

# Discusión y evaluación de fuentes de luz artificial para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos<sup>3</sup>

Discussion and evaluation of artificial light sources for the characterization of photovoltaic devices

Wendy Reyes-Rojas<sup>1</sup>  
Carlos Meza-Benavides<sup>2</sup>

Fecha de recepción: 30 de abril de 2014  
Fecha de aceptación: 2 de agosto de 2014

Reyes-Rojas, W; Meza-Benavides, C. Discusión y evaluación de fuentes de luz artificial para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos. *Tecnología en Marcha*. Edición especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág. 31-40.

- 1 Estudiante. Escuela de Ingeniería en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica  
Correo electrónico: [reyesrojasw@gmail.com](mailto:reyesrojasw@gmail.com)
- 2 Profesor Adjunto. Escuela de Ingeniería en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica  
Correo electrónico: [cmeza@itcr.ac.cr](mailto:cmeza@itcr.ac.cr)
- 3 Parte del trabajo se desarrolló en el "The Abdus Salam Centre for Theoretical Physics", Trieste, Italia.

## Palabras clave

Dispositivos fotovoltaicos; espectro de emisión; caracterización eléctrica; lámpara halógena; filamento de tungsteno.

## Resumen

El uso de energía fotovoltaica se ha convertido en una solución ampliamente utilizada en la generación eléctrica ante la necesidad de reducir la emisión de contaminantes. Por su parte, la caracterización de dispositivos fotovoltaicos es una de las tareas fundamentales en el desarrollo y evaluación de diversas tecnologías de generadores fotovoltaicos. Sin embargo, debido al elevado costo de los dispositivos de simulación solar; el uso de fuentes de luz no diseñadas con dicho propósito, como las lámparas halógenas durante el proceso de caracterización, se ha vuelto una práctica común en laboratorios de investigación alrededor del mundo. A pesar de ello, los autores de este artículo no han encontrado información respecto al modo de uso de dichas fuentes lumínicas de manera que se mejore su desempeño.

Este trabajo se enfocó en analizar los efectos del método de alimentación eléctrica de las bombillas sobre la estabilidad de la luz emitida, la relación entre los cambios de tensión y la intensidad lumínica lograda, y las implicaciones que la potencia disipada pueda tener sobre la distribución espectral obtenida. Se encontró, principalmente, que el uso de tensión variable incide de manera negativa en la estabilidad de la emisión lumínica y, además, que la temperatura de operación del filamento juega un rol de suma importancia en el calentamiento que pueda experimentar el panel, así como en la proporción de energía emitida que el dispositivo fotovoltaico es capaz de aprovechar.

## Key words

Photovoltaic devices; emission spectrum; electrical characterization; halogen lamp; tungsten filament.

## Abstract

The use of photovoltaic energy has become a widely used solution in electricity generation, as the need to reduce the emission of pollutants has become a priority in the last years. As one of many necessary tasks, the characterization of photovoltaic devices is one of the key procedures in the development and evaluation of various technologies of photovoltaic generators. Due to the high cost of solar simulation devices, the use of halogen light sources on the characterization process has become a common practice in research laboratories around the world, yet the authors of this article could not find information regarding appropriate practices in the use of this light sources so that their performance in the characterization of photovoltaic devices gets improved. This study sought to analyze the effects of the method of powering bulbs on the stability of the emission, the relationship between changes in voltage and light intensity emitted and the implications of dissipated power can have on the spectral distribution obtained. The study led to conclude that the use of variable tension has a negative impact on the stability of light emission, and further that the operating temperature of the filament plays a role of paramount importance in the heating that the panel can suffer as well as the proportion of energy emitted the photovoltaic device is able to harness.

## Introducción

La fuente de energía libre de carbono más abundante en la Tierra es la energía solar. Se estima que la cantidad de energía anual proveniente del Sol a la Tierra corresponde a  $3 \times 10^{24}$  J; es decir, 10 000 veces más energía del consumo actual de la población mundial (Grätzel, M. (2007)). Más aún, en la edición 2012 de “*Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future*” (Rogner, H. et al. (2012)), publicación coordinada por el “*International Institute for Applied Systems Analysis*” ubicada en Viena, Austria, donde contribuyen una veintena de investigadores de prestigiosas universidades y centros de investigación de todo el mundo, reporta que el potencial técnico de la energía solar es de entre 387 a 1037 veces mayor que la biomasa; de 77 a 181 veces mayor que la energía geotérmica; de 1240 a 4667 veces mayor que la energía hidroeléctrica; y de 47 a 124 veces mayor que la energía eólica. Nótese que el potencial técnico no representa el potencial teórico sino aquel que es aprovechable con la tecnología actual.

