

# Medición de parámetros que influyen en el desempeño de un sistema fotovoltaico

E. E. Vázquez<sup>a</sup>, R. A. Félix<sup>a</sup>, A. Rincón<sup>a</sup>, A. Regalado<sup>a</sup>, E. G. Espinoza<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad de Colima (UCol),  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Carretera Colima - Coquimatlán km 9, Valle de las Huertas, 28400 Coquimatlán, Colima, Mexico.  
{erick\_vazquez, rfelix, rinconpulido, eespinoza3}@ucol.mx

2019 Published by DIFU<sub>100ci</sub>@ <http://difu100cia.uaz.edu.mx>

---

## Resumen

En este trabajo se presenta la implementación y resultados preliminares del prototipo de medición de parámetros de operación de los sistemas fotovoltaicos (PMP) y la obtención de la base de datos experimental, que permitirán la evaluación de las tecnologías fotovoltaicas de silicio, monocristalina y policristalina respectivamente.

Se resalta la importancia de la medición de los parámetros de operación de un sistema fotovoltaico y la diferencia que pudiera resultar del uso de una tecnología de silicio en particular con respecto a las condiciones reales del sitio a emplazar el sistema, lo anterior debido a la diversidad de microclimas que existen en el país y que afectan directamente el desempeño de dichas tecnologías bajo idénticas condiciones de trabajo.

Se describe en líneas generales como está integrado el prototipo de medición, su funcionamiento y alcance, por otro lado, se describe, en primera instancia, la instalación de los sistemas de prueba fotovoltaicos con tecnología monocristalina y policristalina interconectados a la red eléctrica, así como los resultados preliminares basados en base de datos experimental adquirida.

*Palabras clave:* tecnología fotovoltaica, monocristalino, policristalino, prototipo de medición.

---

## 1. Introducción

En la actualidad, es indispensable llevar a cabo investigaciones enfocadas al comportamiento de los sistemas fotovoltaicos (SFV) bajo condiciones de operación reales en diferentes zonas de México, esto debido a que los equipos que conforman un SFV son en su mayoría importados y las condiciones en que se realizan las pruebas de los mismos, llamadas Condiciones Estándar de Prueba (STC, del inglés Standard

Test Conditions), y modelos generados de módulos solares fotovoltaicos (MSF), difieren de las condiciones de operación reales que se observan en las zonas que son instalados. De igual manera, los datos climatológicos de las diferentes zonas que conforman México no se encuentran actualizados debido a las variaciones producidas por el efecto del cambio climático y su consiguiente aumento de temperatura [1][2]. Por otro lado, las bases de datos actuales no contemplan una relación entre las distintas variables que afectan el desempeño

de un SFV, por ello es indispensable realizar mediciones para integrar una base de datos con los parámetros que inciden en el desempeño de los SFV.

Así mismo, las características inherentes a la tecnología fotovoltaica, principalmente en los MSF de silicio, han permitido la obtención de eficiencias cada vez más altas bajo condiciones STC, es por lo anterior que el objetivo general de este proyecto de investigación es la implementación de un prototipo de medición de sistemas fotovoltaicos (PMP) que permita evaluar y caracterizar las tecnologías fotovoltaicas de silicio monocristalina y policristalina. Es importante resaltar que este proyecto sentará las bases para el desarrollo de una línea de investigación que obtendrá sus primeros resultados en una media de cinco años de mediciones constantes que se pretende concluir con un modelo de SFV que contemple las condiciones de operación de la zona en que será instalado y provea de información relevante en la toma de decisión, esto en cuanto a la tecnología apropiada para esa zona y la prospección de generación. Para la realización de este proyecto de investigación fue necesario llevar a cabo los siguientes rubros:

- Diseño, pruebas e implementación de un prototipo de evaluación de tecnologías fotovoltaicas de silicio (PETFV) bajo condiciones de operación reales en la zona occidente de México.
- Pruebas y puesta en operación del PMP en el PETFV, ubicado en la zona occidente de México.
- Obtención de una base de datos preliminar de parámetros que influyen en el desempeño de un SFV en la zona occidente de México, que sienta las bases para la obtención de un modelo de SVFI con el objetivo de predecir el comportamiento de estos bajo condiciones de operación reales.

