

Implementation of a Photovoltaic Array Simulator based on a Virtual Instrument and a Lab Programmable Power Supply

Fabio Tomás Moreno Ortiz*. Fortino Mendoza Mondragón**
 Jorge Moreno**. Ubaldo J. Flora*

*Universidad Tecnológica de Querétaro, Querétaro, México
 (e-mail: famoreno@uteq.edu.mx).
 **LICORE. Querétaro, México
 (e-mail: f.mendoza@licore.org)

Abstract: This paper shows the integration of a control system based on a virtual instrument that controls a laboratory power supply through a data acquisition card. The system emulates the performance of photovoltaic arrays where each element can be set to different levels of irradiance. Algorithms superpose the response curves interpolated by the Sandia simplified model, simulating partial shade conditions. Since the developed simulator uses general-purpose equipment, it could be a useful tool to test photovoltaic inverters in a flexible and inexpensive way with a performance like specialized equipment.

Keywords: Modeling and simulation of systems, electronic power systems, renewable energy resources, photovoltaic models, virtual instruments.

1. INTRODUCCIÓN

Los paneles fotovoltaicos (PF) son módulos conformados por arreglos de celdas fotovoltaicas (CF) en serie y paralelo (Fig. 1). El comportamiento de las variables eléctricas de los PF es el resultado de la superposición del comportamiento individual de las variables eléctricas de las CF que componen los PF. Del mismo modo, el comportamiento de las variables eléctricas de un arreglo de PF es el resultado de la superposición del comportamiento individual de las variables eléctricas de cada panel.

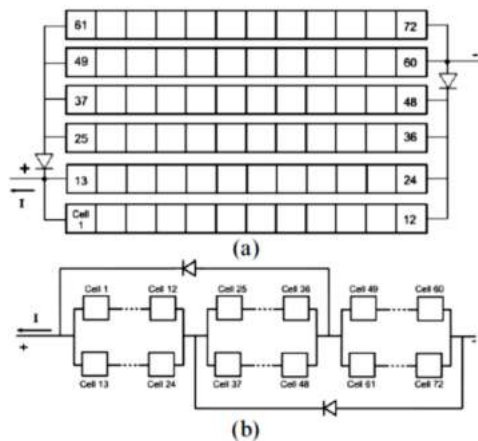


Fig. 1. Panel fotovoltaico (a) distribución física (b) circuito eléctrico (fuente: Pallejà Cabré, 2012)

La corriente (I_{PV}), tensión (V_{PV}) y potencia (P_{PV}) de una celda fotovoltaica cambia en función de las variables climatológicas y de los sombreados que afectan las CF. Debido a esto, el punto de máxima potencia (MPP) que entrega un PF es variable e intermitente y depende de temperatura (T) e irradiancia (Irr) del elemento fotovoltaico (1).

$$P = V_{Max} I_{Max} \frac{Irr}{Irr_{STC}} \left[1 + \frac{\beta}{100} (T - T_{STC}) \right] \quad (1)$$

Cuando los elementos fotovoltaicos de un arreglo se conectan en serie sus curvas se superponen, la tensión de circuito abierto de la cadena es la suma de las tensiones de circuito abierto de cada elemento, en tanto que la corriente es la misma para toda la cadena. En paralelo, las corrientes de las cadenas se suman, mientras que la tensión del arreglo paralelo es la de la cadena que tiene la tensión más alta.

En los arreglos con sombra parcial, la corriente de la cadena serie se escalona en el intervalo de tensión de operación de la cadena, bajando de nivel luego de que se rebasa la tensión de los elementos más iluminados hasta, finalmente, seguir la curva de descenso del elemento menos iluminado cerca de la tensión de circuito abierto (Pallejà Cabré, 2012). De manera similar sucede con la tensión de los elementos en paralelo (Fig. 2).