De esta forma, la generación de electricidad basada en el efecto fotoeléctrico se perfila como una de las principales fuentes energéticas alternativas. El efecto fotoeléctrico ocurre cuando un material emite electrones; genera una corriente eléctrica, cuando se hace incidir sobre él radiación electromagnética, e.g., luz solar.

La naturaleza intrínseca de este proceso tiene varias ventajas, a saber:

- es robusto y de una larga vida útil ya que solo se ven involucrados movimientos mecánicos a nivel atómico,
- la radiación solar se encuentra disponible en cualquier lugar;
- es altamente escalable ya que se puede tener sistemas que generan en el orden de mW hasta sistemas que generan en el orden de GW,
- es fácilmente integrable a cualquier entorno (rural o urbano).

En lo sucesivo, se denominará “dispositivo fotovoltaico” a aquel elemento que produce energía eléctrica por medio del efecto fotoeléctrico.

Un aspecto de gran importancia en los sistemas fotovoltaicos es la caracterización eléctrica de la

tecnología fotovoltaica utilizada. Los resultados de dicha caracterización son normalmente reportados en las hojas de datos de los módulos fotovoltaicos comerciales y comprenden, generalmente, la corriente en corto circuito ( $I_{sc}$ ), la tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la potencia máxima generada ( $P_{mpp}$ ) y la eficiencia de conversión ( $\eta$ ) medidas a una temperatura y radiación solar constantes. Dicha información es necesaria para dimensionar y estimar la energía que producirá una instalación fotovoltaica. Así mismo, la caracterización eléctrica de dispositivos fotovoltaicos es una parte fundamental en el desarrollo de nuevos prototipos de celdas solares. Los laboratorios que desarrollan nueva tecnología fotovoltaica, frecuentemente, realizan caracterizaciones de sus prototipos para determinar correlaciones entre parámetros constructivos y desempeño eléctrico y, así, identificar dónde se pueden realizar mejoras.

Por otro lado, la necesidad de caracterizar los generadores fotovoltaicos de forma experimental también proviene de la dificultad de modelar su comportamiento eléctrico. Un dispositivo fotovoltaico tiene características eléctricas corriente-tensión no lineales que dependen, también de forma no lineal, de variables ambientales como temperatura y radiación solar (Lasnier, 1990; Liu y Dougal, 2002; Boke, 2007; Gow y Manning, 1999; Meza, Virtuani y Chianese, 2010).

Además, tal y como mencionan (Anderson, Bishop y Dunlop, 2000; Zinsser, Makrides, Schmitt, Georgiou y Werner, 2007; Cereghetti, Realini, Chianese y Rezzonico, 2003; Friesen, Chianese, Pola, Realini y Bernasconi, 2007; Friesen, et al., 2007; Chianese, et al., 2007; Friesen, et al., 2010), cada tecnología fotovoltaica responde eléctricamente de forma distinta a estas condiciones ambientales.

De esta forma, los dispositivos fotovoltaicos requieren de una metodología confiable de caracterización eléctrica que permita:

- Predecir la generación de energía del dispositivo para unas condiciones dadas,
- Comparar el desempeño energético de distintas tecnologías fotovoltaicas,
- Obtener modelos que permitan optimizar la extracción de energía del generador fotovoltaico y los circuitos electrónicos de procesamiento de potencia asociados.

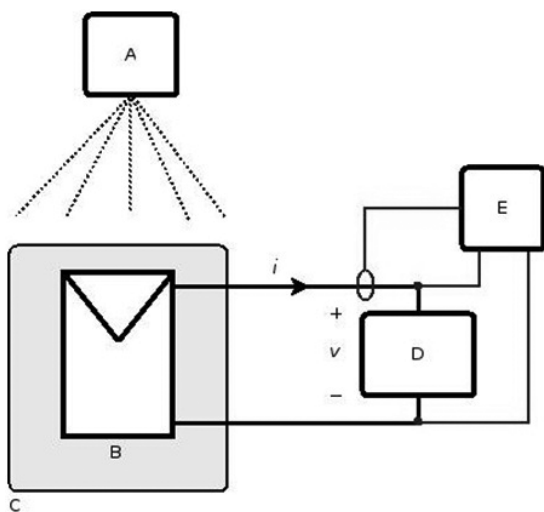


Figura 1. Diagrama de bloques de la instrumentación utilizada para caracterizar un dispositivo fotovoltaico. A: Fuente de luz, B: Dispositivo Fotovoltaico, C: Cámara Térmica, D: Carga electrónica, E: Sistema de adquisición de datos.

La figura 1 muestra un diagrama de bloques que representa el equipo que se utiliza para caracterizar dispositivos fotovoltaicos. Existe una fuente de luz (A), también denominada simulador solar, que ilumina el dispositivo fotovoltaico (B) a caracterizar. En algunos casos, para mantener la temperatura constante, se coloca el dispositivo fotovoltaico en una cámara térmica (C). Bajo una temperatura e iluminación constante, una carga electrónica (D) se encarga de recorrer todos los puntos de operación del dispositivo fotovoltaico; mientras que un sistema de adquisición de datos (E) almacena los datos de corriente y tensión para, luego, obtener la curva corriente versus tensión del dispositivo.

