

# Sistema trazador de curvas voltaje, corriente con ajuste y estimación de parámetros usando propuesta metodológica



## Colaboración

Mario Espinosa Tlaxcaltecatl, Universidad Politécnica de Puebla

**RESUMEN:** El trabajo presenta la implementación de un sistema trazador de curvas voltaje corriente (VI), basado en un sistema de medición de corrientes por medio de un electrómetro Keithley 6517B y un sistema de control de voltaje basado en el mismo instrumento. Este nuevo sistema ha permitido evaluar los parámetros de desempeño y estimar los parámetros eléctricos de celda solar comercial y orgánica.

**PALABRAS CLAVE:** Fotovoltaico, ajuste, electrómetro, parámetros de desempeño, parámetros eléctricos.

**ABSTRACT:** The work present the implementation of a voltage current (VI) curve tracer system, based on a current measurement system by using of a Keithley 6517B electrometer, and a voltage control system based on the same instrument. This new system has allowed to evaluate the performance parameters and estimate the electrical parameters of the commercial solar cell and organic.

**KEYWORDS:** Photovoltaic, adjustment, electrometer, performance parameters, electric parameters.

## INTRODUCCIÓN

Las curvas VI obtenidas de un dispositivo semiconductor y en particular de un dispositivo fotovoltaico son referentes de su rendimiento. Pero este comportamiento puede ser afectado por múltiples factores que intervienen durante su vida, ya sea en el proceso de fabricación o en condiciones de uso diario, por ejemplo: intensidad de radiación incidente, temperatura, suciedad, tiempo de operación, degradación de electrodos, degradación de película activa, entre los principales. Pero el rendimiento no es el único interés en el proceso de fabricación, un aspecto igual de relevante son los parámetros eléctricos, los cuales son el eslabón de unión entre la geometría, tipo de material y tipo de estructura empleada con los resultados del desempeño final. Para conocer los parámetros de desempeño Nelson [1] determina la eficiencia de conversión de potencia, la cual es evaluada a partir de conocer puntos característicos sobre la curva VI en condiciones de iluminación constante. Por otro lado, para determinar los parámetros eléctricos, existen grupos de investigación como el de Muñoz Lasso [2] que han estado enfocados en utilizar modelos teóricos aproximados del diodo con la inclusión de resistencias parasitas, para ajustar estos modelos de acuerdo a las variables eléctricas teóricas. En este sentido, la variedad de modelos empleados ha originado que la estimación de estos parámetros eléctricos sea una tarea compleja. Otro aspecto delicado es el instrumento de medición empleado, el cual ha evolucionado desde multímetros de alta precisión, osciloscopios en modo de trazo XY, entre otros, pero ninguno de ellos garantiza sensibilidades en el rango de pA como se requiere. Y aunque existen dispositivos comerciales especializados que realizan este escaneo de curvas VI a diferentes intensidades de iluminación y con estimación de los parámetros de desempeño. El problema más grande de estos sistemas es su alto costo monetario, así como su limitación para estimar parámetros eléctricos.

Así, la propuesta en el presente trabajo es integrar un sistema que permita obtener experimentalmente las curvas VI, así como proponer una nueva metodología para evaluar parámetros eléctricos

del dispositivo fotovoltaico. Este proceso de estimación marca un diferencial con otros trabajos igualmente desarrollados, como por ejemplo con LabVIEW [3].

**MATERIAL Y MÉTODOS**

**Sistema trazador de curvas**

El sistema trazador de curvas está constituido por tres módulos: El primero encargado del proceso de medición, el cual involucra un electrómetro marca Keithley 6517B utilizado como una fuente controlada de voltaje y como un medidor de corriente. El segundo módulo es el control de iluminación, la cual incluye una cámara con control y medición de intensidad de iluminación. Y un tercer módulo es una propuesta metodológica para controlar al electrómetro en forma remota.

La Figura 1 muestra la integración metodológica del sistema trazador de curvas VI en su etapa de caracterización experimental.