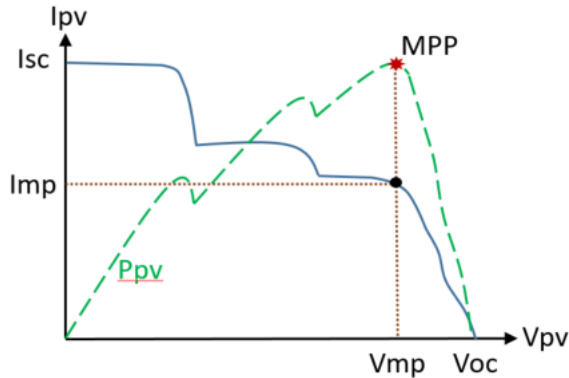


Fig. 2. Comportamiento de las variables eléctricas de un arreglo de PF, la línea continua es la curva tensión-corriente (I-V).

En una instalación de PF los inversores tienen la función de convertir la corriente directa (CD) que generan los PF a la corriente alterna (CA) de la red eléctrica. Durante el proceso de conversión los inversores se tienen que ajustar automáticamente para extraer la máxima cantidad de energía instantánea disponible en el arreglo de PF. A esto se le conoce como seguimiento del punto de máxima potencia (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Existen múltiples esfuerzos orientados a mejorar el desempeño del MPPT (Peña Aguirre, et al., 2018) (Acevedo Meza, et al., 2017) (Murdoch & Reynoso, 2013).

En el proceso de desarrollo de la tecnología de inversores, los fabricantes necesitan simular de manera controlada el comportamiento de arreglos de PF, con el objetivo de evaluar el desempeño de la función MPPT basado en el estándar EN50530 y la norma UL1741.

Un simulador de arreglos fotovoltaicos (SAF) es un sistema que calcula el comportamiento del arreglo y regula la salida de una fuente de energía para emular la corriente y tensión variable que suministra el arreglo de PF en determinadas condiciones ambientales y de carga controladas por el usuario en la prueba (Agrawal & Aware, 2016) (Ram, et al., 2018).

En este trabajo se muestran los resultados de la implementación de un simulador de arreglos de elementos fotovoltaicos basado en una computadora personal conectada a una fuente de alimentación comercial que emula el comportamiento del arreglo en condiciones de sombra parcial. En la sección 2 se muestra el modelo utilizado, en la 3 la implementación del sistema, en la 4 los resultados de las pruebas y al final la discusión y las conclusiones del trabajo.

2. MODELO DE COMPORTAMIENTO FOTOVOLTAICO

El propósito del modelo es determinar las curvas características de un elemento fotovoltaico que describan el comportamiento de la potencia eléctrica que son capaces de proporcionar bajo determinadas condiciones ambientales de operación. Existen dos categorías de modelado de elementos fotovoltaicos (Ayop & Tan, 2017):

1. Circuito eléctrico. Se basa en la representación del elemento fotovoltaico con su circuito eléctrico equivalente. Las ecuaciones características se obtienen mediante la aplicación de las leyes de Kirchoff y también se le conoce como modelo analítico.
2. Interpolación. Se basa en funciones matemáticas que intersecan la corriente y la tensión del elemento fotovoltaico. Normalmente requieren de puntos específicos de la curva que son proporcionados por el fabricante en las condiciones estándar de prueba (Standard Test Conditions, STC).

Para el proyecto se utilizó un modelo de interpolación debido a que, para comparar los resultados, se tomó como referencia la aplicación *Solar Array Simulation Soft Panel* de Chroma y el manual de usuario indica que uno de los modelos que utiliza es el Sandia simplificado (Chroma ATE Inc., 2016). El modelo desarrollado por Sandia National Laboratory (de Soto, et al., 2006) utiliza los parámetros dados por el fabricante para interpolar las curvas en función de la temperatura e irradiancia del elemento fotovoltaico, calculando la corriente para cada valor de tensión de salida. La ecuación (2) describe la interpolación de la corriente de la celda (I_{PV}) en función de la tensión fotovoltaica (V_{PV}) y las características de corriente de corto circuito (I_{SC}) y tensión de circuito abierto (V_{OC}) dadas por el fabricante.

$$I_{PV} = I_{SC} \left[1 - C_1 \left(e^{\frac{V_{PV}}{C_2 V_{OC}}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

3. IMPLEMENTACIÓN

La implementación del SAF se realizó mediante la integración de un instrumento virtual y equipos de laboratorio. Como elementos físicos del sistema, se utilizaron una computadora personal (laptop), una tarjeta de adquisición de datos (DAQ), una fuente de corriente directa regulable y una carga electrónica configurable (Fig. 3).