La confiabilidad en la caracterización del dispositivo fotovoltaico depende, entre otras cosas, de la fuente de luz utilizada para su excitación. Existen varios estándares internacionales que detallan cómo deben ser las características ópticas de esta fuente de luz como, por ejemplo, los estándares de "The American Society for Testing and Materials" (ASTM) y la "International Electrotechnical Commission" (IEC), IEC-60904-9. En general, la fuente de luz debe cumplir dos condiciones:

- Un espectro lumínico similar al del Sol
- Una intensidad lumínica constante.

Como se analizará, a lo largo del desarrollo del presente trabajo, obtener un espectro lumínico similar al del Sol implica utilizar lámparas que alcancen altas temperatura y que, por lo tanto, son costosas y tienen una vida útil relativamente corta como, por ejemplo, las lámparas de xenón. Por ello, este tipo de fuente de luz son normalmente utilizadas por laboratorios dedicados a la certificación de los dispositivos, mientras que los laboratorios que se dedican al desarrollo de tecnologías fotovoltaica utilizan fuentes de luz halógenas que, si bien es cierto su espectro lumínico no es tan similar al del Sol como el de las lámparas de xenón, son significativamente más económicas y representan una buena primera aproximación para estimar el desempeño eléctrico de la celda prototipo desarrollada.

Es común encontrar en la literatura científica trabajos que reportan la eficiencia de prototipos de celdas solares caracterizadas con lámparas halógenas, como por ejemplo: (Mihailetchi, et al. 2005), (Mihailetchi, Xie, de Boer, Koster y Blom, 2006) y (Beek, Wienk y Janssen, 2004).

A pesar de que las lámparas de halógeno son ampliamente usadas en la caracterización de celdas solares los autores del presente artículo no han encontrado un análisis detallado acerca de los efectos y cuidados que hay que tener a la hora de utilizar este tipo de fuente lumínica.

En este sentido el presente artículo discute, evalúa y finalmente ofrece algunas recomendaciones referentes con el uso de fuentes de luz halógena utilizada para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos.

El resto del documento está organizado de la siguiente forma: primero se describe y analiza los principios físicos que rigen el fenómeno de incandescencia en lámparas halógenas con el fin de obtener indicaciones acerca de los cuidados que hay que tener a la hora de utilizar este tipo de fuente de luz cuando se caracterizan dispositivos fotovoltaicos. Luego, se presentan resultados experimentales que sustentan el análisis teórico realizado. Finalmente, se expone una serie de recomendaciones referentes a la utilización de fuentes de luz halógena para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos.

## Tecnología de iluminación halógena: Análisis teórico

### Incandescencia

La emisión de energía debida al calor contenido en el cuerpo emisor se conoce como radiación térmica. El fenómeno de incandescencia comprende únicamente la radiación térmica con energía en forma de luz; es decir, cuya frecuencia esté comprendida dentro de los límites del espectro visible. Dentro del grupo de objetos incandescentes utilizados como fuentes de luz, se encuentran las lámparas incandescentes eléctricas, compuestas por un filamento resistivo, que se calienta debido al paso de corriente eléctrica. Existen varias categorías de lámparas incandescentes eléctricas de acuerdo a los materiales utilizados para su confección, algunas de las que han alcanzado mayor eficiencia son las lámparas halógenas (Schreuder, 2008).

Las lámparas halógenas se componen de un filamento de Tungsteno, encapsulado en un cristal relleno de gas inerte (Schreuder, 2008). El Tungsteno y el cuarzo se utilizan como filamento resistivo y cristal de encapsulado, respectivamente, debido a su capacidad de soportar altísimas temperaturas sin sufrir mayor deterioro mecánico. Sin embargo, las altas temperaturas hacen que el filamento sufra evaporación con el paso del tiempo. Para contrarrestar dicho efecto, se coloca dentro del cristal el gas inerte, el cual ejerce presión sobre el filamento reduciendo su capacidad de evaporarse. Además, la presencia del gas evita el depósito del filamento evaporado en las paredes internas del cristal, esto por medio del ciclo del halógeno.

A continuación, se discutirán tres propiedades de las fuentes de luz halógena que se deben considerar cuando se utilizan para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos; esto es, irradiancia espectral, estabilidad de la irradiancia y transferencia de calor.