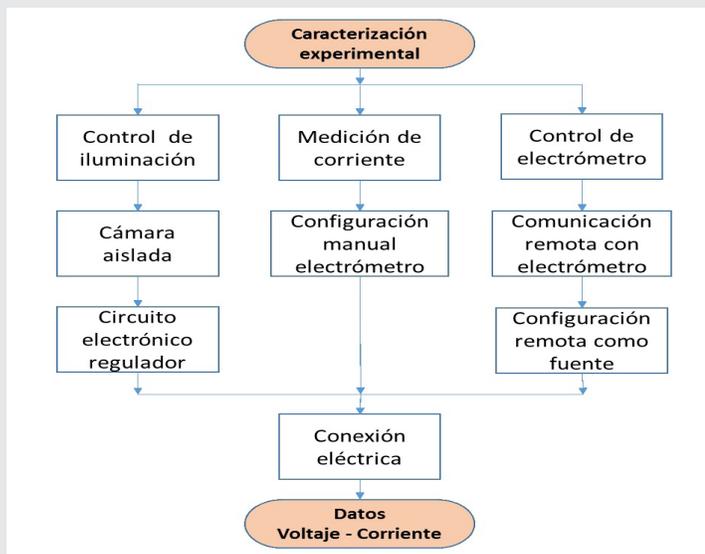


Figura 1. Metodología para implementar la etapa de caracterización experimental.

**a) Medición de corriente**

El electrómetro Keithley modelo 6517B mostrado en la Figura 2, es el instrumento para realizar el proceso de medición con rangos: en voltaje de  $1 \mu V$  a  $210 V$  y en corriente de  $10 \mu A$  a  $21 mA$ .

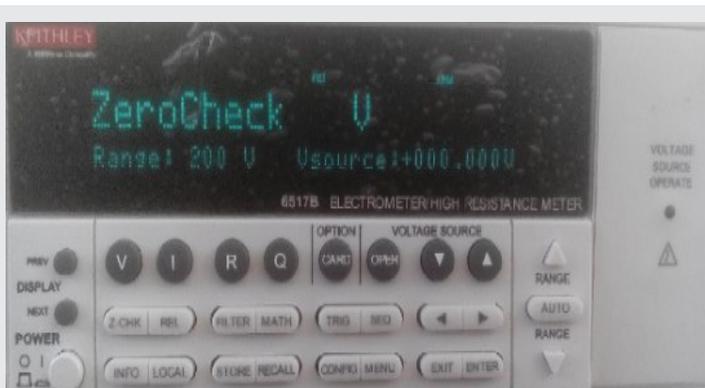


Figura 2. Panel frontal del electrómetro Keithley 6517B.

La configuración empleada es remota usando el puerto RS232 para tener control de sus funciones básicas como fuente de voltaje y medición en la pantalla frontal. Para realizar la conexión del electrómetro con la computadora se utiliza el cable con conector DB9-RS232 y USB.

Los pasos seguidos de configuración del dispositivo en forma manual para comunicación con el puerto.

- 1) Oprimir el botón MENU
- 2) Seleccionar la opción COMMUNICATION
- 3) Seleccionar RS-232, dentro de esta:
- 4) Seleccionar la velocidad de transmisión de baudios BAUD, seleccionar 9600
- 5) Seleccionar TERMINATOR y dentro de esta opción <CR+LF>
- 6) Seleccionar el flujo de control FLOW-CTRL y dentro de esta opción NONE (ninguna).

El instrumento durante su operación de medición debe de seguir los siguientes pasos, para realizar la medición de corriente con corrección en cero según el manual del dispositivo [4].

- 1) Seleccione la función V ó I
- 2) Presione Z-CHK para habilitar Zero Check
- 3) Seleccione el rango para la medición
- 4) Presiona REL para poner a cero el instrumento
- 5) Presione Z-CHK para deshabilitar la comprobación de cero
- 6) Las lecturas ahora se pueden tomar de la manera normal

La forma de conectar es usando cable triaxial (Triaxi) modelo 237-ALG-2 con 3 ranuras en un conector BNC en un extremo y tres pinzas de cocodrilo de bajo ruido en el otro. En la Figura 3 se presenta el esquema eléctrico de conexión de la fuente de voltaje del electrómetro, señalado con la terminal positiva (roja) y la terminal negativa (negra), así como su medidor de corriente.

En el esquema de conexión se puede apreciar las terminales (rojo y negro) usadas para alimentación y la tercera terminal (verde) es utilizada para protección contra descargas eléctricas. La celda solar es conectada en serie para medir la corriente.

