

Respuesta eléctrica de una celda solar comercial con amplitud de iluminación modulada en frecuencia



Colaboración

Mario Espinosa Tlaxcaltecatl; Josefina Pérez Tellez; Carlos Muñiz Montero; Jacob Javier Vásquez Sanjuan; Juan Antonio Arizaga Silva, Universidad Politécnica de Puebla

Fecha de recepción: 21 de noviembre de 2022

Fecha de aceptación: 15 de diciembre de 2022

RESUMEN: El trabajo reporta el proceso de caracterización de una celda solar comercial, basado en su respuesta eléctrica bajo condición de iluminación periódicamente modulada en amplitud. La detección de fotocorriente de la celda solar se aísla del ruido externo empatando la frecuencia de modulación con la de detección. El sistema de medición se basa en un amplificador lock-in, identificando el comportamiento del sistema como un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte de 2.69 kHz. La integración de la celda solar como fuente eléctrica al sistema muestra una frecuencia de corte de 167 Hz, esta disminución en el ancho de banda del filtro es asociada a la resistencia y capacitancia característica de la celda solar.

PALABRAS CLAVE: Celda solar, caracterización, respuesta en frecuencia, enganche de fase, fotoconductividad, parámetros eléctricos.

ABSTRACT: The work reports the characterization process of a commercial solar cell, based on its electrical response under lighting conditions periodically modulated in amplitude. The photocurrent sensing of the solar cell is isolated from external noise by matching the modulation frequency to the sensing frequency. The measurement system is based on a lock-in amplifier, identifying the behavior of the system as a low-pass filter with a cutoff frequency of 2.69 kHz. The integration of the solar cell as an electrical source to the system presents a cutoff frequency of 167 Hz, this decrease in the bandwidth of the filter is associated with the characteristic resistance and capacitance of the solar cell.

KEYWORDS: Solar cell, characterization, frequency response, phase lock, photoconductivity, electrical parameters

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las fuentes renovables de energía como las celdas solares son una alternativa ante los problemas de contaminación en el mundo por uso de combustibles fósiles. En este sentido, se generan constantemente áreas de oportunidad para nuevas aplicaciones en diversos campos, como en interiores [1], automóviles eléctricos [2][3], aplicación en comunicación [4][5], entre las más recientes. En particular en la recepción de señales ópticas se abre una oportunidad de aprovechar la infraestructura existente para la intercomunicación de áreas cercanas. Pero es necesario realizar un estudio profundo de las limitaciones tecnológicas y de método de uso. Por esta razón, en este trabajo se propone un estudio experimental de la respuesta de una celda solar con señales ópticas moduladas en amplitud, con una técnica de escaneo de frecuencias, utilizando el concepto de amarre de fase, ampliamente utilizado en caracterización de dispositivos fotovoltaicos [6][7]. Este concepto asegura la detección de la fotocorriente en un ambiente de operación real. Por lo tanto, bajo estas condicio-

nes es posible determinar la respuesta eléctrica de la celda solar bajo una iluminación modulada en amplitud con una frecuencia periódica.

MATERIAL Y MÉTODOS

Equipo empleado

El equipo utilizado en la investigación pertenece a los laboratorios de sistemas automotrices de la Universidad Politécnica de Puebla y al laboratorio de óptica del INAOE. La celda solar de la marca CcLAMP, es de 10 x 15 cm, cuenta con una máxima potencia de salida de 1.8 W, un voltaje a la potencia máxima de 5 V y una corriente a la potencia máxima de 360 mA. Un medidor de potencia óptica THORLABS PM100D con detección en frecuencias de modulación de hasta 100 kHz. Un amplificador SR510 Lock-in de Stanford Research Systems, el cual es un amplificador para detectar señales en el rango de los nano a mili volts y trabaja mediante un enganche de fase. Un generador de funciones de dos canales y con programación de parámetros de salida, el 4053B de BK PRECISION.

Respuesta en intensidad de iluminación de un diodo emisor de luz

La respuesta del diodo emisor de luz se realiza usando un sensor de silicio modelo S130C con una apertura de 9.5 mm (conectado al medidor de potencia óptica THORLABS, ver Figura 1), con detección de longitudes de onda de los 400 a 1100 nm, con un rango seleccionado de potencia de entrada de 5 nW a 5 mW.

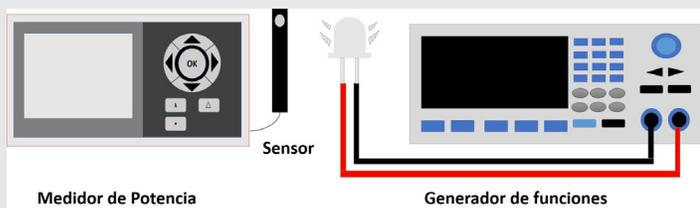


Figura 1. Esquema experimental para determinar la potencia óptica en función a la frecuencia de modulación del diodo emisor de luz.

Fuente: Elaboración propia.

La configuración selecciona un rango de frecuencias de modulación de 10 Hz a una frecuencia máxima de 100 kHz. Adicionalmente, el módulo PM100D se puede conectar para trabajar bajo un software basado en Labview dedicado al instrumento, que permite determinar la respuesta deseada en función a la longitud de onda de interés.

Respuesta en frecuencia del sistema de medición de corriente

Al realizar mediciones en el dominio de la frecuencia es necesario asegurar la respuesta del propio sistema de medición. El ancho de banda del sistema está definido por diversos componentes, a) la impedancia de entrada del propio amplificador SR510 Lock-in, en este caso, compuesta por la capacitancia de entrada $C_{lock-in}$ y su resistencia de entrada $R_{lock-in}$, b) por la capacitancia

de los cables coaxiales C_{coax} utilizados como puntas de prueba, c) por la resistencia de carga externa R_{Ext} en la entrada del amplificador, d) por la capacitancia de la celda solar C_{CS} y su resistencia característica R_{CS} . En la Figura 2 se muestra el esquema del circuito equivalente te propuesto.

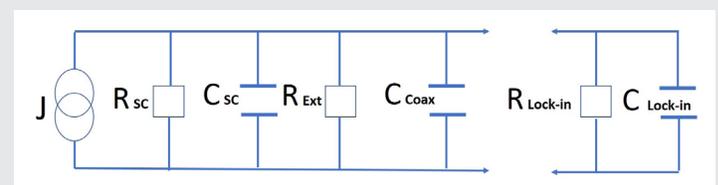


Figura 2. Esquema del circuito eléctrico equivalente del sistema de medición (lado izquierdo) y celda solar (lado derecho).

Fuente: Elaboración propia.

La respuesta de este circuito es la de un filtro pasa bajas, con un tiempo característico $\tau=RC$. El cual está determinado por el valor total de las capacitancias en paralelo $CT=C_{lock-in}+C_{coax}+C_{sc}$ y la resistencia total $R_T^{-1}=R_{lock-in}^{-1}+R_{Ext}^{-1}+R_{sc}^{-1}$. Este tiempo está asociado a una frecuencia característica $f_{car}=1/2\pi R_T C_T$.

En la Figura 3 se observa el esquema experimental para la caracterización del sistema de medición (sin el diodo emisor de luz, ni la celda solar, ya que la conexión es directa entre el generador y el amplificador Lock-in). En este caso, la fuente de corriente J es la señal inyectada por un generador de funciones como dispositivo alterno de excitación.

Respuesta en la celda solar

La caracterización de la celda solar consiste en determinar el comportamiento de su fotocorriente bajo la condición de iluminación modulada en amplitud en forma periódica. Un diodo emisor de luz blanca es la fuente óptica, cuya amplitud del voltaje de excitación es modulado por una señal periódica cuadrada usando un generador de funciones BK PRECISION, en respuesta el diodo emisor de luz modula la intensidad de iluminación. La fotocorriente de la celda solar es detectada por medio de un amplificador Lock-in que tiene una relación señal/ruido mayor a 50, en todas las mediciones realizadas. En la Figura 3 se muestra el esquema experimental de caracterización, donde se observa la resistencia externa utilizada para determinar la influencia de una carga resistiva en la dependencia de la celda solar en frecuencia de modulación.

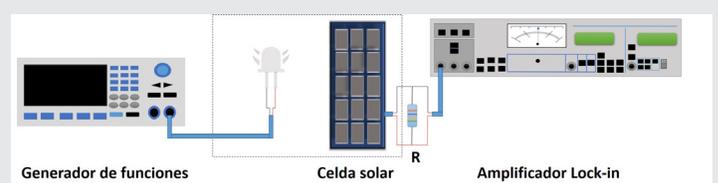


Figura 3. Esquema experimental de caracterización de la celda solar en función de la frecuencia de modulación.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

La respuesta del diodo emisor de luz en función del tiempo se observa en la Figura 4.