### Espectro electromagnético

La irradiancia espectral generada por el filamento de tungsteno depende principalmente de su temperatura y coeficiente de emisividad ( $\epsilon$ ). El coeficiente de emisividad no es constante sino que varía con respecto a la temperatura y a la frecuencia espectral. No obstante, a la temperatura de operación

del filamento, y para el rango de frecuencia espectral de interés para las celdas solares, el coeficiente de emisividad puede considerarse constante (Maclsaac, Kanner y Anderson, 1999). Más aún, es posible aproximar la irradiancia espectral de las lámparas a base de tungsteno con la irradiancia espectral de un cuerpo negro (coeficiente de emisividad=1) tal y como se menciona en (Davidson, n.d.) y (Maclsaac, et al. 1999). El concepto de cuerpo negro es utilizado con frecuencia como punto de referencia para describir el fenómeno de radiación térmica. El llamado cuerpo negro consiste en un objeto ideal, capaz de absorber toda la energía incidente en su superficie desde el exterior; y emitir el total de la energía que incide desde su interior (Schreuder, 2008). Por otro lado, el espectro solar del Sol también se aproxima al espectro de un cuerpo negro con una temperatura aproximadamente de 5 800 K (Iqbal, 1983).

La irradiancia espectral de un cuerpo negro está determinada por la siguiente expresión

$$I(\lambda, T) = \frac{(2hc^2)}{\lambda^3} \frac{1}{\frac{(hc)}{e\lambda kT} - 1} \quad (1)$$

Donde corresponde a la longitud de onda irradiada,  $T$  a la temperatura del cuerpo,  $h$  a la constante de Planck,  $c$  a la velocidad de la luz, y  $k$  a la constante de Boltzmann. Con base en la anterior expresión se obtuvieron las curvas de irradiancia espectral, lámparas de un cuerpo negro a 2500, 2700, 2900 y 3100 K, las cuales, como se discutió anteriormente, son similares a las irradiancias espectrales de las lámparas de halógeno más comunes.

A partir de estas gráficas es posible observar que las lámparas emiten energía en un amplio rango del espectro electromagnético. No obstante, los dispositivos fotovoltaicos sólo generan corrientes en un rango limitado del espectro, tal como puede observarse en la Tabla I. Los datos mostrados en la Tabla I se obtuvieron a partir de las mediciones de eficiencia cuántica de varias celdas fotovoltaicas de distintas tecnologías reportadas en (Green, Emery, Hishikawa, Warta y Dunlop, 2012). La eficiencia cuántica indica la cantidad de corriente que una celda produce cuando es irradiada por fotones de una longitud de onda determinada. El rango de absorción se define en este documento como el rango del espectro electromagnético en donde la eficiencia cuántica es mayor al 60 %.

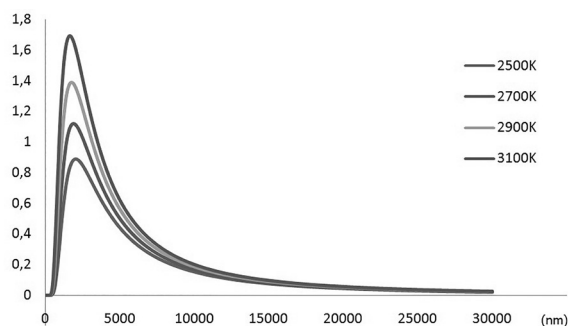


Figura 2. Irradiancia espectral de un cuerpo negro a las temperaturas típicas de un filamento de tungsteno de una lámpara halógena.

Cuadro 1. Rango de absorción, según la definición utilizada en este documento, de celdas fotovoltaicas de distintas tecnologías obtenidos con base en las curvas de eficiencia cuántica reportadas en (Green, et al., 2012).

Tecnología fotovoltaica	Rango de absorción
Tintes sensibilizados	410 nm a 800 nm
Película delgada GaAs	350 nm a 860 nm
Silicio policristalino	340 nm a 1080 nm
Silicio híbrido	350 nm a 1090 nm
Celda orgánica	350 nm a 720 nm

A partir de la figura 2 y el cuadro 1, se puede observar que cuanto mayor sea la temperatura, existe una mayor irradiancia en las longitudes de onda de interés; no obstante, siempre existirá un porcentaje bastante alto de la irradiancia espectral que no generará corriente eléctrica. Esta fracción del espectro será disipada como calor no deseado, lo cual, como se analizará más adelante, ocasiona efectos indeseables para la caracterización.

### Estabilidad de la irradiancia

Como ya se discutió anteriormente, la caracterización eléctrica de los dispositivos fotovoltaicos debe hacerse bajo una irradiancia constante.

Existen dos factores que pueden afectar la irradiancia de las fuentes de luz halógena: el circuito electrónico que alimenta energéticamente a la lámpara y el transitorio térmico del fenómeno de incandescencia.