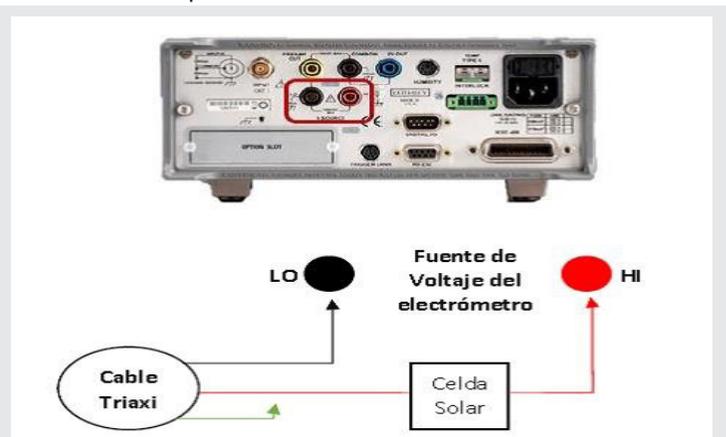


Figura 3. Esquema eléctrico de conexión para medir corriente con voltaje aplicado usando el electrómetro.

## b) Control de iluminación

Para iluminar el dispositivo fotovoltaico se requiere un sistema ópticamente aislado, que elimine fuentes no deseables como es el sol o alguna lámpara externa al experimento. En la figura 4 se muestra el espacio aislado creado para iluminar el dispositivo fotovoltaico.

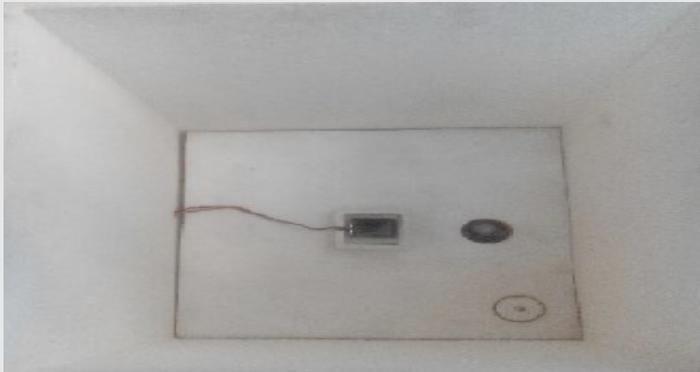


Figura 4. Vista superior de la cámara para el control de iluminación

La cámara es un espacio cerrado de 25 cm X 25 cm X 40 cm, el cual contiene al fondo y en el centro el dispositivo fotovoltaico y más hacia la derecha un orificio que permite el acceso de la iluminación hacia un sensor de potencia óptica. Este sensor está conectado a un medidor de potencia solar H115 de la marca NAHEIM SCIENTIFIC, con el cual se determina la irradiancia en unidades del sistema internacional de  $W/m^2$ . Las paredes de la cámara son blancas para permitir la máxima homogeneidad de la iluminación, la cual es provista por una lámpara de luz blanca a 100W de potencia eléctrica.

La intensidad de iluminación es regulada con un circuito basado en un control de fase de la señal de alimentación eléctrica de corriente alterna, por medio de un triac y un diac. La Figura 5 muestra el diagrama del circuito implementado, obteniendo variaciones de irradiancia de 0 a  $550 W/m^2$ .

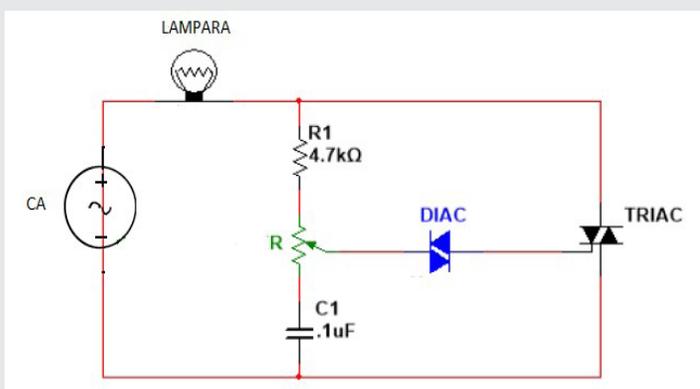


Figura 5. Diagrama del circuito eléctrico para el control de intensidad de iluminación.

Con este control de intensidad podemos obtener curvas VI en oscuridad, a partir de la cual se pueden esti-

mar parámetros básicos de la celda solar en aproximación de un diodo y también se pueden obtener curvas VI con variación de intensidad de iluminación, a partir de las cuales se pueden estimar los parámetros de desempeño y eléctricos.

## c) WControl del electrómetro

La interfaz de control está basado en comunicación a través del puerto serial o puerto IEEE 488 (GPIB). En la Figura 6 se presenta el diagrama a flujo para controlar la excitación de voltaje. El electrómetro se programa la fuente con incrementos de 0.02 V.