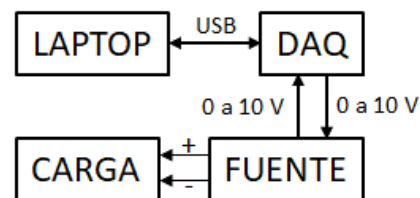


Fig. 3. Diagrama de bloques del SAF implementado.

Las características principales de cada uno de los equipos e instrumentos del SAF se describen a continuación:

1. *Laptop* HP Probook 440 G5. Procesador Intel Core i5-8250U, 1.6 GHz. Memoria RAM 8 GB. Sistema operativo Windows 10 Pro, 64 bits.
2. *DAQ* NI USB6351. 16 canales de entrada analógica, 16 bits, 1.25 MS/s, ± 10 V. 2 canales de salida analógica, 16 bits, 2.86 MS/s, ± 10 V, ± 5 mA. 24 canales de entrada/salida digital. 1 puerto USB 2.0 de alta velocidad.

3. *Fuente* GwINSTEK PSU400-3.8. Potencia de salida 1,520 W corriente directa. Intervalo de tensión 0 – 400 V. Intervalo de corriente 0 – 3.8 A. Prioridad en el control de tensión sobre el de corriente. Puerto de control analógico.

4. *Carga* Chroma 63630-600-15. Potencia máxima 300 W. Tensión máxima de carga 600 V. Corriente máxima de carga 15 A. Modos de operación flexible en corriente constante (CC), resistencia constante (CR), tensión constante (CV) y potencia constante (CP). Comunicación USB.

La función de interpolación de la ecuación (2) se programó utilizando el algoritmo que se muestra en la Figura 4. El programa requiere como datos de entrada la tensión de máxima potencia (V_{max}), la corriente de máxima potencia (I_{max}), la tensión de circuito abierto (V_{stc}), la corriente de corto circuito (I_{stc}), la irradiancia (I_{rrStc}), la temperatura (T_{stc}) y el coeficiente de temperatura (B) en condiciones de prueba estándar. En función de la irradiancia (I_{rr}) y la temperatura (T) definidas por el usuario, calcula el valor de la corriente fotovoltaica (I_{pv}) variando la tensión fotovoltaica (V_{pv}) desde 0 V hasta la tensión de circuito abierto (V_{oc}) incrementando en intervalos dados por la resolución (R). Los puntos de la interpolación se almacenan en una tabla que se utiliza para controlar la tensión de la fuente en función de la corriente que demanda la carga.

El algoritmo de modelado y control se programó en un instrumento virtual codificado en LabVIEW 2015, que permite un prototipo ágil en computadoras personales y facilita su implementación en computadoras de tiempo real.

Para el control se utilizaron las señales analógicas de la fuente. El fabricante indica una tolerancia de $\pm 0.5\%$ en el control de tensión y $\pm 1\%$ en el control de corriente mediante señales analógicas de 0 a 10 V, considerando el intervalo de operación de 0 a 400 V y 0 a 3.8 A, significa una tolerancia de ± 2 V y de ± 38 mA en el control de la salida. Para las medidas, refiere una tolerancia de $\pm 1.5\%$ en la señal de lectura analógica de 0 a 10 V para ambos parámetros, que se traduce en una tolerancia de lectura de ± 6 V en tensión y ± 57 mA en corriente.

4. RESULTADOS

Para validar el simulador propuesto, se compararon los valores de los parámetros de salida las y gráficas que arroja contra los proporcionados por la aplicación *Solar Array Simulation Soft Panel* de Chroma, definida como referencia.