Consta una correlación entre la potencia disipada por un filamento y su temperatura (Jeethendra y Padmajeeth, 2011). Ahora bien, tal y como se discutió anteriormente, la temperatura del filamento determina su irradiancia espectral y, por lo tanto, su irradiancia. La expresión matemática que relaciona la potencia eléctrica y la temperatura se indica en la ecuación 2,  $v$  corresponde a la tensión en las terminales del filamento,  $R$  a la resistencia de este;  $K$  es una constante que depende del material de construcción del filamento;  $T$  es su temperatura;  $\epsilon$  su emisividad; la constante de Stefan-Boltzmann; y  $T_0$  es la temperatura ambiente.

$$\frac{v^2}{R} = K (T - T_0) + \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (2)$$

Lo anterior implica que cambios en la potencia consumida podrían, a su vez, implicar cambios en el fenómeno de incandescencia. Por tanto, es necesario suministrar una tensión constante a la lámpara para evitar posibles variaciones en su intensidad lumínica. En este sentido, hay que tener especial cuidado debido a que la mayoría de las lámparas halógenas comerciales vienen acondicionadas para operar en corriente alterna, lo que puede afectar significativamente las mediciones de las características eléctricas del dispositivo fotovoltaico, tal y como se ilustra en la sección de verificación experimental.

Por otro lado, un filamento de tungsteno presenta una dinámica en su temperatura cuando ocurren cambios en la potencia de alimentación (Ben-Yaakov, Peretz y Hesterman, 2005). La ecuación 3 expresa la dinámica de la temperatura ( $T$ ) de un filamento de tungsteno, en donde  $C$  corresponde a la capacidad calorífica del filamento;  $P_c$  a la potencia radiada en forma de calor;  $P_r$  a la potencia emitida en forma de luz y  $P_e$  a la potencia eléctrica consumida por el sistema.

La ecuación 3 permite ver, además, que el filamento alcanzará una temperatura estable cuando la energía consumida y la suministrada sean equivalentes. Esta ecuación permite concluir que la temperatura del filamento experimentará un transitorio cada vez que exista un cambio de potencia eléctrica; por ejemplo, durante el encendido, tal y como se verificará experimentalmente en la siguiente sección.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} [P_e - (P_c + P_r)] \quad (3)$$

La resistencia eléctrica y temperatura del tungsteno (así como de otros materiales) guarda una relación que puede modelarse por medio de la ecuación 4, en la cual el valor de  $\alpha$  para el tungsteno correspondería a 0.004403 (Kuphaldt, 2006).

$$R=R_{ref}[1+\alpha(T-T_{ref})] \quad (4)$$

### Transferencia de calor

Cerca del 85% de la energía emitida por una lámpara halógena, se encuentran dentro o cerca del infrarrojo, mientras que solo entre el 15% y 20% de la energía es emitida en el visible (entre 400 y 700nm), (Davidson, n.d.). Solo un 1% de la energía pertenece al rango del ultravioleta, energía que es parcialmente absorbida por el cristal de encapsulado de la lámpara. De esta forma, una gran parte del espectro lumínico que llega de dicha energía infrarroja es absorbido por el material adyacente, y se convierte en calor. Durante la caracterización de un generador fotovoltaico (GFV), este fenómeno puede provocar variaciones en la temperatura de la celda, dependiendo de la distancia entre el filamento y el GFV, el tiempo de irradiación y la temperatura de la fuente halógena.

### Verificación experimental

#### Equipo utilizado

Para la medición de curvas de corriente tensión, se utilizó la función de barrido lineal de tensión del SMU Agilent B2902A; mientras que para la captura de datos en función del tiempo se utilizó el osciloscopio DSOX2002A. Para la medición de los valores de temperatura se hizo uso de la cámara térmica Fluke Ti10; mientras que para alimentar las lámparas con tensión CD, al igual que para registrar los valores de tensión y corriente consumidos por estas se utilizó la fuente Kepco BOPI00-10MG. Finalmente, para medir la intensidad de radiación se utilizó una celda de referencia Spektron210 calibrada en 83.3 mV para 1000 W/m<sup>2</sup> y, en algunos casos, una celda de silicio amorfo.

### Resultados experimentales

Con la finalidad de estudiar las variaciones en irradiancia se realizaron pruebas de laboratorio con dos lámparas halógenas con filamento de Tungsteno marca OSRAM, EVW J218 de 250W 82V y f8a8 de 300W 110-130V, que en adelante serán referidas como "Lámpara 1" y "Lámpara 2", respectivamente. Las pruebas se realizaron bajo distintos perfiles de alimentación, según el fenómeno por analizar en cada caso. Para las pruebas con la Lámpara 1 la distancia entre el filamento y la celda fue de 17.5cm; mientras que en el caso de la Lámpara 2, la distancia correspondió a los 17cm.