## 2. Prototipo de medición

El PMP registra las mediciones de los parámetros que inciden en el desempeño de un SFV, siendo estos diferenciados en dos rubros, los que inciden directamente en la generación, tal como la irradiación solar, temperatura de celda y caudal de viento, así como los que son resultado de la conversión de energía a través de los MSF, tal como la tensión y corriente generadas y posteriormente almacenada en un banco de baterías o entregada a la red vía un inversor acoplado a la misma. De igual manera, el PMP posee ocho canales analógicos de registro analógicos de datos, el rango de medición es de 0 V a 1.1 V y tiene una resolución de 10 bits. Este prototipo es empleado actualmente

en el desarrollo de diversos proyectos enfocados en el uso de energías alternativas, por otro lado, el prototipo se encuentra en la fase de dictaminación ante el IM-PI, bajo el apartado de Modelo de Utilidad con el Folio MX/u/2016/000201. El PMP es empleado para generar una base de datos experimental de los parámetros registrados de desempeño de dos SFV interconectados a la red que presentan condiciones similares de operación, siendo registrado el comportamiento de las tecnologías de silicio más empleadas a nivel comercial, los MSF de celdas monocristalinas como policristalinas, para de esta manera obtener una primera caracterización del comportamiento.

### 2.1. Parámetros de medición del PMP

A continuación, se enlistan los parámetros que realiza mediciones el PMP, se describe en qué radica la importancia de medir cada uno de ellos para la realización de una evaluación correcta de las tecnologías fotovoltaicas monocristalina y policristalina de silicio.

1. Corriente y tensión en CD: la medición de estos parámetros entregan la información necesaria para determinar el desempeño y la eficiencia del MSF. El punto de medición se encuentra en el circuito que alimenta al inversor que interconecta el SFV a la red, los sistemas de prueba serán descritos en una sección posterior. Para la medición de corriente se empleó el sensor de efecto Hall CSLA2CF [3], el cual cuenta con intervalo de medición comprendido entre 54 mA por lectura mínima y 56.12 A como lectura de corriente máxima, dicho sensor se habilitó para conectarse de manera funcional al circuito de alimentación proveniente de los MSF; la tensión se mide de manera directa a través de un acondicionador de tensión, un divisor de voltaje, ubicado en las terminales de acoplamiento del portafusible que protege al circuito de CD antes de conectarse al inversor.
2. Radiación solar: la importancia de medir este parámetro radica en el hecho de que la radiación solar es inherente a la generación de un MSF. La generación de energía fotovoltaica requiere de la incidencia de la luz solar directamente sobre las celdas de un módulo, lo anterior debido a las características intrínsecas del material semiconductor del que están hechas lo que permite a los fotones incidentes provocar un flujo de electrones, el cual puede ser almacenado a través del uso de un regulador de carga en un banco de baterías o ser transformado en corriente alterna y transferirse a la red a través de un inversor. Para la medición

de la radiación solar se empleó un sensor DAVIS SSR6450 [4], siendo el registro mínimo de  $1.9316 \text{ W/m}^2$ .