El periodo temporal de muestreo de un minuto es seleccionado para cubrir los diversos procedimientos experimentales de escaneo de datos de fotocorriente. La variación de la potencia óptica detectada con el medidor THORLABS muestra una amplitud aproximada de $3 \mu\text{W}$, lo cual indica una variación del 4.7%.

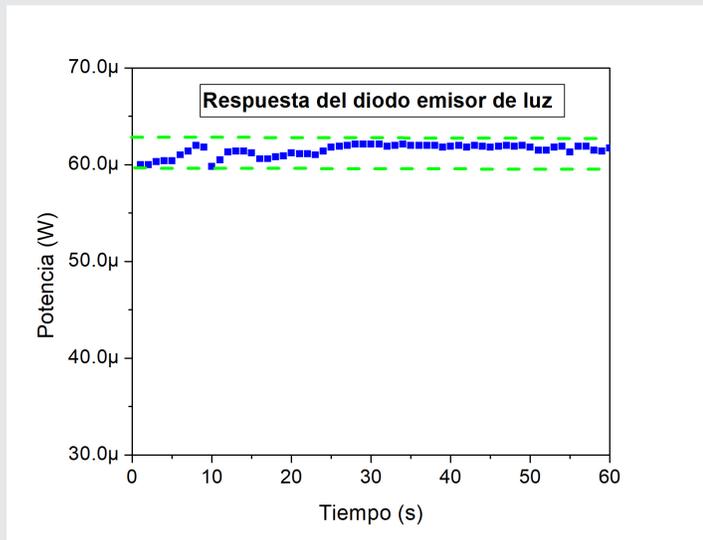


Figura 4. Respuesta del diodo emisor de luz con un voltaje de excitación de 3.5 V, una resistencia limitadora de corriente de 200Ω y con una configuración de detección a una longitud de onda de 1100 nm. Fuente: Elaboración propia.

Además, si los datos son tomados después de los 30 segundos a partir del inicio de la excitación del diodo emisor de luz, la respuesta es estable para los fines prácticos de este trabajo de caracterización (con una variación aproximada del 2%).

La respuesta del sistema de medición se observa en la Figura 5. La excitación usada es una señal periódica cuadrada de 400 mVp-p y el detector es el amplificador Lock-in. La curva muestra el comportamiento de un filtro pasa bajas con una frecuencia característica de corte a 2.69 kHz.

El comportamiento del sistema de medición sin resistencia externa (solo con $R_{\text{Lock-in}}$) y con resistencias externas es similar. Por lo tanto, no existe una influencia del sistema de medición por resistencia externa conectada, hasta el valor de resistencia usada de 240Ω .

La respuesta de la celda solar en función de la frecuencia de modulación se observa en la Figura 6.

Al incrementar el voltaje de excitación al diodo emisor de luz, este emite una potencia óptica mayor, y se re-

fleja en un incremento proporcional de fotocorriente de la celda solar. Por otra parte, al escanear la fotocorriente en función de la frecuencia de modulación de la iluminación, se observa la misma frecuencia de corte ($f_c = 167 \text{ Hz}$) conforme se incrementa la potencia de iluminación sobre la celda solar.

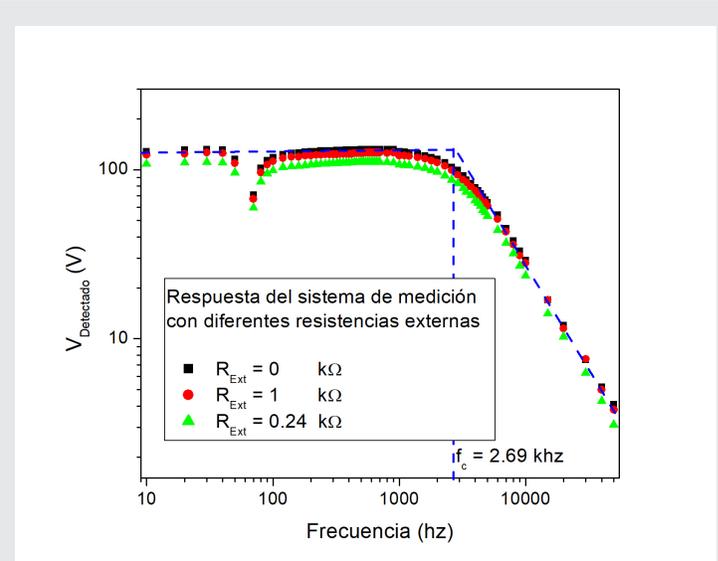


Figura 5. Respuesta del sistema de medición, sin resistencia externa y con resistencias externas. Fuente: Elaboración propia.

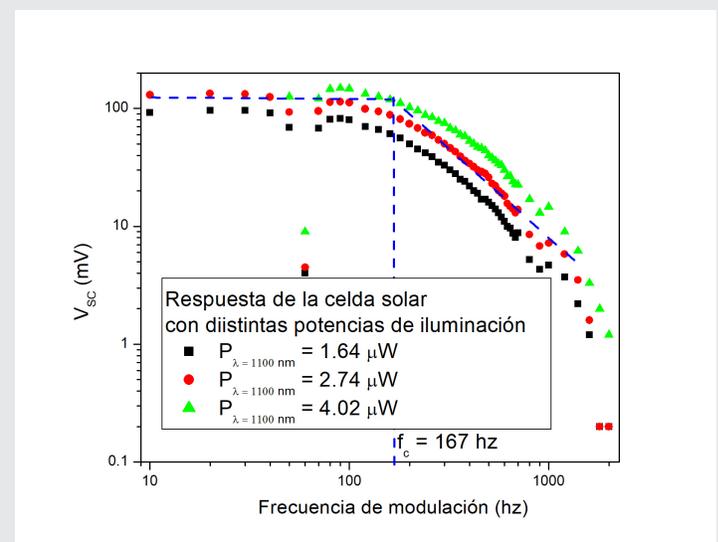


Figura 6. Respuesta de la celda solar en función de la frecuencia de modulación. Sin resistencia externa $R_{\text{Ext}} = 0$, con $R_{\text{Lock-in}} = 100 \text{ M}\Omega$. Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la influencia de la resistencia externa en el comportamiento de la celda solar en función de la frecuencia de modulación, se colocan resistencia en paralelo a la salida de la celda solar y con la entrada del amplificador Lock-in .

La Figura 7 muestra el comportamiento de la amplitud de la fotocorriente al variar la resistencia externa.

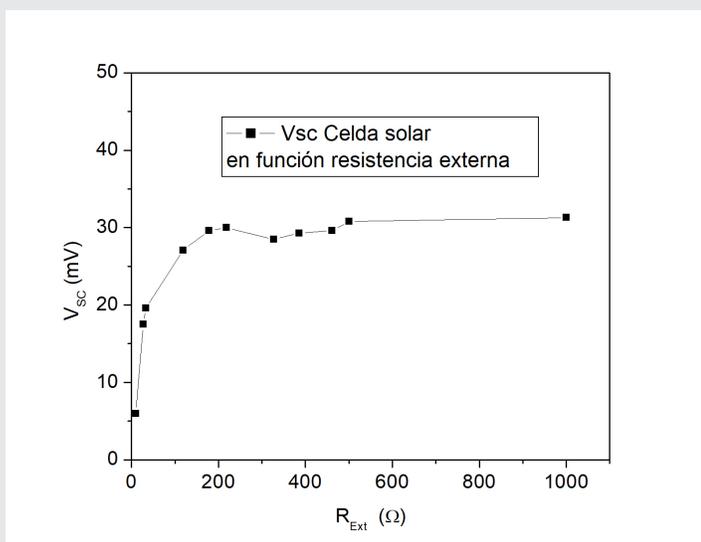


Figura 7. Respuesta de la amplitud de fotocorriente de la celda solar en función de la resistencia externa. Frecuencia de modulación 500 Hz.

Fuente: Elaboración propia.

Para el experimento se selecciona un voltaje máximo de excitación al diodo emisor de luz de 6 vp-p debido a la saturación de entrada del amplificador Lock-in y se fijó una frecuencia de modulación de 500 Hz. El voltaje medido de la celda solar está relacionado en forma directa hasta una resistencia de 218 Ω, después se satura la amplitud del voltaje para resistencias mayores a 380 Ω. Esta saturación nos indica que la resistencia externa es la predominante, al compararla con la resistencia característica de la celda solar, la cual permanece constante, pero podría tener variación de los 10 a 10 k Ω [8], dependiendo principalmente de las condiciones de iluminación.

CONCLUSIONES

La caracterización del sistema de medición identifica una frecuencia de corte aproximada en 2.69 kHz. La cual está por arriba de la frecuencia máxima en el proceso de caracterización de la celda solar (<2 kHz), lo cual comprueba que el sistema de medición no influye en el intervalo de frecuencias características de corte escaneadas. Además, se determina que la resistencia externa conectada a la celda solar modifica la amplitud de su respuesta en fotocorriente, pero no la frecuencia de corte, la cual es la misma (167 Hz). Con punto máximo de voltaje alcanzado a la salida de la celda después de los 200 Ω. Pero con un valor de 100 Ω de la resistencia externa donde la señal comienza a crecer, alcanzando el 80% aproximado de la amplitud máxima. Este valor de resistencia óptima es un resultado similar al reportado por el grupo de investigación de Ouedraogo [9]. Con estos resultados alcanzados, se abren caminos de investigación en posibles aplicaciones de las celdas solares en transmisión y recepción de señales. Logrando definir los rangos de modulación de señales ópticas con luz blanca y el comportamiento eléctrico resultan-

te de la celda solar. Pero es importante considerar y mejorar en aplicaciones con paneles solares las condiciones de iluminación, debido a que el tamaño de la mancha del haz debe ser proporcional al tamaño del dispositivo fotovoltaico o explorar fuentes coherentes y de mayor potencia óptica. Otro aspecto de investigación es el origen de las dependencias de las frecuencias características, que en nuestro caso lo asociamos solo a la capacitancia de la celda solar debido a que no existe variación de intensidad de iluminación promedio que afecte a la resistencia característica de la celda solar, responsable del proceso de recombinación de carga y, por lo tanto, dependiente de la intensidad de iluminación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica de Puebla y al Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, por su contribución en equipo para el desarrollo de la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Mathews, S. N. Kantareddy, T. Buonassisi, and I. M. Peters, "Technology and Market Perspective for Indoor Photovoltaic Cells," *Joule*, vol. 3, no. 6, pp. 1415-1426, Jun. 2019.
- [2] C. Schuss, T. Fabritius, B. Eichberger and T. Rahkonen, "Impacts on the Output Power of Photovoltaics on Top of Electric and Hybrid Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 5, pp. 2449-2458, May 2020.
- [3] B. Commault, T. Duigou, V. Maneval, J. Gau-me, F. Chabuel, and E. Voroshazi, "Overview and Perspectives for Vehicle-Integrated Photovoltaics," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, p. 11598, Dec. 2021.
- [4] S. Das, A. Sparks, E. Poves, S. Videv, J. Faki-dis and H. Haas, "Towards Energy Neutral Wire-less Communications: Photovoltaic Cells to Connect Remote Areas," *Energies*, vol. 12, no. 19, p. 3772, Oct. 2019.
- [5] S. Das, A. Sparks, E. Poves, S. Videv, J. Faki-dis and H. Haas, "Effect of Sunlight on Photovol-taics as Optical Wireless Communication Recei-vers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 19, pp. 6182-6190, Oct.1, 2021.
- [6] P. Baranov, I. Zatonov, and B. B. Duc, "Dual Phase Lock-In Amplifier with Photovoltaic Modu-les and Quasi-Invariant Common-Mode Signal," 2022.
- [7] N. Chowdhury, C. A. Hossain, M. Longo, and W. Yaici, "Performance Investigation Of The Li-fetime Of Solar Cell Using Surface Photovoltage

(Spv) Method And Efficiency Measurement,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 1403–1412, 2021.

[8] Dexin Li and P. H. Chou, “Maximizing efficiency of solar-powered systems by load matching,” *Proceedings of the 2004 International Symposium on Low Power Electronics and Design (IEEE Cat. No.04TH8758)*, pp. 162–167, 2004.

[9] A. Ouedraogo, H. Guengane, K. B. Imbga, and D. J. Bathiebo, “Analysis of external load resistance influence on the single-crystalline silicon photovoltaic module (PV)”, *J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 663–675, Apr. 2019.