Se realizaron pruebas conectando la Lámpara 1 a una tensión senoidal de media onda, resultado de la supresión de uno de los ciclos de la señal de corriente alterna de 110V 60Hz de la red eléctrica de Costa Rica; y alimentando la Lámpara 2, directamente con la tensión alterna de 110V 60Hz. Se midió la forma de onda de la tensión entregada por una celda de silicio amorfo a una carga resistiva  $R$  ante la influencia de cada una de las lámparas por separado, y se obtuvieron oscilaciones periódicas de 60Hz para la Lámpara 1 y 120Hz en el caso de la Lámpara 2. Se observó además que la amplitud de las oscilaciones aumenta de manera inversamente proporcional respecto al valor de  $R$ . El cuadro 2 muestra los valores pico a pico de la corriente de la celda para dos valores de  $R$ .

Cuadro 2. Variaciones pico a pico de la corriente emitida por la celda de referencia ante ambas lámparas alimentadas con CA.

	Carga 150 $\Omega$	Carga 1000 $\Omega$
$I_{pp}$ Lámpara 1	1.51mA	0.92mA
$I_{pp}$ Lámpara 2	0.52mA	0.21mA

La figura 3 muestra el resultado obtenido al aplicar el proceso de caracterización al panel de silicio amorfo, bajo la influencia de la Lámpara 1 alimentada con CA. Por otro lado, la figura 4 muestra el resultado obtenido al aplicar el mismo proceso de caracterización al panel mientras se le ilumina con luz emitida por la Lámpara 1, alimentada con CC.

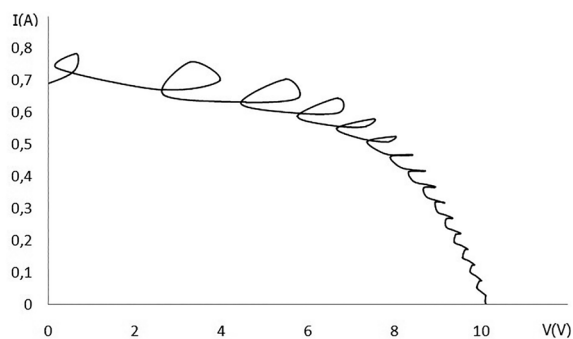


Figura 3. Curva IV del panel de silicio amorfo extraída utilizando CA en la Lámpara 1.

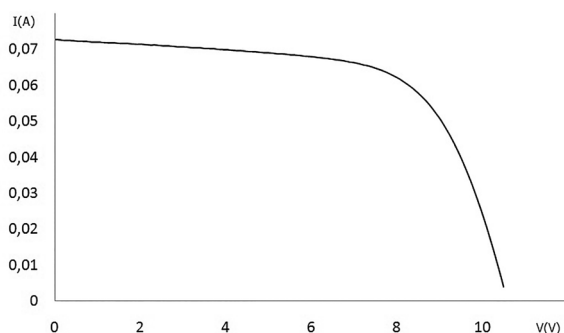


Figura 4. Curva IV del panel de silicio amorfo extraído utilizando CC en la Lámpara 1.

Se evaluó, además, el comportamiento del transiente de consumo de corriente y emisión lumínica de ambas lámparas durante el proceso de encendido bajo la influencia de corriente continua; es decir, en el periodo en que estas experimentan cambios en la tensión de alimentación. En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos para una de las pruebas efectuadas en el caso de la Lámpara 1, al aplicar un escalón de tensión CD de 45V de amplitud. En el caso de la Lámpara 2, la amplitud del escalón aplicado correspondió a los 75V. La línea delgada corresponde a la tensión en voltios emitida por la celda de referencia (eje vertical) respecto al tiempo en segundos (eje horizontal); mientras que

la línea gruesa muestra el comportamiento de la corriente consumida por el filamento de Tungsteno en amperios (eje vertical) respecto al tiempo en segundos (eje horizontal). En pruebas adicionales se encontró que el transiente disminuye su duración, al igual que disminuye el punto máximo de corriente consumida en cuanto mayor sea la temperatura del filamento en el instante del encendido de la lámpara.

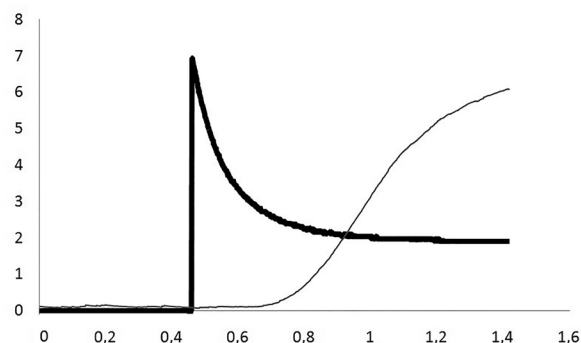


Figura. 5 Corriente e intensidad lumínica del filamento de Tungsteno de la Lámpara 1 ante un escalón de tensión.