4.1 Prueba del Modelo.

Para comprobar el algoritmo de interpolación, la primera prueba comparó la simulación de un elemento fotovoltaico individual con distintos niveles de irradiancia y temperatura. En la Tabla 1 se muestran los resultados variando la irradiancia con temperatura fija y en la Tabla 2 los obtenidos al variar la temperatura con irradiancia fija. Los datos del fabricante fueron tomados de la aplicación de Chroma y se refieren al modelo ST125-P de la marca Soltech.

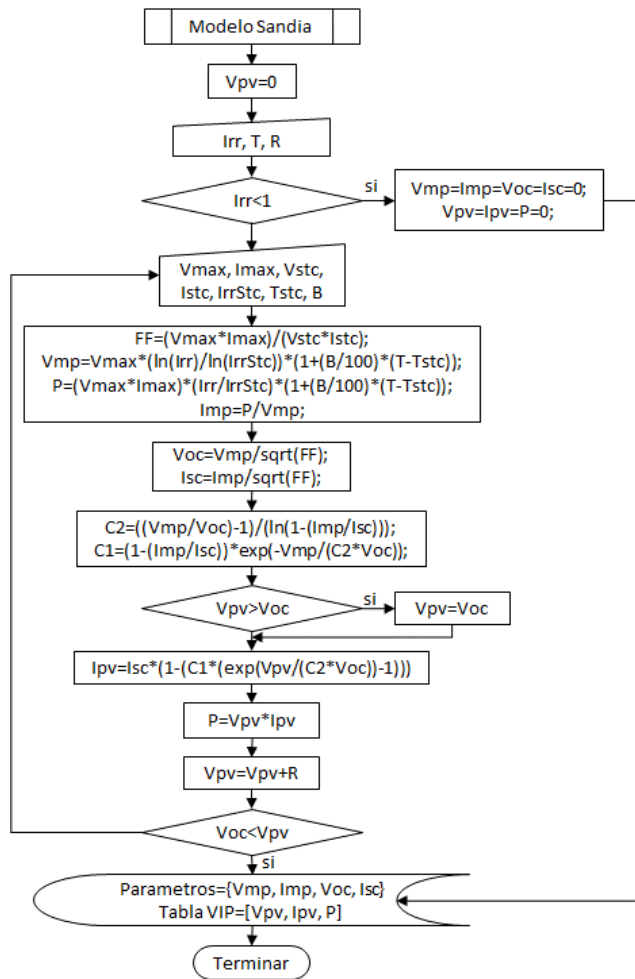


Fig. 4. Diagrama de flujo del algoritmo del modelo Sandia simplificado.

En la segunda prueba se configuraron arreglos de elementos en serie, paralelo y serie-paralelo con distintos niveles de irradiancia, todos a la misma temperatura (25°C). En la Figura 5 se muestran la curvas I-V y en la Figura 6 las curvas P-V de un arreglo serie-paralelo simulado comparadas con las generadas por la aplicación de Chroma.

4.2 Prueba del Sistema.

El funcionamiento del simulador integrando el programa y los equipos se comprobó haciendo dos clases de pruebas: estáticas y dinámica.

Las pruebas estáticas mantienen un parámetro fijo en la carga electrónica. La corriente que demanda la carga es la medida que toma el programa para controlar la tensión de salida de la fuente. La carga se configuró para hacer tres pruebas estáticas: Corriente constante, resistencia constante y potencia constante. Se tomaron cuatro lecturas proporcionadas por el sistema:

- IV set. Valores del punto seleccionado por el programa de control en la curva. Establece la consigna de tensión.
- Fuente. Valores leídos en los indicadores del panel de control de la fuente.

- c. Carga. Valores leídos en los indicadores del panel frontal de la carga.
- d. IV lect. Valores de la adquisición de datos de la fuente mostrados por el programa en la interfaz de usuario.

