectros particulares de la ciudad de Lima, evaluando ganancias o pérdidas en la generación de energía eléctrica [21].

CONCLUSIONES

- Para un correcto desarrollo de una tecnología en un país es necesario un estudio detallado del comportamiento de las mismas en sus diferentes versiones comerciales. Para ello, es imprescindible que, de manera local, se cuenten con laboratorios de investigación que permitan su estudio y análisis in situ.
- La PUCP, en colaboración con la Universidad de Jaén-España, utilizando fondos propios y del gobierno peruano (Proyecto “Caracterización, modelado y estudio del comportamiento de diferentes generaciones de tecnologías fotovoltaicas frente a las condiciones climáticas del Perú”, Contrato No 124-2018-FONDECYT), está realizando los primeros avances para que el Perú cuente con un laboratorio de análisis y calibración de módulos FV a sol real. Este laboratorio sería uno de los primeros del país que contaría con la instrumentación adecuada para realizar tanto, procesos de calibración y certificación de módulos FV que podrían ser ofertados a empresas u otras instituciones públicas, como estudios detallados

del comportamiento y degradación de las diferentes tecnologías FV comerciales en función de las condiciones climáticas de operación particulares de la ciudad de Lima: niveles de irradiancia, temperatura de operación, humedad, distribución espectral, entre otras.

- Tras más de un año de diseño, construcción, montaje y calibración, se puede afirmar que el laboratorio de caracterización en potencia de módulos FV, en base al trazado completo de su curva I-V característica, se encuentra a pleno funcionamiento desde finales de abril de este año, y en este trabajo, se han presentado los primeros avances de las investigaciones realizadas hasta la fecha. Como paso previo para realizar cualquier análisis de tecnologías, se ha realizado un proceso de calibración experimental de los parámetros eléctricos fundamentales de los módulos FV a estudio. Este experimento nos permite afirmar que los mismos cumplen razonablemente con los datos proporcionados por los fabricantes.
- Actualmente, se está realizando un estudio experimental sobre la validez de los modelos analíticos de interpretación de la tecnología más simple y comúnmente utilizados por la comunidad científica y se discutirá sobre la bondad del pronóstico que nos brindarán cada uno de ellos al ser comparado con las medidas experimentales peculiares del clima limeño. Modelos teóricos más complejos y que consideren, no solo el valor absoluto de la irradiancia incidente, sino también su distribución espectral, distinguiendo entre los componentes difusos y directos, tendrán que ser evaluados cuando se disponga de una campaña experimental de mínimo un año para profundizar en el conocimiento del comportamiento de las diferentes tecnologías en la ciudad de Lima. Para ello, el laboratorio de investigación Fotovoltaica está ampliando su infraestructura meteorológica como, por ejemplo, con sensores de irradiancia y distribución espectral difusa. Finalmente, también se están agregando más tecnologías de módulos fotovoltaicos, como los de Silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H), mono-Si Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) mono- y bifacial, Interdigitated Back-Contact (IBC) cells, y Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) cells, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores están completamente agradecidos con el grupo de investigación IDEA de la UJA y el grupo de investigación MatER de la PUCP por su ayuda y asesoramiento. Este trabajo fue parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) bajo el programa de becas de doctorado (236-2015-FONDECYT). El Fondo Nacional Peruano para el

Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) brindó un apoyo adicional a través del contrato N° 124-2018-FONDECYT. Agradecemos el apoyo brindado por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional-AACID a través del proyecto “Emergiendo con el Sol. Apoyo institucional al CER-UNI, en el campo de la generación de energía eléctrica, empleando tecnología fotovoltaica” (Proyecto N° 2012DEC206). También se agradece a los fondos dados por el Concurso Anual de Proyectos de Investigación CAP 2019 de la Dirección de Gestión de Investigación de la PUCP (2019-4-0041/702). Finalmente, se agradece la ayuda provista por el Vicerrectorado de la PUCP a través de la actividad de investigación PO0088.