Adicionalmente, se registraron los cambios de temperatura en la celda para ambas lámparas, y se obtuvo, en promedio, un cambio de 1°C durante los 4 segundos de exposición a la luz de la Lámpara 2. En el caso de la Lámpara 1, las variaciones de temperatura de la celda fueron cercanas a los 0,5°C para periodos similares de exposición.

Finalmente, se midieron los valores de resistencia y temperatura del filamento apagado de ambas lámparas antes ser utilizados, al igual que el valor de resistencia del filamento una vez finalizado el transiente inicial de encendido. Esto último se registró de manera indirecta por medio de la corriente y tensión aplicadas al filamento. A partir de dicha información, se hizo uso de la Ecuación 4, tomando como valores de referencia para determinar el valor de la temperatura del filamento encendido. La información mencionada anteriormente, además de la potencia consumida por la lámpara en cada caso, se resume en el cuadro 3.

Cuadro 3. Valores de resistencia y temperatura del filamento para ambas lámparas

	Rref(Ω)	R(Ω)	Tref(°C)	T (°C)	P(W)
Lámpara 1	1.8	20.91	27	2436.7	94.4
Lámpara 2	3.6	39.3	27	2277.7	140.8



## Conclusiones y recomendaciones

En el presente artículo se analizó teórica y experimentalmente las características físicas de las fuentes de luz halógenas.

Experimentalmente, se pudo comprobar que el rizado de la 3 muestra claramente los inconvenientes de utilizar alimentación CA para caracterización de dispositivos fotovoltaicos debido a que la deformación de la curva no permite conocer el comportamiento real del panel. La figura 4, por su parte, evidencia que la estabilidad de la intensidad lumínica lograda con el uso de CC permite la extracción de la curva característica sin deformación.

De acuerdo con (4), el valor de  $R$  será siempre mayor que  $R_{ref}$  mientras  $T \geq T_{ref}$  y  $\alpha > 0$  se cumplan, lo cual es válido para el filamento de Tungsteno. Lo anterior puede relacionarse con el comportamiento de la corriente mostrado en la figura 5, en donde se observa inicialmente un alto consumo de corriente, cuando la resistencia del filamento corresponde a  $R_{ref}$  que disminuye rápidamente conforme dicha energía incrementa la temperatura del filamento. Una vez alcanzada la temperatura requerida, el filamento comienza a emitir luz debido al fenómeno de incandescencia, con un incremento gradual en la intensidad lumínica hasta alcanzar un punto constante en ambas variables, cuando el valor de la resistencia corresponde a  $R$ ,  $P_e$  es igual a  $(P_r + P_j)$  en (2) y  $\Delta T$  es igual a cero. La disminución del transiente ante mayores niveles de temperatura inicial del filamento respaldan la afirmación de que dicha energía se emplea en elevar la temperatura del filamento hasta lograr un equilibrio entre la potencia eléctrica suministrada y la potencia emitida.

La medición indirecta de temperatura del filamento indicada en el cuadro 3 permite identificar el espectro de emisión correspondiente de la lámpara en cada caso, gracias a lo cual es posible afirmar que las condiciones de prueba de la Lámpara 1 lograron una emisión con mayor concentración en el visible que en el infrarrojo que la Lámpara 2. Cabe resaltar que la diferencia de temperatura de ambas lámparas no guarda relación con la potencia disipada o la tensión aplicada en cada caso, ya que la lámpara con menor consumo de potencia y menor tensión aplicada fue la que registro haber alcanzado la mayor temperatura. Por lo tanto, se cree que las diferencias de construcción (forma, grosor y longitud del

filamento) así como el desgaste debido al uso de las lámparas pudieron haber contribuido a diferenciar la capacidad calorífica de los filamentos en (3).

La dinámica registrada indica que las fuentes de luz halógenas no constituyen una fuente confiable para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos mientras existan variaciones en la tensión de alimentación de las mismas, ya que esto causaría, a su vez, variaciones en la temperatura, la intensidad y la distribución del espectro emitido por el filamento.

Finalmente se recomienda, en el uso de fuentes halógenas para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos:

- Hacer uso de CC en la alimentación de la lámpara. Para procurar la estabilidad de la intensidad lumínica.
- Utilizar la fuente halógena en el punto de máxima disipación de potencia, para aumentar su temperatura y acercar su distribución espectral al visible, disminuir la transferencia de calor y lograr una mejor simulación del espectro solar.
- Realizar la caracterización luego del transiente de encendido del filamento, para asegurar la estabilidad de la radiación.
- Efectuar la extracción de la curva procurando el menor tiempo de exposición del dispositivo a la luz de la fuente halógena. Para disminuir el calentamiento de la celda.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al "Programa de Pasantía Estudiantil con Fondos del Sistema 2014, CONARE-TEC" con el cual se ha cubierto parte fundamental de los gastos de viaje del pasante y a la Rectoría del Instituto Tecnológico que gestiona todo el programa.