Tabla 1. Parámetros variando la irradiancia.

Irradiancia: 1000 W/m ²		Temperatura: 25°C	
Parámetro	Simulador	Chroma	Variación
Vmp (V)	27.7	27.7	0.0%
Imp (A)	7.852	7.833	0.2%
Pmp (W)	217.5	217	0.2%
Voc (V)	33.5	33.6	-0.3%
Isc (A)	8.493	8.46	0.4%
Irradiancia: 501 W/m ²		Temperatura: 25°C	
Parámetro	Simulador	Chroma	Variación
Vmp (V)	24.9	24.8	0.4%
Imp (A)	4.376	4.366	0.2%
Pmp (W)	108.962	108.3	0.6%
Voc (V)	30.1	30.3	-0.7%
Isc (A)	4.728	4.696	0.7%
Irradiancia: 167.67 W/m ²		Temperatura: 25°C	
Parámetro	Simulador	Chroma	Variación
Vmp (V)	20.5	20.4	0.5%
Imp (A)	1.799	1.75	2.8%
Pmp (W)	36.4695	35.8	1.9%
Voc (V)	24.8	24.9	-0.4%
Isc (A)	1.92	1.898	1.2%

Tabla 2. Parámetros variando la temperatura.

Irradiancia: 1000 W/m ²		Temperatura: 40°C	
Parámetro	Simulador	Chroma	Variación
Vmp (V)	26.2	26.2	0.0%
Imp (A)	7.852	7.833	0.2%
Pmp (W)	205.722	205.2	0.3%
Voc (V)	31.6	31.8	-0.6%
Isc (A)	8.493	8.46	0.4%
Irradiancia: 1000 W/m ²		Temperatura: 10°C	
Parámetro	Simulador	Chroma	Variación
Vmp (V)	29.2	29.2	0.0%
Imp (A)	7.852	7.833	0.2%
Pmp (W)	229.278	228.7	0.3%
Voc (V)	35.3	35.5	-0.6%
Isc (A)	8.493	8.46	0.4%

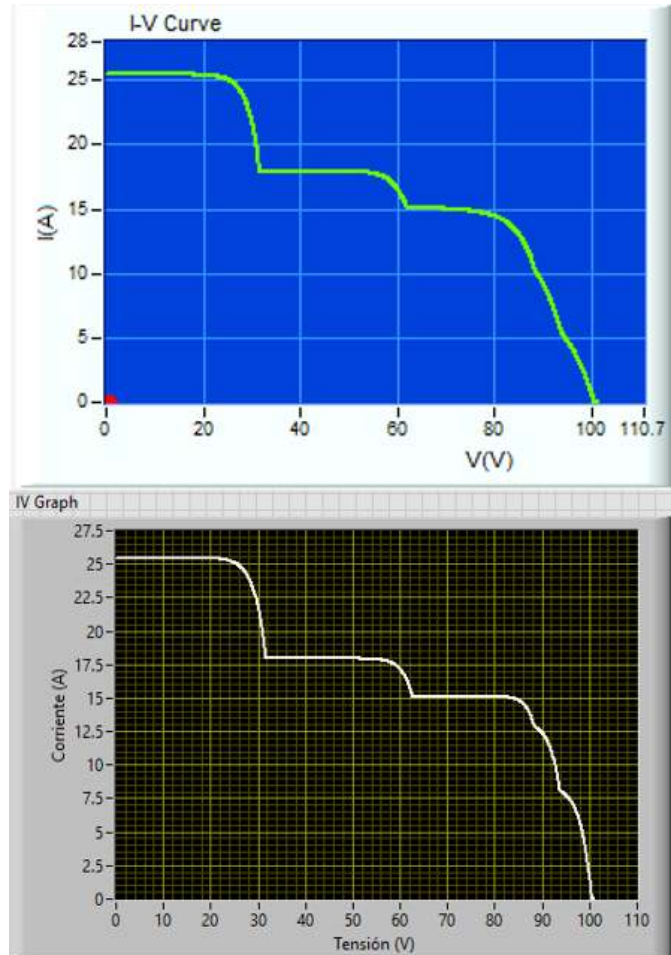


Figura 5. Curvas I-V arreglo serie-paralelo, arriba aplicación Chroma, abajo simulador.