3. Temperatura de celda: todos los materiales semiconductores tienen coeficientes de temperatura, ya sean positivos o negativos. Siendo una celda fotovoltaica constituida por un material semiconductor, estos coeficientes de temperatura tienen incidencia directamente en el desempeño de un MSF, por lo que resulta de suma importancia medir la temperatura de la celda para poder observar el efecto que tiene sobre la generación de energía fotovoltaica, y determinar si es necesario implementar algún mecanismo para disipar esa temperatura de manera que el MSF trabaje a una temperatura óptima, lo anterior debido a que si se retira el calor en la cara inferior del MSF, este podría ocuparse para otro proceso y estabilizaría la temperatura del módulo y por ende la corriente generada. Para la medición de la temperatura de celda se empleó el sensor LM35, con una resolución de  $0.3225^\circ\text{C}$ .
4. Velocidad del viento: este parámetro tiene un efecto indirecto sobre la generación de un panel fotovoltaico. El viento afecta a la generación de un panel en la temperatura de la celda; retirando una proporción de calor superficial de la celda mediante convección natural, por lo tanto, el viento puede llegar a incidir en el desempeño de un MSF. En primera instancia se han realizado las mediciones a través de un equipo WEATHER SENSOR ASSEMBLY P/N 80422, el cual mide velocidad y dirección del viento, siendo el registro mínimo de viento  $0.66 \text{ m/s}$ , sin embargo, este sensor será sustituido por el sensor DAVIS Vantage Pro D6410 [5], con una resolución de  $0.25 \text{ m/s}$ .

Otra de las características del PMP es la inclusión de un reloj de tiempo real (RTC, del inglés Real Time Clock), el cual proporciona estampas de tiempo para cada medición, de tal manera que se conoce la hora, minutos, segundos, día, mes y año en que registre cada dato. Además, cuenta con un módulo lector de tarjetas SD para realizar el registro y almacenamiento de las mediciones que realice el prototipo, esto para contar con un registro de la base de datos generada. En la Figura 1 se muestra el PCB central del prototipo, en su etapa de registro de datos interactúa con los sensores en una topología tipo estrella de la siguiente manera: el microprocesador recibe las señales enviadas por los sensores, las procesa para convertirlas en los valores equivalentes a las mediciones y les agrega la estampa de tiempo proporcionada por el RTC. Posteriormente,

escribe los datos en un archivo de texto, el cual se almacena en la tarjeta SD.



Figura 1. Módulo de adquisición de datos del PMP.

En la Figura 2 se muestra la etapa de transmisión de datos inalámbrica, la cual permite transmitir los datos registrada diariamente a través de radios XBee desde el punto de recolección hasta el punto de almacenamiento y visualización, este módulo del PMP esta conformado por un MSF de  $10\text{W}@12\text{V}$ , un regulador de  $12 \text{ V}$  nominales con salida de  $3 \text{ A}$ , una batería de plomo ácido de  $12\text{V}@7\text{Ah}$  y un módulo Buck de  $24 \text{ V}$  a  $3.3 \text{ V}$  para la alimentación del radio XBee Pro empleado para la transmisión de datos.



Figura 2. Módulo Router del PMP.

Otras características que se deben mencionar acerca del prototipo son: su autonomía, puesto que su alimentación se realiza de manera independiente a los SFV que componen al prototipo de evaluación, siendo esta de dos días y medio; la frecuencia de muestreo del prototipo, lo anterior permite obtener una registro puntual de la señal medida, la cual es de una muestra por segundo; la duración de un evento de medición, el cual comprende 12 horas diarias; y la programación del PMP en una plataforma de software libre como lo es Arduino.

### 3. SFV de evaluación PETFV

Ha quedado establecido que para poder realizar una correcta evaluación de las tecnologías fotovoltaicas de silicio, se debe generar una base de datos preliminar que integre los principales parámetros que influyen en el desempeño de un SFV. Además de lo anterior, se requiere implementar un sistema fotovoltaico para cada tecnología que se evaluará. Dichos sistemas deberán tener las mismas características y trabajar bajo las mismas condiciones de operación para que la evaluación sea válida. Tomando como referencia lo anteriormente descrito, se implementó un PETFV que está constituido por dos SFV cuyas características se muestran en la Tabla 1.

En la Figura 3 se muestra el SFV de evaluación de tecnologías fotovoltaicas de silicio, se observa el campo solar completo, siendo los primeros cinco módulos observados los policristalinos y los segundos cinco módulos los monocristalinos, de igual manera se observa el módulo de transmisión de datos en primer plano y a espaldas del campo solar el nicho en que se encuentran los inversores de interconexión a la red.