REFERENCIAS

- [1] O. O. Ogbomo, E. H. Amalu, N. N. Ekere and P. O. Olagbegi, “A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, pp. 1225–1238, Aug. 2017.
- [2] A. K. Tossa, Y. M. M. Soro, Y. Azoumah and D. Yamegueu, “A new approach to estimate the performance and energy productivity of photovoltaic modules in real operating conditions,” *Sol. Energy*, vol. 110, pp. 543–560, Dec. 2014.
- [3] T. Ma, H. Yang and L. Lu, “Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/strings/arrays,” *Sol. Energy*, vol. 100, pp. 31–41, Feb. 2014.
- [4] J. Muñoz and E. Lorenzo, “Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays,” *Sol. Energy*, vol. 80, no. 11, pp. 1489–1497, 2006.
- [5] J. Montes Romero, M. Pliouguine, J. V. Muñoz, E. F. Fernández and J. De La Casa, “Photovoltaic device performance evaluation using an open-hardware system and standard calibrated laboratory instruments,” *Energías*, vol. 10, no. 11, 2017.
- [6] Banco Mundial. “Perú Panorama general.” [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/country/peru/overview> (accessed Jan. 25, 2020)
- [7] M. A. Zambrano-Monserrate, C. A. Silva-Zambrano, J. L. Davalos Penafiel, A. Zambrano Monserrate and M. A. Ruano, “Testing environmental Kuznets curve hypothesis in Peru: The role of renewable electricity, petroleum and dry natural gas,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 4170–4178, Feb. 2018.
- [8] Banco Mundial. Perú | Data. [Online]. Available: <https://datos.bancomundial.org/pais/peru?view=chart> (accessed Sep. 28, 2019).
- [9] Sun World 2019. MEM y la Alianza Solar Internacional suscribieron convenio de cooperación para el impulso de Energías Renovables en Perú | Sun World 2019. [Online]. Available: <https://sun-world.org/2018/12/mem-y-la-alianza-solar-internacional-suscribieron-convenio-de-cooperacion-para-el-impulso-de-energias-renovables-en-peru/> (accessed Sep. 18, 2019).
- [10] El Comercio. Enel inaugura la planta solar más grande del Perú | Economía | Perú | El Comercio Perú. [Online]. Available: <https://elcomercio.pe/economia/peru/enel-inaugura-rubi-planta-solar-grande-peru-noticia-505857> (accessed Sep. 19, 2019).
- [11] MINAGRI. El clima. [Online]. Available: <https://www.minagri.gob.pe/portal/53-sector-agrario/el-clima> (accessed Sep. 19, 2019)
- [12] M. Kottke, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf and F. Rubel, “World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated,” *Meteorol. Zeitschrift*, vol. 15, no. 3, pp. 259–263, Jul. 2006.
- [13] INEI. Población del Perú totalizó 31 millones 237 mil 385 personas al 2017. [Online]. Available: <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/poblacion-del-peru-totalizo-31-millones-237-mil-385-personas-al-2017-10817/> (accessed Sep. 22, 2019)
- [14] I. Romero Fiances, E. Muñoz Cerón, R. Espinoza Paredes, G. Nofuentes and J. De La Casa, “Analysis of the performance of various pv module technologies in Peru,” *Energías*, vol. 12, no. 1, 2019.
- [15] R. Espinoza, C. Luque, E. Muñoz Cerón and J. De la Casa, “Barreras a superar en el intento de una intervención masiva de sistemas FV conectados a la red en el Perú,” *Rev. Cient. Tec.*, vol. 27, no. 1, p. 7, Jan. 2018.
- [16] P. Ferrada, F. Araya, A. Marzo and E. Fuentealba, “Performance analysis of photovoltaic systems of two different technologies in a coastal desert climate zone of Chile,” *Sol. Energy*, vol. 114, pp. 356–363, Apr. 2015.
- [17] J. Montes Romero, M. Torres Ramírez, J. De La Casa, A. Firman and M. Cáceres, “Software tool for the extrapolation to Standard Test Conditions (STC) from experimental curves of photovoltaic modules,” *Proc. 2016 Technol. Appl. to Electron. Teaching, TAAE 2016*, 2016.
- [18] F. Martínez Moreno, E. Lorenzo, J. Muñoz and R. Moretón, “On the testing of large PV arrays,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, no. 1, pp. 100–105, 2012.
- [19] G. Nofuentes, J. de la Casa, E. M. Solís-Alemán and E. F. Fernández, “Spectral impact on PV performance in mid-latitude sunny inland sites: Experimental vs. modelled results,” *Energy*, vol. 141, pp. 1857–1868, 2017.
- [20] C. Cornaro and A. Andreotti, “Influence of Average Photon Energy index on solar irradiance characteristics and outdoor performance of photovoltaic modules,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 21, no. 5, p. n/a-n/a, Apr. 2012.
- [21] J. Y. Ye, T. Reindl, A. G. Aberle and T. M. Walsh, “Effect of solar spectrum on the performance of various thin-film PV module technologies in tropical Singapore,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 5, pp. 1268–1274, 2014.



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo revistas@uni.edu.pe