## Bibliografía

- Anderson, D., Bishop, J., Dunlop, E. (2000) Energy rating of photovoltaic modules. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- Beek, W., Wienk, M. M., Janssen, R.A.J., (Junio, 2004) Efficient Hybrid Solar Cells from Zinc Oxide Nanoparticles and Conjugated Polymer. *Advanced Functional Materials*, 16(12).
- Ben-Yaakov, S., Peretz, M.M., Hesterman, B. (Marzo, 2005). A SPICE compatible behavioral electrical model of a heated

- tungsten filament. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE. 2, 1079 – 1084.
- Boke, U., (Setiembre, 2007) A simple model of photovoltaic module electric characteristics. European Conference on Power Electronics and Applications, 1–8.
- Cereghetti, N., Realini, A., Chianese, D., Rezzonico, S. (2003) Power and Energy production of PV modules. IEEE 3rd world conference in photovoltaic energy conversion.
- Chianese, D., Friesen, G., Pasinelli, P., Pola, I., Realini, A., Cereghetti, N., Bernasconi, A., (2007) Direct Performance Comparison of PV Modules, 22th european photovoltaic solar energy conference.
- Davidson, M.W. Tungsten-Halogen Incandescent Lamps. Carl Zeiss Microscopy Online. Obtenido desde <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>
- Friesen, G., Gottschalg, R., Beyer, H.G., Williams, S., Guerin de Montgareuil, A., van der Borg, N., van Sark, W., Huld, T., Müller, B., de Keizer, A.C., Niu, Y., (2007) In Intercomparison of different energy prediction methods within the European project performance – results of the 1nd Round Robin. 22th european photovoltaic solar energy conference.
- Friesen, G., Chianese, D., Pola, I., Realini, A., Bernasconi, A., (2007) In Energy Rating Measurements and Predictions at ISAAC. 22th european photovoltaic solar energy conference.
- Friesen, G., Chianese, D., Dittmann, S., Dominé, D., Burà, E., Strepparava, D., Margna, B., Denicolà, M., Meoli, R., Pola, I., (2010) In Performance intercomparison of 13 different PV modules based on indoor and outdoor test. 25th european photovoltaic solar energy conference.
- Gow, J.A., Manning, C.D., (Marzo, 1999) Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. Electric Power Applications, IEE Proceedings, Volumen 146(2), 193–200.
- Grätzel, M. (Abril, 2007) Photovoltaic and photoelectrochemical conversion of solar energy. Phil. Trans. R. Soc. A, Volumen 365, 993-1005.
- Green, M., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E. (2012). Solar cell efficiency tables (version 39). Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Vol. 20, 12-20.
- Iqbal, M. (1983). An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, Canada.
- Jeethendra, K., Padmajeeth, A. (Diciembre, 2011). Resistivity variation and temperature of a Tungsten Filament. Lab Experiments Kamaljeeth Instrumentation and Service Unit. 11(4).
- Kuphaldt, T. (2006) Lessons In Electric Circuits, Volume I – DC, 5° Edición. Recuperado desde: <http://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/>
- Lasnier, F. (1990) Photovoltaic Engineering Handbook. Taylor & Francis.
- Liu, S., Dougal, R., (2002) Dynamic multiphysics model for solar array. IEEE Transactions on Energy Conversion, 17, 285–294.
- Maclsaac, D., Kanner, D., Anderson, G. (1999). Basic Physics of the Incandescent Lamp (Lightbulb). The Physics Teacher. 37.
- Meza, C., Virtuani, V., Chianese, D., (Setiembre 2010) Evaluation of models for the internal capacitance of a pvmodule for the design and simulation of power converters. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.
- Mihaleitchi, V., Koster, L., Blom, P., Melzer, C., de Boer, B., van Duren, J., Janssen, R. (Mayo 2005), Compositional Dependence of the Performance of Poly(p-phenylenevinylene):Methanofullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells. Advanced Functional Materials, 15(15).
- Mihaleitchi, V. D., Xie, H., de Boer, B., Koster, L., Blom, P., (Mayo 2006), Charge Transport and Photocurrent Generation in Poly(3-hexylthiophene):Methanofullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells, Advanced Functional Materials, 16(1), 699-708.
- Rogner, H., Aguilera, R.F., Bertani, R., Bhattacharya, S.C., Dusseault, M.B., Gagnon, L., Haberl, H., Hoogwijk, M., Johnson, A., Rogner, M.L., Wagner, H., Yakushev, V., (2012) Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future, chapter Energy Resources and Potentials. Cambridge University Press, Cambridge UK, New York and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria,
- Schreuder, D. (2008). Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception. Países Bajos: Springer.
- Zinsser, B., Makrides, G., Schmitt, W., Georghiou, G.E., Werner, J.H., (2007) Annual energy yield of 13 photovoltaic technologies in germany and in cyprus. 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference.