

DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO, CONTROL Y ADQUISICIÓN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE BAJO COSTO BASADO EN ARDUINO-OCTAVE

DESIGN OF A LOW COST SYSTEM FOR MONITORING, CONTROL AND CHARACTERISTIC PARAMETERS ACQUISITION OF A PHOTOVOLTAIC MODULES BASED ON ARDUINO-OCTAVE

Jeovany Rafael Rodríguez Mejía

Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, México
jrodriguez@itcj.edu.mx

Arturo Woocay Prieto

Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, México
awoocay@itcj.edu.mx

Recepción: 22/octubre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

El presente documento describe el diseño, desarrollo y evaluación de un sistema de monitoreo, control y adquisición de datos robusto para su uso en equipos de conversión de energía solar. El dispositivo se planteó con el objetivo de medir las variables características para este tipo de sistemas, es decir, radiación solar, temperatura, corriente y voltaje. Además, se diseñó para trabajarse con hardware y software de licencia libre; por tal razón se utilizó un Arduino Mega2560 como base del microcontrolador y Octave como el software para el procesamiento de la información. El dispositivo diseñado es flexible y puede funcionar en forma aislada o en línea a través del puerto USB de una computadora. Para su evaluación se utilizó un sistema fotovoltaico aislado conformado por una celda monocristalina de 150 W, controlador de carga y batería de 12 V de ciclo profundo. Entonces, es posible decir que el sistema es factible como adquisidor de datos ya que entrega información confiable, con precisión, exactitud y una variación no mayor al 5%.

Palabras Claves: Adquisición de datos, Arduino, energía solar, fotovoltaica, Octave.

Abstract

This document describes the design, development and evaluation of a robust data monitoring, control and acquisition system for use in solar power conversion devices. The device was created with the objective of measuring the characteristic variables of this type of systems, i.e. solar radiation, temperature, current and voltage. In addition, it was designed to work with free license software and hardware; for this reason, an Arduino Mega 256 was used as a microcontroller base and Octave was used as the information processing software. The system is flexible and works as an isolated or online system through a USB computer-port. For its evaluation an isolated photovoltaic system was used, formed by a monocrystalline cell of 150 W, charge controller and 12 V battery of deep cycle. Then, it is possible to say that the system is feasible as a data acquirer since it delivers reliable information, with precision, accuracy and a variation of no more than 5%.

Keywords: *Arduino, DAQ, Octave, PV Cell, solar energy.*

1. Introducción

En la actualidad los recursos energéticos renovables como la energía solar, han mejorado en cuanto a sus mecanismos de generación, por tal razón los gobiernos han intensificado su uso y explotación para la producción de energía eléctrica, ya que su participación no supera el 1.97% a nivel mundial. Es por esta razón que los gobiernos junto con la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) por sus siglas en inglés han desarrollado una perspectiva de visión para el 2050 con el objetivo de alcanzar un 86% de participación en la generación eléctrica tan solo con las energías renovables, [IRENA, 2019].

En México de forma particular la energía solar no supera el 2% de participación para la producción de energía eléctrica, en contraparte con un 79% a partir de combustibles fósiles, [SENER, 2018], [Ramos, 2012]. Por lo tanto, es importante incrementar el uso de las energías alternas para la producción eléctrica, y aprovechar el potencial solar del país. México es uno de los más favorecidos con este recurso, efecto de la zona geográfica en la cual se encuentra entre los 15° y 35° de latitud. Es decir, su cercanía al trópico de cáncer permite que los rayos de incidencia

solar sean cuasi-normales a la superficie debido a la inclinación solar, lo cual intensifica su potencial, [IRENA, 2015].

El recurso solar promedio recibido en México al día es de un mínimo de 5.5 kWh/m², el cual puede alcanzar niveles de hasta 8 kWh/m² en primavera-verano, [SOLARTRONIC, 2003]. En forma particular el potencial solar en Ciudad Juárez Chihuahua es alto, alcanzando niveles de hasta 8.027 kWh/m² en verano y un promedio diario anual de 5.7 kWh/m², [Paz, 2005]. Por tal razón, la energía solar puede convertirse en una de las más ricas fuentes de potencia la cual debe explotarse a través de proyectos referentes a sistemas fotovoltaicos y termosolares principalmente.

Así el uso de la energía solar para la producción de electricidad, principalmente la solar fotovoltaica, requiere de sistemas que permitan monitorizar, controlar, modelar y cuantificar el recurso generado con el propósito de efficientar el proceso de generación. Para monitorear un sistema fotovoltaico se requiere al menos medir variables como: corriente eléctrica generada, voltaje generado, radiación solar incidente, temperatura ambiente y temperatura de la celda. De este modo se podrá estimar la eficiencia y la potencia generada por el sistema. Además, se pueden desarrollar algoritmos de control para comparar los modelos teóricos de las celdas solares con las condiciones reales, y cuantificar la generación de energía eléctrica. Diversos investigadores han desarrollado sistemas para la adquisición y control de datos experimentales en sistemas fotovoltaicos. Rohit Amit desarrolló un sistema de monitoreo en tiempo real para celdas fotovoltaicas basado en LabView el cual se convierte en una herramienta efectiva para el estudio experimental de los módulos solares, [Rohit, 2017]. En forma semejante Belhadj Chokri desarrolló un sistema de monitoreo en LabView para evaluar y estimar las características de las celdas fotovoltaicas aisladas, [Belhadj, 2015]. Estos sistemas son necesarios para la comprensión de la operación de las celdas fotovoltaicas a través del modelado teórico del panel bajo condiciones controladas de radiación y temperatura. Un gran número de investigadores han desarrollado modelos teóricos de la celda solar, denominado modelo ideal de diodo simple, a través de la simplificación del modelo de un diodo y un generador de corriente, [Morales, 2015]. Existe también el modelo