La comparación de las lecturas estáticas nos permite ver la diferencia que hay entre el valor de consigna y el valor medido. La desviación o error en los valores es inherente a la cadena de medición del sistema. La comparación se muestra en la Tabla 3.

La prueba dinámica se realizó utilizando la aplicación *Solar Application Soft Panel* de Chroma. Esta aplicación se comunica con la carga electrónica y genera las curvas I-V y P-V (Fig. 7) de un elemento fotovoltaico desconocido conectado a la carga, también entrega una estimación de los parámetros que caracterizan al elemento (Tabla 4).

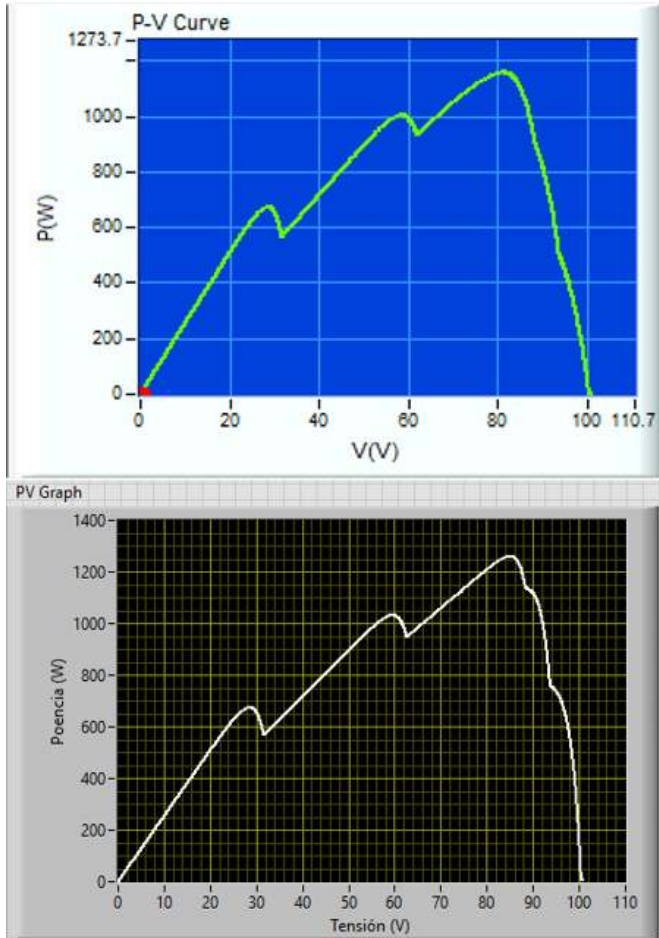


Figura 6. Curvas P-V arreglo serie-paralelo, arriba aplicación Chroma, abajo simulador.

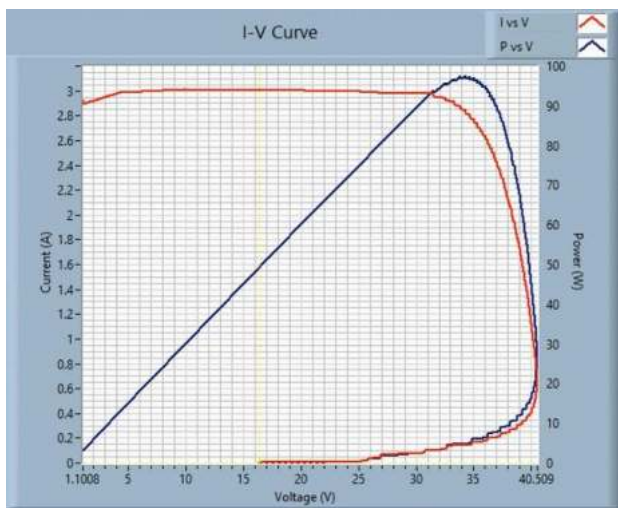


Fig. 7. Curvas generadas por la aplicación Solar Application Soft Panel en la prueba dinámica.