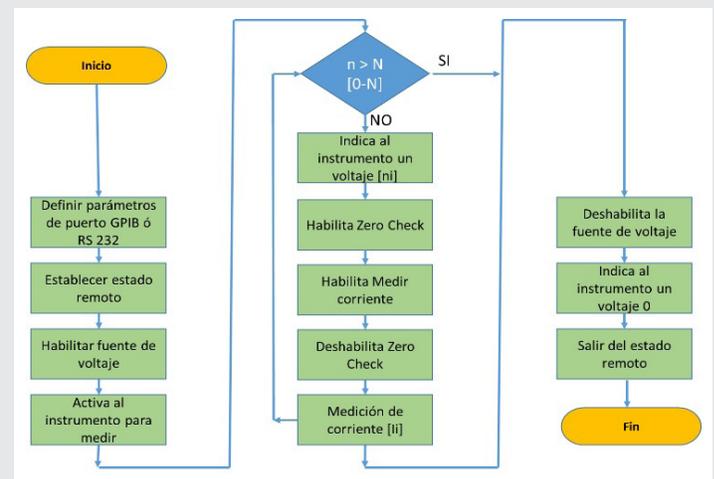


Figura 6. Diagrama de flujo para el control del electrómetro.

El diagrama está formado por una estructura de secuencia, antes de la estructura se define la configuración del puerto (velocidad de transmisión a 9600 baudios, conexión a través del puerto usb, bit de paridad 0, bit de paro 1 y ningún control de flujo) con parámetros iguales a los definidos en la configuración manual del electrómetro. Las instrucciones que reconoce el electrómetro se describen a continuación: (:SYSTEM REMOTE) inicializa el instrumento en operación remota por medio de la PC; (:SYSTEM KEY 19) habilita la fuente de voltaje; (:INIT:CONT ON) saca al instrumento del estado inactivo; después entra en un ciclo, en donde se indica el despliegue de la medición de corriente como resultado de un voltaje de excitación sobre la pantalla frontal del electrómetro, la amplitud de la excitación de voltaje depende de la iteración del ciclo n, que tiene una variación desde 0 a N. Las etapas finales de la estructura de secuencia indican habilitación de la fuente voltaje, un voltaje de salida cero, salida del estado remoto del instrumento y finalmente un almacenamiento automático del vector de voltajes generados.

El ciclo presenta 5 pasos (línea central de Figura 6) al final de ellos se toman las muestra de corriente y voltaje. Es necesario definir tiempos de retardo para asegurar estabilidad del sistema y tiempo para toma de medición de parámetros eléctricos, la recomendación es que la suma total de los tiempos de espera sea mayor a 12 segundos. Dentro del ciclo, primero se indica al elec-

trómetro (:SOURce:VOLTage) que envíe a su puerto de voltaje (posicionado en la parte trasera del instrumento) el valor de entrada, este valor corresponde al ciclo ( $i=0 V=0, i=1 V=0.02, i=2 V=0.04, \dots, i=N V=N*0.02$ ), donde N es el número de iteraciones que se le indican al programa de inicio. Lo siguiente es parte del proceso de visualización del resultados de medición de corriente, la indicación (:SYSTEM:ZCheck ON) habilita la revisión a cero en el proceso de medición, después (:SYSTEM:KEY 22) habilita la función a medir corriente. Los últimos dos casos por describir, permiten deshabilitar la verificación a cero, lo que permite visualizar la respuesta en la pantalla del instrumento y por último se vuelve habilitar la verificación a cero, para comenzar desde ese estado en la próxima iteración. Las mediciones obtenidas son almacenadas en columnas de datos de voltaje y corriente en una hoja de datos.

**Propuesta metodológica para estimar parámetros fotovoltaicos**

La propuesta metodológica está basado en el análisis de datos de curvas VI experimentales para estimar parámetros eléctricos y de desempeño. El análisis es realizado por un algoritmo que puede ser implementado en LabVIEW, Matlab o algún otro software que permita generar curvas VI teóricas basadas en el modelo de una celda solar y así comparar el área bajo la curva de cada una de ellas con la curva VI experimental. El mejor ajuste es seleccionado por la mínima diferencia de áreas.

El algoritmo de evaluación permite realizar un proceso de análisis de datos y despliegue de resultados. La descripción se realiza a continuación por secciones debido a lo extenso del mismo. La lógica de ejecución de las secciones involucradas se muestra en la metodología plasmada en la Figura 7.

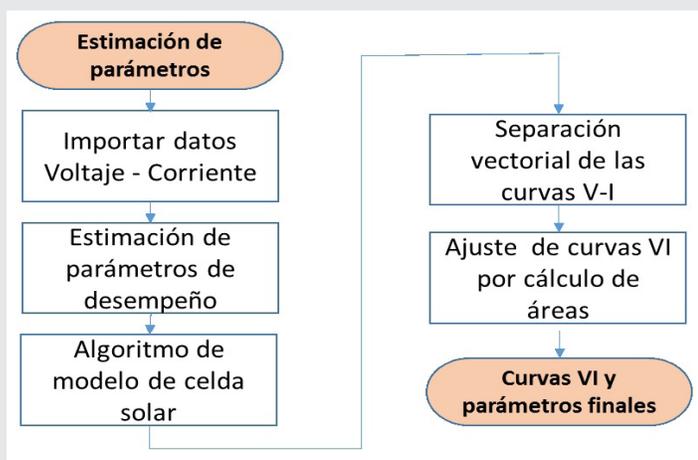


Figura 7. Metodología para la estimación de parámetros y curva VI teórica.

Sección 1.- Para realizar evaluación de los parámetros de desempeño y el ajuste de las curvas VI experimentales. Primero es necesario importar los datos experimentales.

Sección 2.- Los parámetros de desempeño son el factor de llenado (FF) definido por la Ecuación (1), el cual establece una relación de la potencia real entregada por la celda fotovoltaica y la potencia imaginaria ideal que debería entregar. Por otro lado, la eficiencia de conversión de potencia ( $\eta$ ) definido por la Ecuación (2), establece la proporción de energía solar detectada por la celda que es aprovechada y convertida en potencia eléctrica.

$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\eta = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{opt}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Para la identificación de los puntos característicos se pueden observar la Figura 8, donde se presenta su ubicación sobre la curva teórica VI con iluminación. El voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$  ubicado en la intersección de la curva con el eje de corrientes. La corriente de corto circuito  $I_{sc}$  se encuentra en la intersección de la curva con el eje de voltajes. El voltaje y corriente de máxima potencia  $V_{max}$  y  $I_{max}$  respectivamente, se encuentran ubicados en la intersección con los ejes desde el punto de máxima potencia  $P_{max}$ .

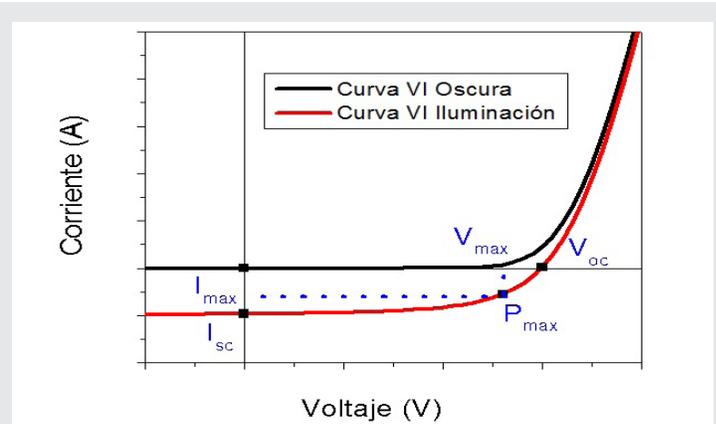


Figura 8. Curva VI oscura y curva VI con iluminación teóricas.

La identificación de los puntos característicos se realiza usando los datos experimentales de corriente y voltaje. En la Figura 9 muestra el diagrama de flujo para identificar los puntos característicos de la curva VI desde los vectores de datos almacenados.

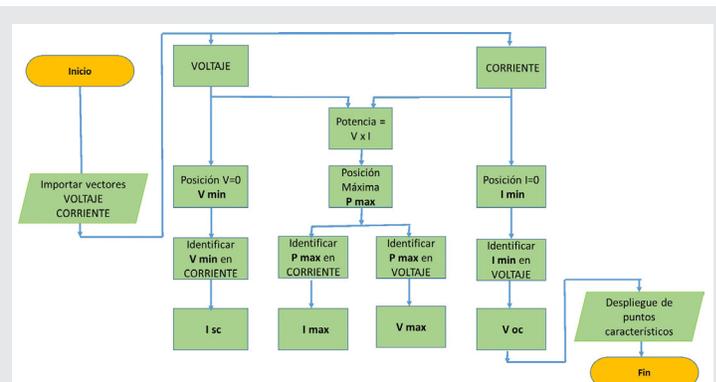


Figura 9. Diagrama de flujo para la identificación de puntos característicos.