práctico de diodo con resistencia en serie y en paralelo, [Apatekar, 2015], [El-basit, 2013]. Al comprender que la energía solar es abundante, cuasi-inagotable y que su conversión a electricidad es de bajo impacto ambiental, entonces se requiere del uso de sistemas de monitoreo y control que permitan combinar la simulación numérica con los datos experimentales para maximizar la generación de energía eléctrica. Dicha maximización se puede dar a través de las diversas técnicas de control de seguimiento del punto de máxima potencia como: algoritmos genéticos como en [Petcut, 2010], lógica difusa, así como muestra [Al-Hamadi, 2015], método de evolución diferencial desarrollado por [Ishaque, 2011], y en la optimización de diversos parámetros de diseño de las nuevas generaciones de celdas fotovoltaicas, [Qin, 2011], [Attivissimo, 2012], [Kulaksız, 2011].

Con el objetivo de medir las variables características se desarrolló un sistema de monitoreo, control y adquisición de datos para módulos fotovoltaicos de bajo costo basado en Arduino. Este sistema permite medir en tiempo real y almacenar la información de las variables como: temperatura de celda, temperatura ambiente, corriente, voltaje y radiación solar en sitio, además de cuantificar la cantidad de energía eléctrica generada. El procesamiento de las señales se realiza en Octave a partir de los datos almacenados, lo cual permite concebir las curvas características de operación $I - V$, $P - V$, $\eta - V$ con el propósito de compararlas con los modelos de simulación.

2. Métodos

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos de estado sólido de unión p-n de materiales semiconductores, principalmente Silicio. Las celdas absorben fotones de energía, provocando la liberación de electrones, formando así pares de electrón-hueco en un fenómeno denominado efecto fotovoltaico. Los electrones así liberados se convierten en la corriente generada por el dispositivo. La curva característica $I - V$ de la celda fotovoltaica se considera como no lineal y es similar a la del diodo. En la actualidad estos dispositivos alcanzan eficiencias de entre un 8% - 24% en laboratorio y son dependientes de la tecnología de manufactura y materiales, [Pukhrem, 2013].

La celda fotovoltaica puede modelarse en su forma más simple como una fuente de corriente en paralelo con un diodo y su operación se basa en dos condiciones: bajo la inexistencia de luz generadora de corriente la celda se comporta como un diodo, y en caso contrario cuando incrementa la intensidad de luz radiante se convierte en un generador de corriente. Por tal razón, el modelo ideal de la celda fotovoltaica es aquel que describe a la corriente total (I) igual a la corriente generada por el efecto fotovoltaico (I_{ph}) menos la corriente del diodo (I_D), tal y como se describe en la ecuación 1, [Belhadj, 2015].

$$I = I_{ph} - I_D \quad (1)$$

Entonces para obtener la curva característica $I - V$ de una celda fotovoltaica se requiere del conocimiento de sus parámetros característicos principalmente: corriente máxima (I_{max}) que es aquella lograda por la celda para alcanzar su máxima capacidad de potencia bajo condiciones estándar; corriente de corto circuito (I_{sc}) que es la máxima corriente producida por la celda bajo condiciones estándar y correspondiente a tener un voltaje igual a cero; voltaje máximo (V_{max}) que es el valor que permite alcanzar la máxima capacidad de potencia de la celda en condiciones estándar; voltaje a circuito abierto (V_{oc}) que es el máximo voltaje generado por la celda bajo condiciones estándar correspondiente a tener una corriente en el panel igual a cero; y finalmente la potencia máxima (P_{max}) que se considera como la máxima capacidad generadora de la celda bajo condiciones estándar. A partir de estos parámetros se pueden estimar factores que permiten evaluar la calidad y capacidad de generación del panel fotovoltaico, como lo es el factor de forma (F_F), y la eficiencia (η) misma que permite evaluar la capacidad de conversión de energía de la celda fotovoltaica, [Krismadinata, 2013]. En la figura 1 se puede observar la curva característica de la celda fotovoltaica $I - V$.

Tomando en cuenta estas características se puede decir que el modelo más completo de la celda fotovoltaica es aquel que incluye el modelo del diodo simple con una resistencia en serie y una resistencia de derivación. Este modelo considera que la corriente total (I) es igual a la corriente generada por el efecto fotovoltaico (I_{ph}) menos la corriente del diodo en función de la resistencia en serie (I_D) y menos

la corriente de la resistencia en paralelo (I_p), como se describe en la ecuación 2, [Yatimi, 2015].

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (2)$$

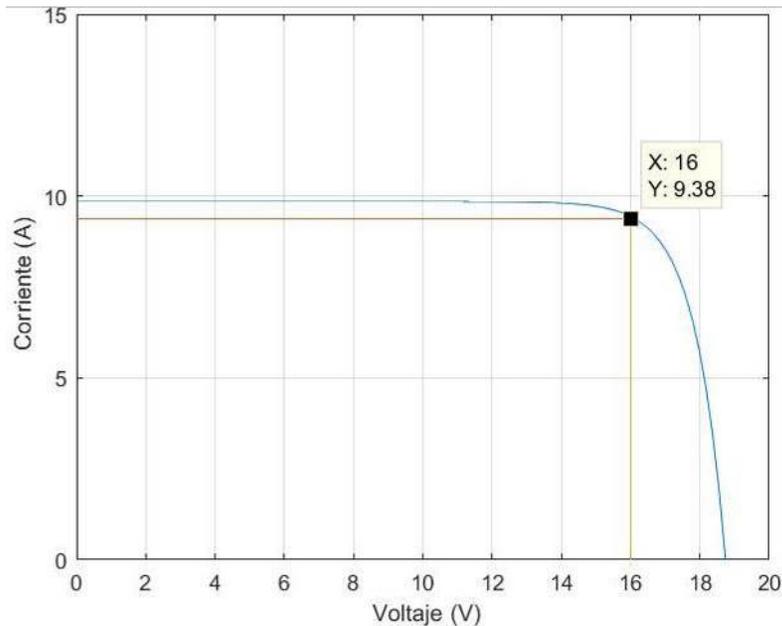


Figura 1 Curva I-V característica de celda fotovoltaica.