Tabla 3. Lecturas de las pruebas estáticas.

Corriente constante (2.67 A)				
Medidas	IV set	Fuente	Carga	IV lect
Tensión (V)	34.4	33.9	33.854	34.2
Corriente (A)	2.67	2.67	2.671	2.668
Potencia (W)	91.848	90.513	90.415	91.2456
Diferencia	IV set - Fuente	Fuente - Carga	Carga - IV lect	IV set - IV lect
Tensión	-1.5%	-0.1%	1.0%	-0.6%
Corriente	0.0%	0.0%	-0.1%	-0.1%
Potencia	-1.5%	-0.1%	0.9%	-0.7%
Resistencia constante (12.884 Ω)				
Medidas	IV set	Fuente	Carga	IV lect
Tensión (V)	34.7	34.2	34.159	34.3
Corriente (A)	2.645	2.65	2.652	2.648
Potencia (W)	91.7815	90.63	90.5896	90.8264
Diferencia	IV set - Fuente	Fuente - Carga	Carga - IV lect	IV set - IV lect
Tensión	-1.4%	-0.1%	0.4%	-1.2%
Corriente	0.2%	0.1%	-0.2%	0.1%
Potencia	-1.3%	0.0%	0.3%	-1.0%
Potencia constante (90.4 W)				
Medidas	IV set	Fuente	Carga	IV lect
Tensión (V)	35	34.4	34.364	34.4
Corriente (A)	2.617	2.63	2.631	2.628
Potencia (W)	91.595	90.472	90.43	90.4032
Diferencia	IV set - Fuente	Fuente - Carga	Carga - IV lect	IV set - IV lect
Tensión	-1.7%	-0.1%	0.1%	-1.7%
Corriente	0.5%	0.0%	-0.1%	0.4%
Potencia	-1.2%	0.0%	0.0%	-1.3%

Tabla 4. Parámetros resultantes de la prueba dinámica.

Parámetro	Simulador	Aplicación	Variación
Vmp (V)	34.4	34.0762	1.0%
Imp (A)	2.67	2.8594	-6.6%
Pmp (W)	91.848	97.4366	-5.7%
Voc (V)	41.5	40.5554	2.3%
Isc (A)	2.887	3.0172	-4.3%

5. DISCUSIÓN

Los resultados generalmente tienen diferencias de un dígito de porcentaje con la referencia. Las diferencias excepcionalmente altas se dieron en los puntos de máxima potencia en la cadena serie donde la tensión V_{mp} está muy por debajo (-31%) y la corriente I_{mp} está muy por arriba (+53.2%) de los valores dados por la aplicación de referencia; sin embargo, el punto de máxima potencia resultó relativamente cercano (+5.7%).

En las pruebas estáticas del sistema (Tabla 3), la diferencia más grande entre el valor de consigna (I_V set) y el valor de lectura (I_V lec) fue de -1.7% para tensión en potencia constante, esta diferencia es de la cadena completa y abarca las desviaciones producidas por todas fuentes de error e incertidumbre. La variación más alta en tensión fue de -0.6 V y en corriente fue de +11 mA, ambas por debajo del margen de tolerancia de ± 2 V y ± 38 mA de la señal analógica de control de la fuente.

La prueba dinámica muestra que la mayor desviación es en los parámetros de corriente (Tabla 4) que se encuentran por debajo de la calculada por el modelo. En el trazado de la curva se observa que la aplicación inicia con un valor muy bajo de corriente y una tensión cercana a los 15 V para luego ir demandando más energía a la fuente bajo prueba. En la gráfica resultante (Fig. 7) se puede ver que el algoritmo de control genera una curva suave pero tiene dificultades en valores cercanos a la corriente de corto circuito (I_{sc}) donde la tensión se aproxima a 0 V.