Figura 3. SFV de evaluación de tecnologías de silicio.

Para poder analizar los datos registrados por el PMP teniendo la certeza de que los resultados que se obtendrán a partir de éstos serán confiables, resulta imperativo validar de alguna forma las mediciones registradas por el prototipo de medición propuesto. Las mediciones de los parámetros atmosféricos serán realizadas posteriormente, esto debido a que se emplearán datos de una estación anemométrica DAVIS Vantage Pro, y puesto que los sensores son de la misma marca se prevé que los datos recabados no varíen ostensiblemente.

Sin embargo, para la validación de las mediciones de tensión y corriente realizadas por el PMP en los campos monocristalino y policristalino se utilizó el PowerPad 8335 de AEMC, empleando las pinzas MR193 que pueden medir una tensión de 600 V y una corriente de 10-1000 ACC con una salida de 1 mV/A. Los resultados obtenidos son satisfactorios puesto que se obtuvo una

diferencia máxima de 1.8 %, lo cual se encuentra dentro del margen de variación de los sensores de corriente CSLA2CF y las resistencias de precisión empleadas en el acondicionador de la señal de tensión. Las pruebas de validación se llevaron a cabo en días diferidos, esto debido a que solo se cuenta con un juego de pinzas MR193 y no es posible medir simultáneamente los dos campos solares. En la Figura 4 se observa la diferencia entre las lecturas de corriente, en el campo solar monocristalino (CSM), del PMP y el PowerPad, es importante mencionar que la muestra presentada es aleatoria debido a que solo es necesario validar un segmento de las curvas registradas. Se observa que la diferencia entre ambos oscila cercana a cero, esta diferencia puede reducirse calibrando el offset de los sensores de medición de parámetros, a su vez, también hay que considerar que el PowerPad tiene un algoritmo de medición de promedios ponderados, por lo cual el resultado mostrado siempre será menor al registrado en datos crudos.

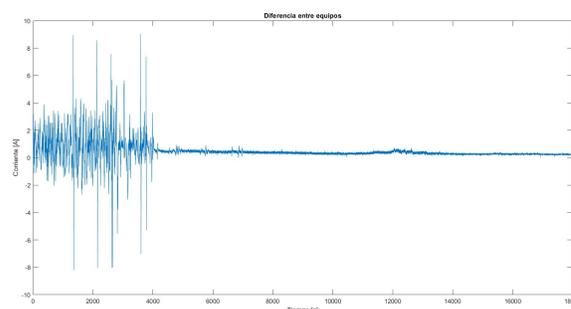


Figura 4. Validación de la medición de corriente del PMP con respecto al PowerPad en el CSM.

En la Figura 5 se muestra la comparativa entre las mediciones de tensión registradas por el prototipo y el PowerPad, se aplica el mismo criterio que en las mediciones de corriente.

Se realizó el mismo procedimiento para validar la medición del campo fotovoltaico policristalino, en la Figura 6 se muestra la validación de corriente y en la Figura 7 la validación de la tensión. Es importante recalcar que los perfiles mostrados son diferentes debidos a que las mediciones se llevaron a cabo en días diferidos, no obstante la diferencia de tecnología, los resultados son muy similares en cuanto a la diferencia entre las dos mediciones.

### 4. Resultados preliminares

Una vez llevado a cabo la validación de los parámetros de salida, se obtienen los datos a través del PMP, dichos datos se configuraron para que fueran empaquetados por hora durante un periodo de 12 horas diarias.

Tabla 1. Características de los SFV que componen al SFV de evaluación

Características	Sistema 1	Sistema 2
Tecnología	Monocristalina	Policristalina
Marca del panel	SolarWorld	CanadianSolar
Modelo del panel	SWA 350 XL	mono CS3U-350P
Coefficiente de Temp.	$CT_{Isc} = 0.03 \%/^{\circ}C$ $CT_{Voc} = -0.29 \%/^{\circ}C$ $CT_{Pmax} = -0.42 \%/^{\circ}C$	$CT_{Isc} = 0.05 \%/^{\circ}C$ $CT_{Voc} = -0.29 \%/^{\circ}C$ $CT_{Pmax} = -0.37 \%/^{\circ}C$
Número de módulos	5	5
Capacidad instalada	1,750 W	1,750 W
Inversor	Fronius Galvo 1.5-1 208-240	Fronius Galvo 1.5-1 208-240
Tipo de conexión	Interconectado a red	Interconectado a red

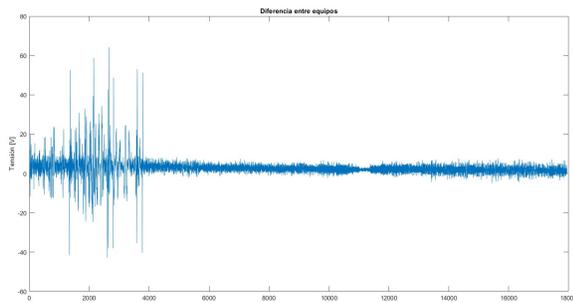


Figura 5. Validación de la medición de tensión del PMP con respecto al PowerPad en el CSM.

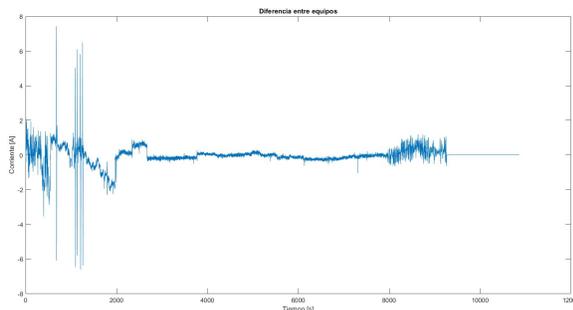


Figura 6. Validación de la medición de corriente del PMP con respecto al PowerPad en el CSP.

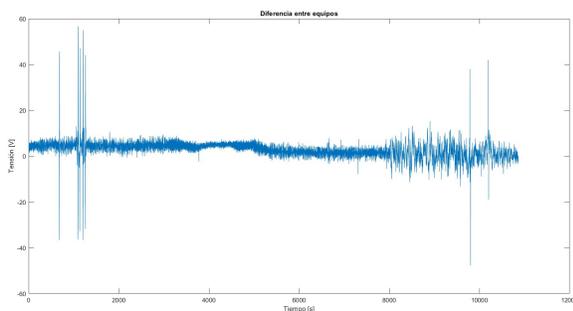


Figura 7. Validación de la medición de tensión del PMP con respecto al PowerPad en el CSP.

La base de datos que se presentará a continuación fue obtenida el día cuatro de julio de 2019, el evento de

medición inició a las 7:00 horas y terminó a las 19:00 horas, registrando los parámetros de: velocidad del viento, radiación solar, temperatura de celda, corriente en CD y tensión en CD para cada SFV, realizadas con una frecuencia de una muestra por segundo.

En la Figura 8 se muestran los datos en crudo de la medición realizada al campo solar monocristalino, al ser magnitudes elevadas entre sí no se alcanza a observar el comportamiento de cada una de las curvas en lo particular, sin embargo, es muy ilustrativo apreciar el comportamiento real de los módulos fotovoltaicos monocristalinos en condiciones de operación reales.

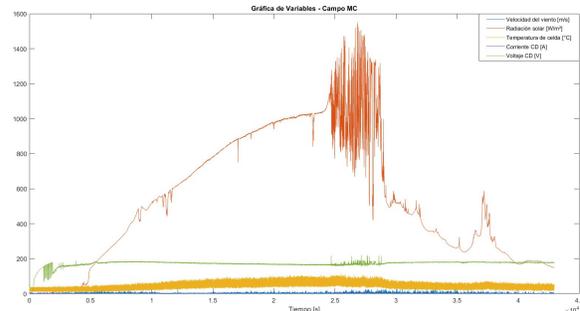


Figura 8. Comportamiento del CSM.

En la Figura 8 se puede apreciar que el día de referencia hubo una intermitencia debida a la variación repentina por lluvia, esta variación es reflejada tanto en la señal de tensión (verde) como en la temperatura de celda (amarillo), siendo visible como la temperatura empieza a disminuir cuando la irradiación y la tensión decaen, una vez pasado el periodo transitorio se estabiliza y se incrementa ligeramente. En la Figura 9 se muestran las curvas ajustadas del mismo CSM para poder apreciar la interacción de los parámetros entre sí y como se reflejan en las variables de salida del campo, los coeficientes de ajustes son los siguientes: para la curva de velocidad de viento (azul) el coeficiente de ajuste es de 20, para la temperatura celda (amarillo) el

coeficiente de ajuste es de 5, para la corriente en CD (morada) el coeficiente de ajuste es de 80, las curvas de irradiación (café) y tensión (verde) se muestran en su escala real debido a que si es posible apreciarlas en la gráfica.

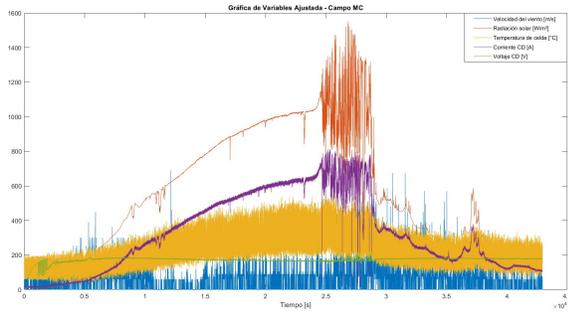


Figura 9. Comportamiento del CSM (curvas ajustadas).

En la Figura 9 se puede apreciar el comportamiento de la corriente en función de la radiación, lo anterior debido a que es patente la similitud entre las formas de ondas, sin embargo, también es apreciable las desviaciones producidas por su interacción con los demás parámetros registrados.

Los datos reales recabados de la tecnología policristalina se muestran en la Figura 10, en ella se observa cierta similitud con la Figura 8, esto es debido a que ambos campos solares son de la misma capacidad instalada y se encuentran acoplados en el mismo punto de operación, en este caso ambos sistemas están interconectados a la red y esta actúa como un bus infinito con respecto a ambas conexiones, de tal manera que van a transferir la totalidad de la energía generada a la red, por lo tanto ambos sistemas van a trabajar con una alta eficiencia. Sin embargo, si existen diferencias entre ambos sistemas, esto se analizará punto a punto en un posterior trabajo, siendo la más significativa la tensión registrada en ambas gráficas.

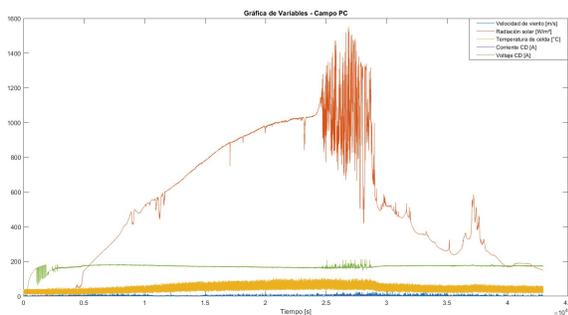


Figura 10. Comportamiento del CSP.

En la Figura 11 se muestra la curva ajustada del CSP, los coeficientes de ajuste son los mismos que se definieron para el CSM.

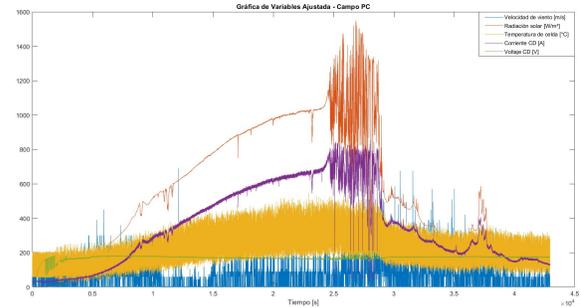


Figura 11. Comportamiento del CSP (curvas ajustadas).

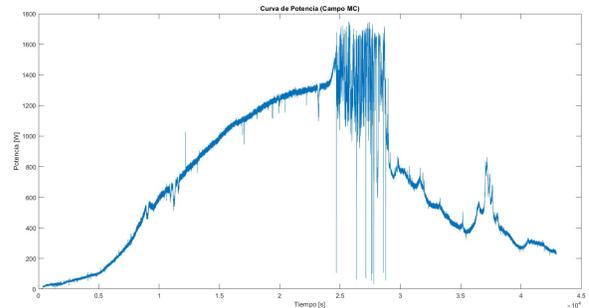


Figura 12. Curva de potencia del CSM.

Se observa en la Figura 12 la curva de potencia obtenida durante el día de medición de datos registrados por el CSM, mostrando similitud con la curva de irradiación en lo general, sin embargo, se pueden apreciar las diferencias en los transitorios, ya que la corriente y la tensión tienen variaciones al interactuar con el resto de los parámetros que intervienen en el desempeño de los MSF, tanto intrínsecos como extrínsecos.

En la Figura 13 se observa la curva de potencia obtenida de los datos registrados del CSP, de igual manera que lo observado en la curva de potencia del CSM, se aprecian las variaciones entre las curvas de irradiación solar y potencia inherentes a la tecnología de módulos policristalinos de silicio.

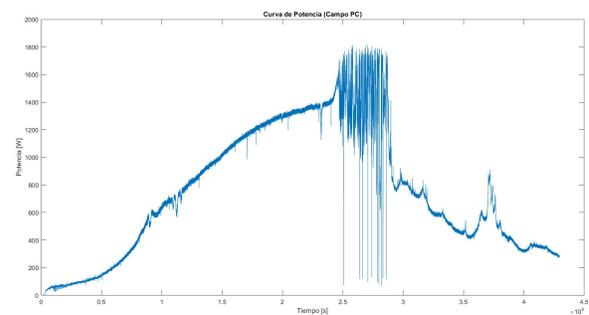


Figura 13. Curva de potencia del CSP.

En la Figura 14 se muestra la comparativa de ambos sistemas en la representación de las curvas de potencia para los datos registrados el día cuatro de julio de 2019,

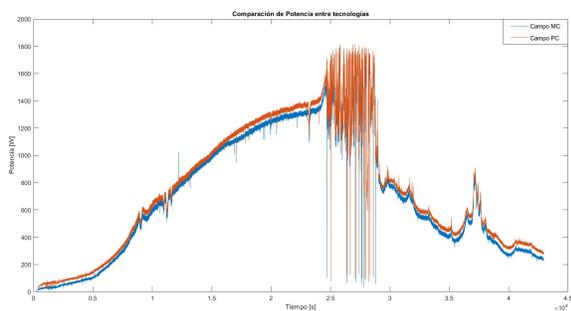


Figura 14. Comparación de curvas de potencia CSMvsCSP.

observándose que en este día en particular el sistema policristalino tuvo una mayor potencia total registrada que el monocristalino, sin embargo, los resultados son puntuales y preliminares, por lo que hay que obtener una mayor cantidad de datos para generar una tendencia real de operación.