Así en forma explícita la ecuación 2 se convierte en la ecuación 3, describiéndose todos los parámetros característicos de la celda fotovoltaica.

$$I = \left\{ \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) [I_{sc} + \mu_{sc} (T_c - T_{cref})] \right\} - \left[I_{sc} \exp \left(-\frac{V_{oc}}{N_s A V_T} \right) \left(\frac{T_c}{T_{cref}} \right)^3 \left(\exp \left[\left(\frac{q e g}{A k} \right) \left(\left(\frac{1}{T_{cref}} \right) - \left(\frac{1}{T_c} \right) \right) \right] \right) \right] \left[\exp \left(\frac{V + I R_s}{N_s A V_T} \right) - 1 \right] - \left[\frac{V + I R_s}{R_p} \right] \quad (3)$$

Dónde: G es radiación solar en (W/m^2), μ_{sc} es el coeficiente de temperatura a corto circuito en (A/K), T_c es la temperatura de la celda en (K), q es la carga del electrón $1.602 \times 10^{-19} C$, eg es denominado al hueco de la banda de energía del material $1.12 eV$, A es el factor de idealidad del diodo (Sci-mono = 1.2) y (Sci-poli = 1.3), k es la constante de boltzman $1.381 \times 10^{-23} J/K$, R_s es la resistencia en serie (modelo

ideal $R_s = 0$), R_p es la resistencia en paralelo (modelo ideal $R_p = \infty$), G_{ref} es la radiación solar de referencia bajo pruebas de condición estándar (STC) cuyo valor fijo es 1000 W/m^2 , T_{cref} es la temperatura de celda de referencia bajo pruebas de condición estándar (STC) cuyo valor fijo es $25 \text{ }^\circ\text{C}$, N_s es el número de celdas ordenadas en serie, V_T es el voltaje térmico.

Con el propósito de simular el comportamiento de cualquier celda fotovoltaica, se utiliza el modelo de diodo simple descrito en la ecuación 3, con R_s y R_p bajo condiciones ideales y estimadas como se describe en [Bellia, 2014], [Krismadinata, 2013]. En la tabla 1 se muestran los datos técnicos de la celda fotovoltaica entregados por el fabricante SAYA, y en la figura 2 se presenta el modelo de panel fotovoltaico monocristalino de 150 W utilizado para las pruebas del sistema en desarrollo.

Tabla 1 Datos técnicos de la celda fotovoltaica.

No.	Descripción	Hoja Datos	Real
1	Panel fotovoltaico	SAYA-150M-28	
2	Potencia Máxima	150 W	139.9 W
3	Voltaje Máximo	15.6 V	15.1 V
4	Corriente Máxima	9.38 A	9.27 A
5	Voltaje circuito abierto	18.74 V	18.65 A
6	Corriente corto circuito	9.85 A	9.88 A
7	Número de celdas en serie	28	
8	Coeficiente temperatura I_{sc}	0.00053 A/K	
9	Área colección de la celda	0.78416 m ²	



Figura 2 Panel fotovoltaico SAYA-150M-28.

En la figura 3 se muestran las curvas características I-V y P-V del panel fotovoltaico a diversas intensidades teóricas de radiación solar, que el fabricante entrega.

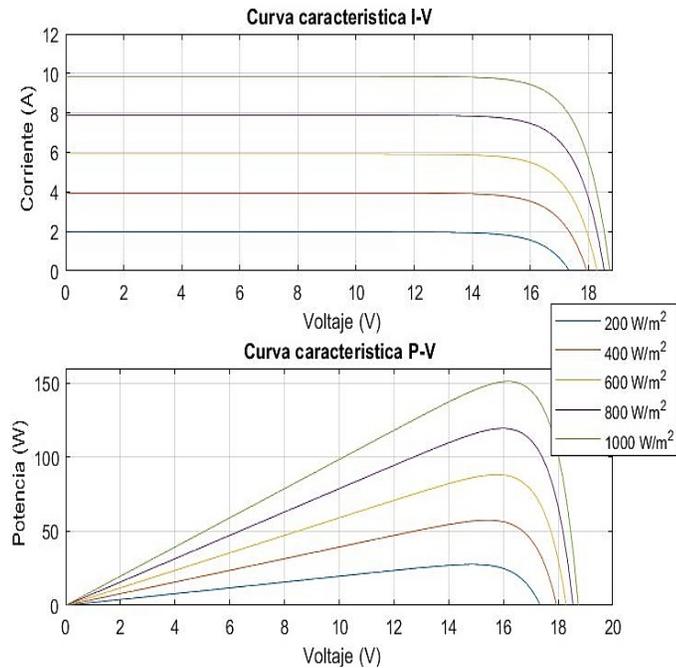


Figura 3 Curvas I-V y P-V del Panel fotovoltaico SAYA-150M-28.

La figura 4 principalmente describe el esquema básico de instalación de un sistema fotovoltaico aislado, el cual se compone de a) una celda monocristalina 150 W, b) controlador de carga estándar a 12 VDC, c) batería de ciclo profundo de 12 VDC y d) una resistencia eléctrica de carga, a este sistema se le adaptó a el sistema de monitoreo en desarrollo.