Debido a que no se tiene acceso a al algoritmo utilizado por Chroma y a que su aplicación no proporciona los valores de los puntos de las curvas y no interactúa con fuentes fuera de la marca, no se pueden comparar directamente las curvas de la simulación y las salidas de la emulación. Se especula que las diferencias se deben a los métodos numéricos utilizados para interpolar las curvas. En el algoritmo utilizado en este trabajo, la potencia se calcula multiplicando cada pareja de tensión-corriente de la interpolación y luego se elige el punto de máxima potencia localizando el valor más alto de potencia en la tabla. Además, los valores de tensión y corriente fueron redondeados a una décima y una milésima de unidad respectivamente.

6. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que las desviaciones, aunque en términos de porcentaje pueden verse como altas, se encuentran dentro de las tolerancias declaradas por el fabricante. Las curvas generadas en la prueba dinámica muestran trazos suaves con perfiles similares a los esperados, lo que evidencia un control estable de la tensión en función de la corriente por el simulador desarrollado.

Esta metodología de implementar un simulador de arreglos fotovoltaicos utilizando fuentes de propósito general convencionales, es una buena manera de actualizar y proveer de nuevas funcionalidades a equipo que existe en el laboratorio, sin necesidad de adquirir equipos comerciales costosos y especializados. Para efectos académicos y de prueba, la

aproximación del simulador propuesto con el equipo de referencia es aceptable.

Trabajos futuros son la implementación de otros modelos de comportamiento fotovoltaico y de otras técnicas de control para mejorar la regulación de la fuente y compararlos contra las respuestas de paneles reales, embeber los algoritmos en sistemas digitales que permitan reducir el tiempo de respuesta del control con mayor certidumbre en el tiempo de latencia de la cadena de control y construir una red de fuentes que permitan simular arreglos de paneles fotovoltaicos con toda su potencia.

REFERENCIAS

- Acevedo Meza, H., Mendoza García, J. L. & Sepúlveda Mora, S., 2017. Estrategias de control mppt aplicadas en un convertidor dc/dc tipo boost para sistemas fotovoltaicos. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(30), pp. 102-108.
- Agrawal, J. H. & Aware, M. V., 2016. *Photovoltaic Simulator Developed in LabVIEW for Evaluation of MPPT Techniques*. Chennai, IEEE, pp. 1142-1147.
- Ayop, R. & Tan, C. W., 2017. A comprehensive review on photovoltaic emulator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Diciembre, Volumen 80, pp. 430-452.
- Chroma ATE Inc., 2016. *Solar Array Simulation Soft Panel 62000H Series*. Guishan(Taoyuan): Chroma ATE Inc..
- de Soto, W., Klein, S. A. & Beckman, W. A., 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, Enero, Volumen 80, pp. 78-88.
- Goud, P. C. D., Gupta, R. A., Singh, A. K. & Samuel, P., 2015. *GMPPT of solar PV array under partial shading condition using LabVIEW FPGA*. Yokohama, IEEE, pp. 3411-3416.
- Mai, T. D., de Breucker, S. D., Baert, K. & Driesen, J. L., 2017. Reconfigurable emulator for photovoltaic modules under static partial shading conditions. *Solar Energy*, Enero, Volumen 141, pp. 256-265.
- Murdoch, S. & Reynoso, S., 2013. Design and Implementation of a MPPT circuit for a Solar UAV. *IEEE Latin America Transactions*, Abril, 11(1), pp. 108 - 111.
- Pallejà Cabré, J., 2012. *Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico*. Tarragona: Universitat Rovira i Virgili.
- Peña Aguirre, J. C., Ramírez Agundis, A., Rodríguez Segura, E. J. J. & Martínez Nolasco, J. J., 2018. Control Difuso para un Convertidor CD-CD Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos en los Modos MPPT y CV. *Pistas Educativas*, 39(128), pp. 1252-1269.
- Ram, J. P. y otros, 2018. Analysis on solar PV emulators: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 81, pp. 149-160.