A la izquierda del diagrama se observa el llamado de los datos experimentales para voltaje y corriente. La posición y valor del voltaje mínimo  $V_{min}$  ( $V=0$ ), con ésta posición se identifica el valor de corriente de corto circuito  $I_{sc}$ . Con la identificación de la posición de la corriente mínima  $I_{min}$  ( $I=0$ ), se identifica el voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$ . Al realizar la multiplicación de corriente y voltaje que representa la potencia eléctrica, identificando el valor y posición de potencia máxima ( $P_{max}$ ), con ésta posición se puede identificar el  $V_{max}$  y la  $I_{max}$ .

Sección 3.- El ajuste de la curva VI experimental se realiza de acuerdo al modelo teórico de la celda solar de Muñoz Lasso [2], que se basa en la competencia de tres corrientes incluidas en la Ecuación (3), la corriente originado por iluminación  $I_L$ , la corriente del modelo del diodo  $I_D$  con inclusión del factor de idealidad  $n$  y la caída de tensión en la resistencia en serie  $R_s$  y la corriente debido a la presencia de corrientes de fuga, definida por una resistencia paralela  $R_p$ .

$$I = -I_L + I_0 \left[ e^{\frac{(V-IR_s)}{nV_T}} - 1 \right] + \frac{V - IR_s}{R_p} \quad \text{Ec. (3)}$$

La corriente de saturación  $I_0$  y el factor de idealidad son normalmente los parámetros elegidos para realizar el ajuste, con el voltaje térmico  $V_T=0.025$  V a temperatura ambiente.

Sección 4.- Los vectores de voltaje y corriente obtenidos deben ser almacenados en una matriz general. Aunque cada curva debe ser independiente para poder ser tratados numéricamente.

Sección 5.- La estimación del mejor ajuste (a la curva VI experimental) se obtiene aplicando el procedimiento implementado en el diagrama de flujo de la Figura 10, a cada una de las R curvas VI generadas.

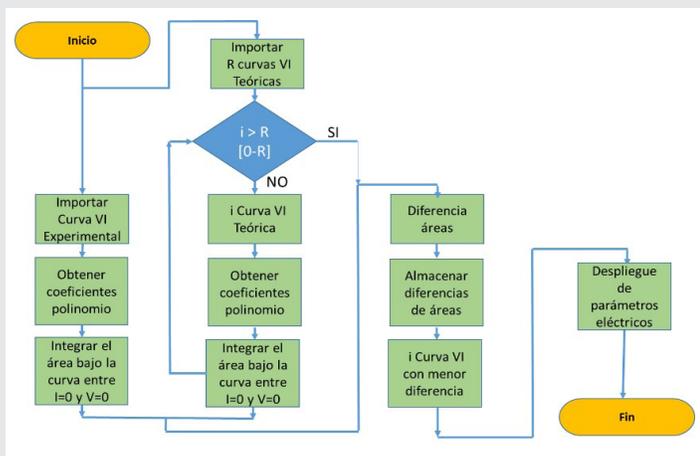


Figura 10 Diagrama de flujo para estimar el mejor ajuste por aproximaciones sucesivas

Para los vectores Corriente y Voltaje de cada curva VI generada, se obtienen los coeficientes del polinomio en

su aproximación matemática. Posteriormente se calcula el área bajo la curva VI integrando desde el punto  $I_{sc}$  hasta el punto de  $V_{oc}$ . El área de cada curva VI generada se compara con el área de la curva VI experimental. El resultado de la comparación de áreas permite determinar el mejor ajuste, a partir de la menor diferencia entre las curvas VI generadas y la experimental.

Sección 6.- La visualización de las curvas VI es el proceso donde se presentan y comparan las R curvas VI generadas por el algoritmo de evaluación, con sus respectivas contrapartes, las curvas VI experimentales con y sin iluminación.

## RESULTADOS

La implementación del trazador de curvas VI mostrado en la Figura 11, es el desarrollo e implementación de un sistema funcional de caracterización de dispositivos fotovoltaicos, que incluye un control de la intensidad de iluminación (cámara), una tablilla de conexiones generales y un instrumento de medición de corriente con fuente de voltaje programada incluida (electrómetro).

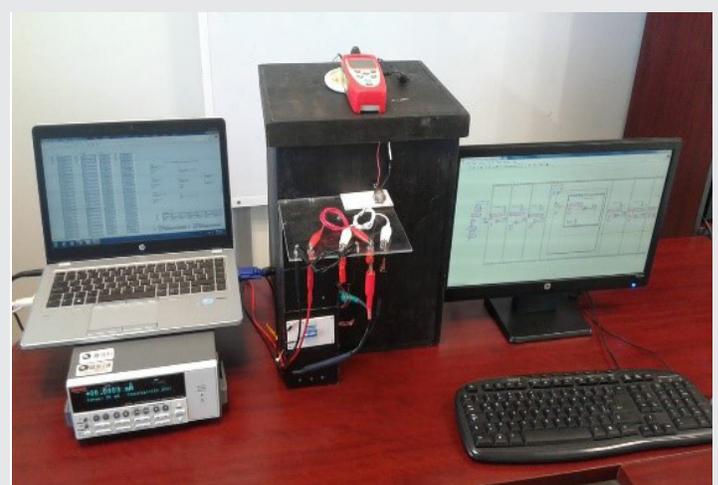


Figura 11. Sistema trazador y de análisis de curvas VI.

Para determinar la funcionalidad de la etapa de caracterización experimental se obtuvo la curva VI oscura de una celda solar comercial estándar, los resultados se muestra en la Figura 12.

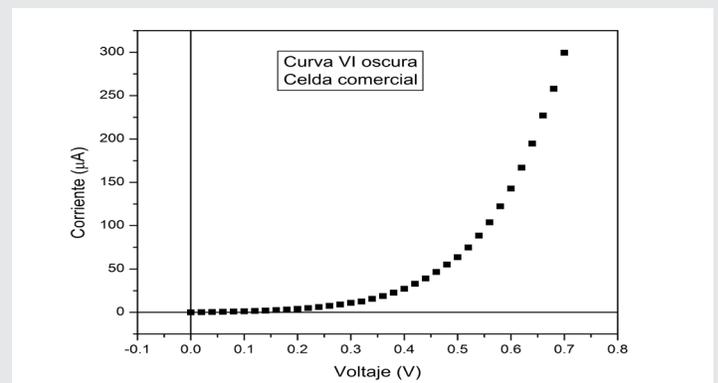


Figura 12. Curva VI experimental oscura de una celda solar comercial estándar.

Para verificar la funcionalidad de la propuesta metodológica de estimación de parámetros eléctricos y de desempeño, se utilizan resultados de un proceso de caracterización usando celda solar orgánica de multicapa ITO/P3HT:PCBM/Al (Indium Tin Oxide/poly(3-hexylthiophene):fulereno/aluminio), la película activa P3HT:PCBM con espesor de 50nm, concentración 1:1 y con un proceso de calentamiento por contacto por 4 minutos a 140°C. La celda solar multicapa es seleccionada debido a las investigaciones previas por diversos grupos como el formado por Foertig, Rauh, Dyakonov y Deibel [5], lo cual permite la comparación de los resultados obtenidos con este sistema. La Figura 13 muestra la visualización de la gráfica de la curva VI experimental con iluminación.

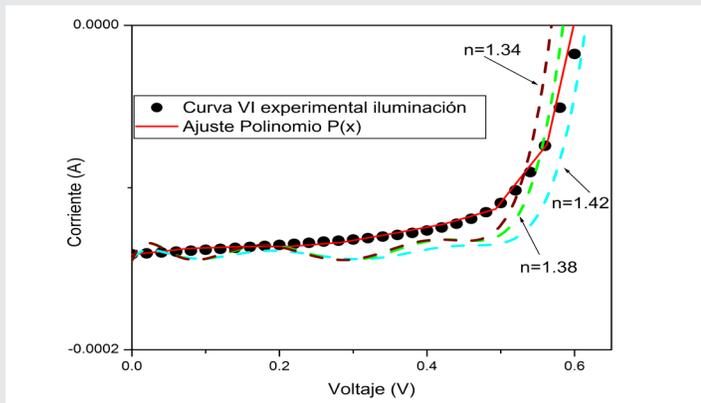


Figura 13. Curva VI experimental con iluminación de 100 mW/cm² de una celda orgánica.