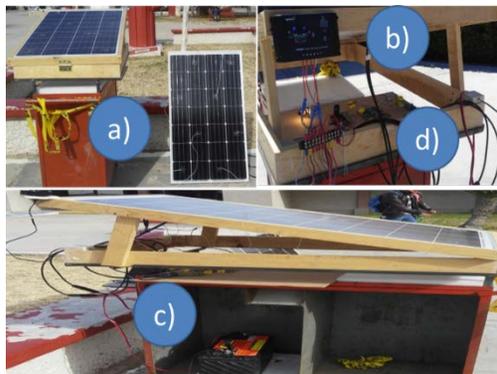


Figura 4 Esquema de instalación de un sistema fotovoltaico aislado.

El desarrollo del sistema de monitoreo, control y adquisición de datos se planteó bajo las siguientes condiciones: uso de sensores adecuados para la medición de las señales, microcontrolador de bajo costo que trabaje en forma autónoma y permita operaciones matemáticas sencillas, alta capacidad de almacenamiento de datos y un hardware y software de licencia libre con programación sencilla e intuitiva. Por estas razones fueron seleccionados los siguientes elementos: el microcontrolador Arduino Mega2560, sensor de temperatura termopar tipo K, acondicionador de señal para termopar tipo K, sensor de corriente ACS-712, sensor de radiación solar Davis-6450, sensor de voltaje basado en el circuito divisor de tensión, módulo adaptador de tarjeta MicroSD y acondicionador de señales tipo filtro “*pasa bajas*” para minimizar la interferencia electromagnética del circuito base. Se diseñó el circuito electrónico del sistema de monitoreo en una placa de circuito impreso con el propósito de tener las conexiones adecuadas entre sensores, acondicionadores y microcontrolador.

El Arduino Mega-256 es un microcontrolador basado en el Atmega2560 considerado un hardware de código abierto que cuenta con pines digitales y analógicos y conexión USB. La programación se realiza con el software Arduino IDE, y su código se basa en la programación de C++. El Termopar tipo K es un transductor conformado por la unión de dos metales distintos: Chromel y Alumel. Este transductor produce una diferencia de potencial proporcional a una diferencia de temperatura entre los extremos de los metales, y al conocer el extremo metálico de referencia se puede inferir la temperatura deseada. La selección de este sensor se basa en: su rango de operación, su tiempo de vida, su tiempo de respuesta y precio. El acondicionador de señal AD595 es un amplificador operacional diseñado como compensador de unión fría para termopar (específicamente para el tipo K) donde la sensibilidad es de 10 mV/°C. La función principal del dispositivo es comparar, amplificar y acondicionar la señal de temperatura.

El Sensor de corriente ACS-712 es un dispositivo basado en un sensor de efecto Hall, que al pasar una corriente sobre su banda de conducción genera un campo magnético y el circuito integrado lo convierte en un voltaje proporcional al valor de la corriente medida. La sensibilidad del sensor es de 100 mV/A. El sensor de

radiación solar Davis-6450 es un dispositivo que mide la radiación global con una sensibilidad de 1.67 mV/W/m^2 y principalmente es un transductor que convierte la radiación solar incidente en corriente eléctrica, es decir es un fotodiodo de silicio de amplia respuesta espectral. El Divisor de tensión es un circuito eléctrico simple que divide el voltaje de una fuente entre una o más impedancias conectadas. El diseño consiste de dos resistencias en serie y un voltaje de entrada, con lo que se produce un voltaje de salida equivalente a una fracción del de entrada. Para este caso en particular se omite el uso de amplificadores operaciones, con el propósito de simplificar el sistema de adquisición de datos. El Adaptador de tarjeta MicroSD es un módulo que permite leer y escribir en una tarjeta MicroSD a través de un archivo del programa de Arduino IDE utilizando la interfaz SPI. El filtrado es el proceso en donde se busca cambiar las amplitudes relativas de las componentes de frecuencia de una señal. Entonces el filtro “*pasa bajo*” es aquel sistema diseñado para atenuar frecuencias altas y permitir el paso de las más bajas, estos se caracterizan por funciones de transferencia y se configuran a partir de elementos activos o pasivos. Finalmente, la tarjeta de circuito impreso es aquella en donde se acoplan en forma efectiva los circuitos electrónicos de los sensores, acopladores de señal y filtros. La tarjeta fue diseñada a través del software PCBWizard y se manufactura en una CNC.

La programación del Arduino se basa principalmente en C++, por lo tanto se desarrolla en bloques generales para configurar la declaración de las variables del sistema, inicialización de sensores y tarjeta SD, lectura de sensores, estimación de variables, así como la escritura de éstas para su almacenamiento. El sistema de monitoreo, control y adquisición de datos fue calibrado utilizando patrones de referencia; para el caso del voltaje, corriente y temperatura. En la figura 5a se muestra el circuito impreso base del sistema de monitoreo, el cual incluye los sensores y acondicionadores de señal de temperatura, sensor de corriente, divisor de tensión, sensor de radiación solar y filtros “*pasa bajas*”. La figura 5b muestra la conexión entre el circuito impreso, microcontrolador y módulo de tarjeta MicroSD. El sistema fotovoltaico aislado conectado al sistema de monitoreo, control y adquisición de datos se observa en la figura 6.

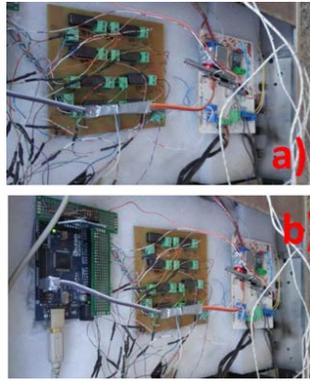


Figura 5 Tarjeta de circuito impreso y microcontrolador.



Figura 6 Sistema fotovoltaico aislado conectado al sistema de monitoreo.

El método de medición de las variables de interés se restringe a los rangos de operación del microcontrolador que son: voltaje de 5 V, corriente DC para pines I/O de 20 mA. Por tal motivo deben acondicionarse las señales de entrada para no superar los rangos máximos de operación.

La medición del voltaje del panel fotovoltaico se realiza mediante el divisor de tensión el cual relaciona el voltaje de fuente, dos resistores en serie y el voltaje del divisor. Para este caso en particular el modelo del divisor de tensión utilizado para determinar el voltaje real (V) del panel a través del microcontrolador se describe en la ecuación 4, donde la ganancia del divisor es **7.61** y el voltaje medido (V_m) con el pin 9 análogo del microcontrolador.

$$V = V_m * 7.61 \quad (4)$$

La medición de la temperatura se realiza con el termopar tipo K y el acondicionador de señal AD595 y por lo tanto, considerando la constante de sensibilidad se estima la temperatura en °C, tomando en cuenta el modelo descrito en la ecuación 5, donde

(T) es la temperatura real del panel en °C, ($V1$) es el voltaje proporcional a la salida del sensor en voltios y (St) es la sensibilidad del sensor igual a 10 mV/°C.

$$T = V1/St \quad (5)$$

La medición de la radiación solar se realiza a través del sensor 6450 que entrega un voltaje proporcional a la intensidad de radiación solar y depende de la constante de sensibilidad del sensor (Sr) con magnitud igual a 1.67 mV/ W/m². Utilizando el modelo descrito en la ecuación 6 es posible calcular la radiación solar incidente en W/m², donde (G) es la radiación solar medida, (VG) es el voltaje proporcional en V.

$$G = VG/Sr \quad (6)$$

La medición de la corriente generada en el panel se realiza a través del sensor ACS712 que entrega un voltaje proporcional al valor de corriente medida por el sensor de efecto hall. Este sensor cuenta con un valor de compensación el cual se determina en forma experimental, y tiene una magnitud de **2.4976 V** que equivale a una corriente de **0 A**. Además tiene una constante de sensibilidad del sensor (Sc) de 100 mV/A. Por lo tanto para calcular la corriente generada (I) se utiliza el modelo descrito en la ecuación 7, mismo que depende del voltaje proporcional entregado por el sensor (Vc).

$$I = (Vc - 2.4976)/Sc \quad (7)$$

El sistema de monitoreo, control y adquisición de datos se desarrolló con el propósito de medir los parámetros característicos del sistema fotovoltaico aislado, temperatura de la celda, radiación solar incidente, corriente y voltaje generado por el panel. Posterior a la medición se estima la eficiencia eléctrica, factor de forma y potencia del panel fotovoltaico, para luego comparar lo estimado con los modelos de simulación del panel fotovoltaico. Así será posible establecer estrategias de control de seguimiento del punto de máxima potencia e implementar las adecuaciones en cuanto a diseño de las celdas de nueva generación. El sistema de monitoreo fue programado para adquirir las señales de las variables del panel a cada minuto y almacenarlas en forma de vector en la tarjeta SD. Subsecuentemente, la información de la tarjeta SD es procesada a través de un programa desarrollado en el lenguaje de programación científica del software

Octave para estimar la eficiencia, factor de forma y potencia, a través de las ecuaciones 4-7. El programa desarrollado incluye la simulación del modelo práctico de la celda descrito en la ecuación 3, y además de la estimación de parámetros característicos del panel a través de los datos adquiridos incluye la comparación entre éstos.

3. Resultados

Para evaluar el sistema de monitoreo se instaló un panel fotovoltaico aislado de 150 W, el cual fue montado en una estructura de prueba con una inclinación de 20° respecto a la horizontal con dirección al norte, cara al sur y conectado a una carga de 60 W. Esto permitió definir las condiciones de operación del sistema bajo condiciones de estabilidad de carga, evaluar así la constante de tiempo del panel y la atenuación de potencia en función de temperatura del panel. Además, se modeló el comportamiento del panel fotovoltaico a través de la ecuación 1 y 3, para obtener parámetros de referencia. En la figura 7 se observan las curvas de operación $I - V, P - V, \eta - V$, del modelo del panel fotovoltaico a diversas condiciones de irradiación.

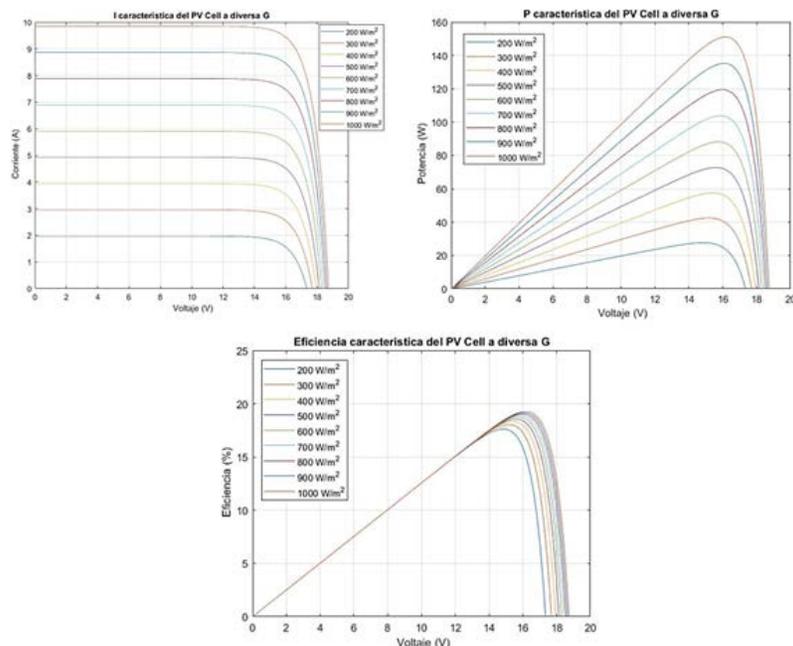


Figura 7 Modelado de curvas características del panel fotovoltaico 150 W.

El sistema se encuentra instalado en el laboratorio experimental de energía solar del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, perteneciente a la unidad de posgrado. Este sistema se monitorea desde el mes de marzo del 2019 y se recopiló información del comportamiento del panel fotovoltaico de los meses de marzo, abril y mayo del presente año. Toda la información recopilada por el sistema de monitoreo fue procesada a través del algoritmo desarrollado en Octave el cual se basa en las ecuaciones 4, 5, 6 y 7. Además permite extraer los datos relevantes de cada canal adquirido filtrando los datos de los días con mejores condiciones climáticas. En la figura 8 se observan los datos procesados correspondientes a la corriente medida a través del sistema de monitoreo, se identifica una saturación de nivel de corriente muy semejante en todos los casos debido a la carga conectada.

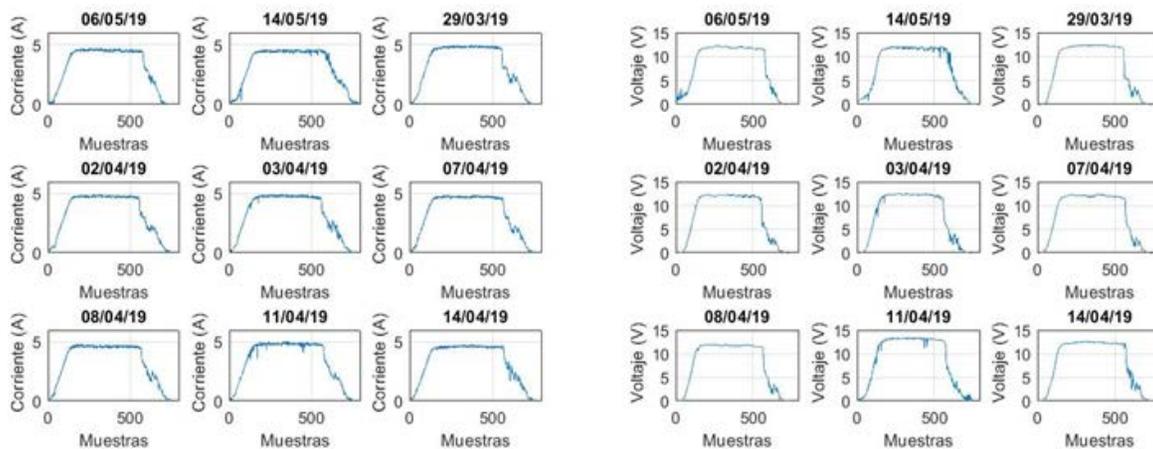


Figura 8 Corriente característica y voltaje del panel.

De igual forma se obtuvo el voltaje del panel fotovoltaico bajo las mismas condiciones de operación y carga. En la figura 8 se muestran las curvas características de voltaje y es importante comentar que son semejantes a las de la corriente, debido a la dependencia de ambas sobre la curva de radiación solar incidente. La curva de radiación solar incidente medida por el sistema se observa en la figura 9, y se coloca junto a la de temperatura de superficie de la celda, ya que al igual que con la corriente y voltaje, la temperatura es influenciada por la radiación solar. Lo anterior permite ver la dependencia del sistema fotovoltaico, y su comportamiento en función de la entrada.

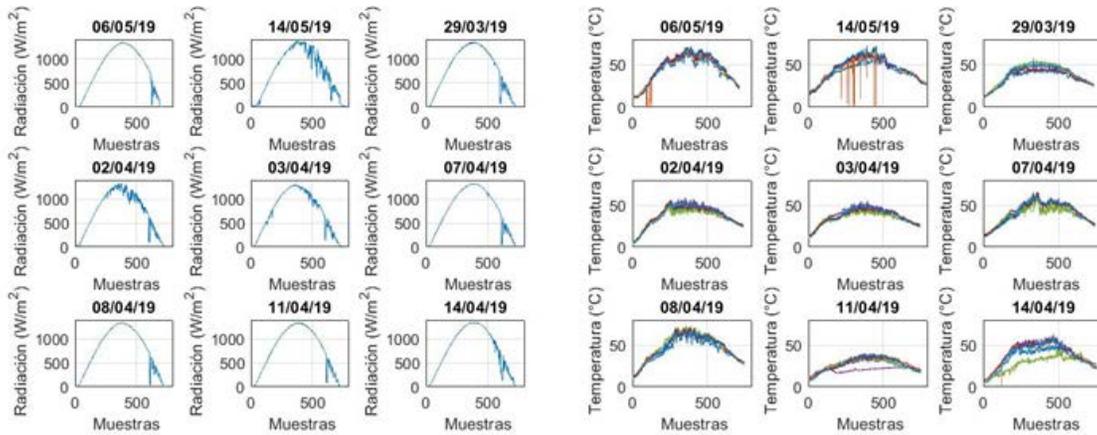


Figura 9 Radiación solar incidente y temperatura de celda en superficie.

A partir de los datos obtenidos y procesados, es posible estimar la potencia alcanzada por el sistema fotovoltaico y graficar las curvas de operación en condiciones normales del panel como son: corriente-voltaje y potencia-voltaje, presentada en la figura 10.

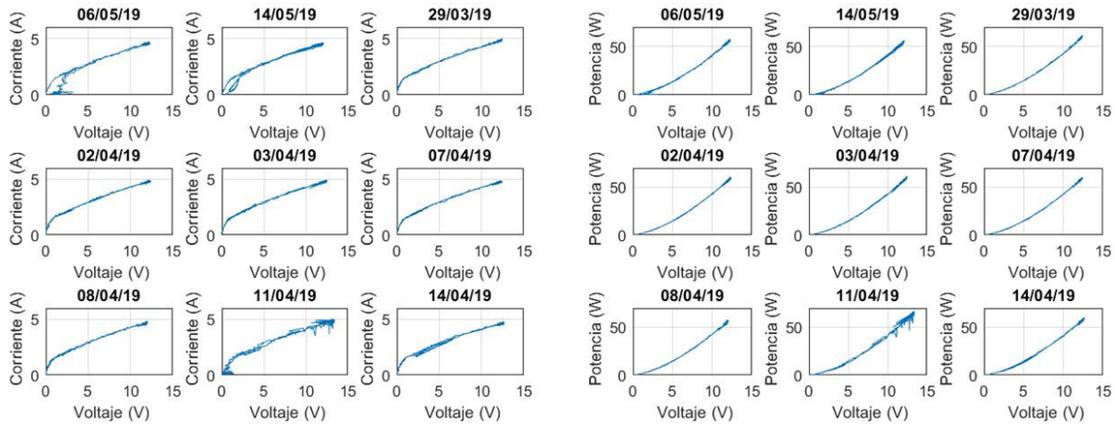
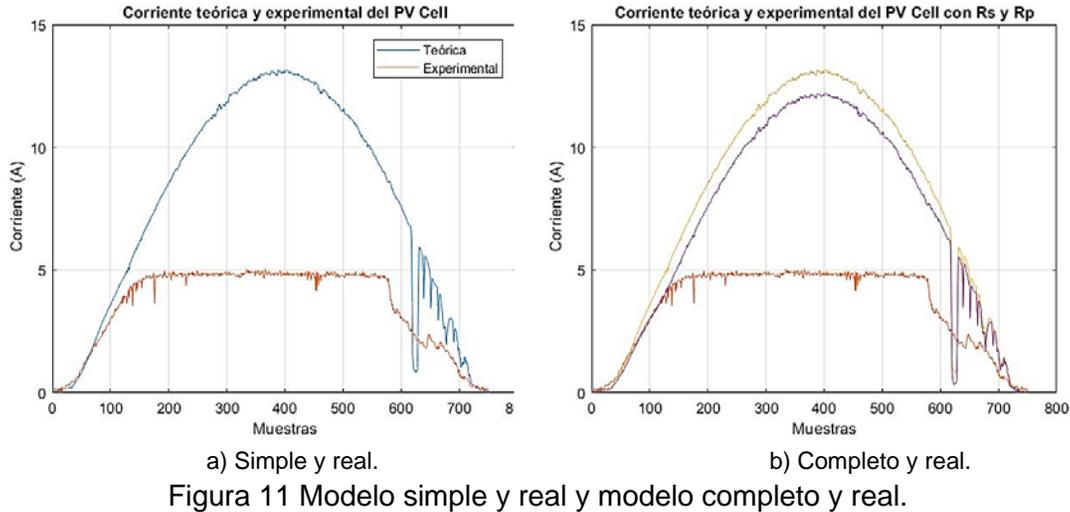


Figura 10 Curva I-V y Curva P-V del panel fotovoltaico.

Finalmente, los datos procesados se insertaron en el algoritmo para evaluar el modelo práctico del panel, es decir con y sin las dos resistencias características. Entonces es posible comparar la corriente real del panel con la estimada a través del modelo, utilizando los parámetros de entrada como son: radiación, temperatura y voltaje del panel. En la figura 11a se observa la comparación entre la curva de corriente del modelo simple y la real, y en la figura 11b se presenta una comparativa entre la curva de corriente del modelo completo y la real.



4. Discusión

Con respecto a los resultados obtenidos del sistema fotovoltaico se observa un comportamiento semejante al esperado en las curvas de corriente y voltaje, debido a que la carga utilizada era de alrededor del 45% de la potencia máxima. Se contempló alcanzar un voltaje de al menos 12 V y una corriente mínima de 5 A al medio día solar. El propósito de usar esa carga fue evaluar la evolución de la corriente y voltaje del sistema en función del comportamiento de la radiación y temperatura de la celda, es decir observar la atenuación de la potencia en función de la temperatura de la celda.

La información obtenida permitió evaluar el potencial solar de la localidad, confirmar la influencia de la temperatura en el proceso de generación de energía, y además se utilizó para el diseño de un modelo dinámico de radiación solar. La información también confirmó el lento desarrollo de la curva de temperatura en la celda fotovoltaica y con base a estas curvas características se trabaja en el desarrollo de patrones para predecir el comportamiento de la celda fotovoltaica en Ciudad Juárez. Por lo tanto, con los datos obtenidos del sistema de monitoreo se pudo corroborar la utilidad de este en el estudio de los sistemas fotovoltaicos; y debido a su robustez permite ajustar cualquier modelo de celda fotovoltaica cumpliendo con el objetivo de medir en forma precisa y exacta las variables de interés de los sistemas fotovoltaicos.

Con el diseño y construcción de este sistema de monitoreo, control y adquisición de datos se obtuvo información característica de los sistemas fotovoltaicos bajo condiciones de operación normal en Ciudad Juárez, y posteriormente se podrán desarrollar modelos dinámicos robustos y establecer estrategias de control para maximizar su generación de energía. Será utilizado también para caracterizar y modelar el comportamiento de un sistema fotovoltaico híbrido bajo diversas condiciones de operación, por lo que fue necesario verificar su capacidad en la captura de datos, almacenamiento y procesamiento de la información, sensibilidad, y error adherido en el proceso de medición.

5. Conclusiones

En cuanto a la capacidad del sistema en forma general se considera preciso y exacto esto se puede observar en las curvas de temperatura, ya que se tienen ocho sensores distribuidos sobre el panel fotovoltaico y su variación en cuanto a magnitud no se ve alterada por el sistema de adquisición de datos. Es decir, todos los datos se mantienen muy cercanos entre sí, conforme evoluciona el sistema fotovoltaico. Además, su respuesta a los cambios bruscos es alta y se refleja en las curvas de operación, principalmente en las de radiación, puesto que la variación de temperatura es considerada un proceso lento. Por esta razón las curvas se observan claras y limpias, es decir sin ruido, y se hace mención que el procesamiento de la información obtenida de la MicroSD no va más allá de operaciones aritméticas de multiplicación y división por las constantes según la variable a calcular, como se describe en las ecuaciones 4, 5, 6 y 7.

Entonces, es posible decir que el sistema cumple con los objetivos básicos de funcionamiento ya que entrega información confiable, con precisión, exactitud y una variación no mayor al 5 %. De igual manera se observa que el microcontrolador, filtros y circuito electrónico tienen la capacidad suficiente para el muestreo de la información ya que no adiciona ruido en señales adquiridas. Además, se puede afirmar que el sistema permite su ampliación de forma práctica, y todo está en función de las necesidades del proyecto o investigaciones a desarrollar. Por lo tanto, se buscará replicar el sistema para los otros equipos con los que cuenta el

laboratorio de energía solar, y de esta forma innovar en las estrategias de control y proponer ajustes de diseño para los dispositivos de conversión de energía solar.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Al-Hamadi, H., Fuzzy Estimation Analysis of Photovoltaic Model Parameters. *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 3, 39-43, 2015.
- [2] Apatekar, S., & Mallareddy, Ch., Mathematical Modeling of Photovoltaic Cell. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4 Issue 4, April 2015.
- [3] Attivissimo, F., Di Nisio, A., Savino, M. & Sapada Vecchia, M., Uncertainty Analysis in Photovoltaic Cell Parameter Estimation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61, 1334-1342, 2012.
- [4] Bellia, H., Youcef, R., & Fatima, M., A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, vol.3, 53-61, 2014.
- [5] Belhadj, C., Kassas, M., & Essamuddin, S., LabVIEW Based PV Panel Online Characteristics And Parameters Estimation. *Procedia Computer Science*, vol. 52, 876 – 882, 2015.
- [6] El-basit, W., El-maksood, A., & Soliman, F., Mathematical Model for Photovoltaic Cells. *Leonardo Journal of Sciences*, Issue 23, 13-28, 2013.
- [7] IRENA, Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition). International Renewable Energy Agency, 27-30, Abu Dhabi. 2019.
- [8] Krismadinata, A., Nasrudin, A., Hew, W., & Jeyraj, S., Photovoltaic module modeling using Simulink/Matlab. *Procedia Environmental Sciences*, vol. 17, 537 – 546, 2013.
- [9] Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H. & Shamsudin, A., Parameter Extraction of Photovoltaic Cell Using Differential Evolution Method. *IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 10-15, 2011.
- [10] IRENA, Renewable energy prospects: Mexico Remap 2030. International Renewable Energy Agency, 5-7, Abu Dhabi. 2015.

- [11] Kulaksız, A.A., ANFIS-Based Parameter Estimation of One Diode Equivalent Circuit Model of PV Modules. Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI), 415-420, 2011.
- [12] Morales, H. S., & Meza, C., Herramientas de simulación libres y abiertas para el diseño de unidades de procesamiento de potencia para sistemas fotovoltaicos. *Tecnología en Marcha*, vol. 28, N° 2, 44-60, 2015.
- [13] Paz, G. J. C., Colectores solares planos: tratamiento teórico, volumen 1. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Instituto de Ingeniería y Tecnología, vol. I, 6-8, Ciudad Juárez, Chihuahua. 2005.
- [14] Petcut, F.M. & Dragomir, T.L., Solar Cell Parameter Identification Using Genetic Algorithms. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, 12, 30-37, 2010.
- [15] Pukhrem, S., A Photovoltaic Panel Model in Matlab / Simulink. Dublin Institute of Technology, Faculty of Electrical Engineering, 2013.
- [16] Qin, H.S. & Kimball, J.W., Parameter Determination of Photovoltaic Cells from Field Testing Data Using Particle Swarm Optimization. IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 1-4, 2011.
- [17] Ramos, G. L., La generación de energía eléctrica en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 4, 197-211, México. Octubre, 2012.
- [18] Rohit, A.K, Tomar, A., & Kumar, A., Virtual lab based real-time data acquisition, measurement and monitoring platform for solar photovoltaic module. *Resource-Efficient Technologies*, vol. 3, 446–451, 2017.
- [19] SOLARTRONIC, Irradiaciones global, directa y difusa en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, para la república mexicana. Solartronic SA de CV, México 2003.
- [20] Yatimi, H., & Aroudam, E., Modeling and Simulation of a Stand-alone Photovoltaic System. X International Conference on Integrated Design and Production, Tangier – Morocco. 2015.
- [21] SENER, PRODESEN: Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2018-2032. Secretaria de Energía, México, 12-23, México. 2018.