Este proyecto sienta las bases para realizar una investigación orientada a obtener información que permita caracterizar el comportamiento de los MSF de ambas tecnologías en condiciones de operación diversas debido a la gran diversidad de microclimas que existen en todo el país, sin embargo, la constante a todos ellos es la gran irradiación en prácticamente todo el territorio nacional, es por ello que se plantea como trabajo futuro inmediato que a partir de esta base de datos se generen los pares de curvas de operación más características de los SFV para cada tecnología. Para cada par de curvas se obtendrá una gráfica, realizada por medio de métodos estadísticos básicos, que describa el efecto de un parámetro sobre el otro, esto para caracterizar ambas tecnologías y obtener información acerca de cómo influyen los parámetros medidos sobre la generación de un SFV para posteriormente comparar como son estas influencias para cada tipo de tecnología. Los efectos que se presentan y analizarán son los de la radiación sobre la corriente, la radiación sobre la temperatura de celda y la temperatura de celda sobre la corriente. Es importante resaltar que los resultados mostrados en esta sección son preliminares, no obstante, permiten visualizar las curvas antes mencionadas. De igual manera, se propone que para describir los efectos mencionados anteriormente se realice un análisis de regresión lineal [6]. Una vez validados los datos obtenidos y se tenga certidumbre en las muestras adquiridas y la interacción de los parámetros, se prevé que puedan ser instalados los PMP en diversas IES que cuenten con SFV, esto para generar una base de datos robusta que comprenda distintas condiciones de operación y determinar así el uso eficiente de cada tecnología.

## 5. Conclusiones

El objetivo de obtener una base de datos preliminar empleando un prototipo de medición de parámetros en un sistema fotovoltaico fue llevado a cabo con resultados óptimos en cuanto a la información recabada. Resulta evidente, hasta este punto del proyecto, que ambas tecnologías fotovoltaicas, monocristalina y policristalina, tienen comportamientos distintos, siendo el principal la corriente generada en ambos SFV, tanto en condiciones STC como en las condiciones de operación reales bajo las que realizó la evaluación preliminar de las tecnologías. Se observa en todas las mediciones registradas, tanto para validación como para evaluar tecnologías, la intermitencia del recurso solar, es por ello que el resultado mostrado es preliminar, por lo tanto, es necesario verificar a detalle la medición del PMP y obtener una base de datos de meses completos para así realizar el análisis propuesto y obtener un resultado confiable.

## Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Programa para el Desarrollo de Personal Docente para el Tipo Superior (ProDEP), Secretaria de Educación Pública en México.

## Referencias

- [1] Veldhuis, A. J., Nobre, A., Reindl, T., Ruther, R., & Reinders, A. H. M. E. "The influence of wind on the temperature of PV modules in tropical environments, evaluated on an hourly basis", 2013. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 31(0), 824–829.
- [2] Dubey, R., Batra, P., Chattopadhyay, S., Kottantharayil, A., Aroora, B. M., Narasimhan, K. L., & Vasi, J. "Measurement of temperature coefficient of photovoltaic modules in field and comparison with laboratory measurements", 2015. 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015.
- [3] Honeywell International, Inc. "Hoja de datos del Sensor de Corriente de Efecto Hall Honeywell CSLA2C", Recuperado 14 agosto, 2019, de <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-current-csla-series-catalog-pages.pdf>
- [4] Davis Instruments. "Hoja de datos del Sensor de Radiación DAVIS D6450.", Recuperado 22 julio, 2019, de [https://www.davisinstruments.com/product\\_documents/weather/spec\\_sheets/6450\\_SS.pdf](https://www.davisinstruments.com/product_documents/weather/spec_sheets/6450_SS.pdf)
- [5] Davis Instruments. "Hoja de datos del Sensor Anemómetro DAVIS D6410", Recuperado 2 junio, 2019, de [https://www.davisinstruments.com/product\\_documents/weather/spec\\_sheets/6410\\_SS.pdf](https://www.davisinstruments.com/product_documents/weather/spec_sheets/6410_SS.pdf) (2019)
- [6] Gutierrez, H., & De la Vara, R. "Análisis y diseño de experimentos", 2008. Ed. Mc Graw-Hill Interamericana.