La Tabla 1 muestra los resultados del proceso de ajuste de la curva VI experimental con iluminación de la celda orgánica al modelo teórico de una celda solar, utilizando la metodología de aproximación por cálculo de áreas bajo la curva entre Isc y Voc. Con un polinomio característico de la curva VI experimental  $P(x) = -1.41E-4 + 5.71E-5 X + 6.9E-5 X^2 - 0.002 X^3 + 6.73E-5 X^4 + 0.042 X^5 - 0.054 X^6 - 0.217 X^7 + 0.527 X^8 - 0.296 X^9$ , encontrado con un ajuste numérico.

Tabla 1.- Resultados del cálculo de diferencia de áreas usando la celda.

Integral bajo la curva del polinomio $I_{exp} = 6.6936 E-5$				
Curva teórica, Ecuación (3)	n	Áreas	Diferencia Áreas	
1	1.34	6.4595 E-5	2.34 E-6	x
2	1.38	6.6805 E-5	1.31 E-7	✓
3	1.42	7.0319 E-5	3.38 E-6	x

El mejor ajuste encontrado por el proceso corresponde a un factor de idealidad de  $n=1.38$ . Por lo tanto, los parámetros eléctricos son determinados a partir de la curva teórica 2.

La Tabla 2 contiene los parámetros de desempeño y eléctricos estimados utilizando el algoritmo implementado y su comparación con otros autores: P1- Nuestra

Propuesta, P2- Mihailetchi [6], P3- grupo de Shen [7] y P4-grupo de Foertig [5].

Tabla 2.- Comparación de parámetros en estructura ITO/P3HT:PCBM/Al.

	Voltaje circuito abierto (Voc)	Corriente de corto circuito (Isc)	Factor de llenado (FF)	Eficiencia de conversión ( $\eta$ )	Resistencia serie (Rs)	Corriente de saturación ( $I_0$ )	Factor de idealidad (n)
Propuesta metodológica 1:1	0.6 V	0.14 mA	0.65	0.78 %	50 $\Omega$ 50 nm	27 pA	1.38
(Mihailetchi, 2005)	0.61 V	0.49 mA	0.65	2.8%	>45 $\Omega$		
(Shen et al., 2011)					106 $\Omega$ 85 nm		
(Foertig et al., 2012) 1:8						0.7 pA	1.2-1.3

CONCLUSIONES

La caracterización experimental del sistema está basado en un instrumento de excitación de voltaje con incrementos > 5mV lo que propicia curvas VI con alta resolución (mayor a 100 puntos) y medición de corriente con capacidad en el rango de aA, esta sensibilidad es ideal para determinar propiedades eléctricas del diodo usadas en el estudio teórico de las celdas solares. En el mismo sentido, la comparación entre los parámetros estimados de la estructura fotovoltaica usando el algoritmo desarrollado y los reportados por la literatura demuestran que la propuesta metodológica para evaluar parámetros a partir de curvas VI es funcional. Así, podemos comentar que el sistema implementado es una herramienta con propiedades ampliadas de acuerdo a los sistemas comerciales convencionales, los cuales normalmente están limitados a determinar solo parámetros de desempeño.

Lo implementado en el sistema hasta el momento cumple con un proceso de medición y análisis, aplicando técnicas normalmente bien conocidas por el autor, pero las nuevas tendencias en la investigación de dispositivos fotovoltaicos requiere complementar el proceso de medición hacia técnicas basadas en altas resistencias y cargas dinámicas y este sistema tiene la capacidad de extender hacia esta dirección sus alcances.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Nelson, J. (2013). *The physics of solar cells*. Ed. Imperial College Press.

[2] Muñoz Lasso, A. (2003). *Modelo circuital de células solares de película delgada*. *Tecnociencia*, 5(1), 33-50.

[3] Abdulkadir, M., Samosir, A. S., & Yatim, A. H. (2013). *Modeling and Simulation of a Solar Photovoltaic System, Its Dynamics and Transient Characteristics in LABVIEW*. *Journal, IJPEDS*, 3(2), 185-192.

[4] *Model 6517B Electrometer User's Manual*. (2008).

[5] Foertig, A., Rauh, J., Dyakonov, V., & Deibel, C. (2012). *Shockley Equation Parameters of P3HT:PCBM Solar Cells derived by Transient Techniques*, *J. Physical Review B*, 86, 1-8.

[6] Mihailetchi, V. D. (2005). *Device Physics of Organic Bulk Heterojunction Solar Cells* (tesis de doctorado). Universidad de Groningen, Países Bajos.

[7] Shen, Y., Li, K., Majumdar, N., Campbell, J. C., Gupta, M. C. (2011). Bulk and contact resistance in P3HT:PCBM heterojunction solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95, 2314-2317.