

## Desarrollo de un sistema para la medición de la eficiencia energética de celdas solares

### Develop of a system for the mensuration of the energy efficiency of solar cells



<http://opn.to/a/qctOI>

MSc. Ivelisse Almanza-Fundora <sup>1</sup>\*, Lic. Regla Ramona García-Fernández <sup>1</sup>, Dr.C. Francisco García-Reina <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Facultad de Ciencias Técnicas, Ciego de Ávila, Cuba.

**RESUMEN:** El presente trabajo muestra el desarrollo de un sistema para la medición de la potencia luminosa solar y la potencia eléctrica generada por las celdas solares de un panel fotovoltaico, con el fin de evaluar la eficiencia energética en la conversión de la energía luminosa en energía eléctrica. Para esto lo primero es calibrar la potencia luminosa que emite una lámpara de tungsteno, teniendo en cuenta la temperatura del filamento y la emitancia del tungsteno en función de la temperatura y la longitud de onda. La temperatura del filamento se determina midiendo la resistencia en función del voltaje y el amperaje de alimentación del filamento y usando la dependencia de la resistividad del tungsteno con la temperatura. La potencia luminosa que emite el filamento es calibrada con fototransistores y fotodiodos patrones Siemens, en unidades fotoeléctricas (en lux, lx) y en unidades energéticas ( $W/m^2$ ). Con las características I-V de la celda, el voltaje a circuito abierto  $V_{oc}$  y la intensidad de la corriente en cortocircuito  $I_{sc}$  se determina la potencia eléctrica máxima suministrada por la celda, la cual dividida entre la potencia luminosa proporciona el valor de la eficiencia de conversión de energía luminosa en eléctrica por la celda fotovoltaica. Las celdas estudiadas tienen un voltaje a circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de 4,6 V, una intensidad de la corriente en cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de 87 mA y una eficiencia de 12,4% con una irradiación de 399,6  $W/m^2$ .

**Palabras clave:** potencia luminosa solar, potencia eléctrica, panel fotovoltaico.

**ABSTRACT:** This document deals with the development of a system for the measurement of the solar power and the electric power generated by the solar cells of a photovoltaic panel, in order to assess energy efficiency in the conversion of light energy into electrical energy. So the first thing is to calibrate the light power emitted a tungsten lamp, taking into account the temperature of the filament and the emittance of the tungsten as a function of temperature and wavelength. The temperature of the filament is determined by measuring the resistance as a function of the voltage and amperage of the filament power and using the dependence of the resistivity of tungsten with temperature. The luminous power that emits the filament is calibrated with phototransistors and photodiodes patterns Siemens, photoelectric units (Lux, lx) and in unit of energy ( $W/m^2$ ). With the I-v characteristics of the cell, the  $V_{oc}$  open circuit voltage and intensity of current in short circuit  $I_{sc}$  determines the maximum electrical power supplied by the cell, which divided between the light output provides the efficiency rating conversion of light energy into electricity by the photovoltaic cell. Studied cells have an open circuit ( $V_{oc}$ ) of 4.6 V voltage, intensity of current in short circuit ( $I_{sc}$ ) of 87 mA and efficiency of 12.4% with irradiation of 399,6  $W/m^2$ . Key words: solar cells, energy efficiency measurements.

**Keywords:** power luminous lot, electric power, photovoltaic panel.

\*Autor para correspondencia: Ivelisse Almanza-Fundora, e-mail: [ivelisse@unica.cu](mailto:ivelisse@unica.cu)

Recibido: 15/01/2018

Aceptado: 10/12/2018

## INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de fuentes de energías alternativas, pero a su vez para proteger el medio ambiente, los Gobiernos contemporáneos han tomado la decisión de utilizar el Sol como una gran fuente de energía ya que es infinita e inagotable. En Cuba, a partir de la Revolución Energética impulsada por el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz desde principios de la década pasada, se viene desarrollando un gran esfuerzo en el desarrollo de sistemas para el aprovechamiento de la energía solar, tanto para el calentamiento directo, como en su conversión en energía eléctrica en paneles solares fotovoltaicos. La importancia de este tema es tal en la actualidad que ha quedado reflejada en el Lineamiento No. 253 de la Política Económica y Social de la Revolución trazada en el 6to Congreso del Partido Comunista de Cuba PCC ([Partido Comunista de Cuba](#)) (2011), en cuanto al desarrollo de sistemas confiables y precisos de medir los recursos energéticos con los que cuenta el país, con especial relevancia a la energía solar.

En los sistemas fotovoltaicos es imprescindible medir la eficiencia de las celdas solares, ya que esto permite saber cuánta potencia de radiación solar ( $W/m^2$ ) absorbe cada una de estas, para lo cual hay que conocer además con precisión cuánta energía solar llega a cada locación por unidad de área en un segundo ([Daniels, 1981](#)). Luego, la cantidad de energía solar y la eficiencia de conversión de esta en energía eléctrica son los dos parámetros fundamentales a medir y controlar en todo sistema fotovoltaico de aprovechamiento de la energía solar ([Böer, 1979](#); [Green, 1982](#); [Alan et al., 1990](#); [Bacus, 2001](#); [Doherty y Malone, 2001](#); [Ginley et al., 2008](#)).

Para comprender mejor la esencia de este trabajo es conveniente preguntarse: ¿qué es la energía solar? Es la energía radiante producida en el Sol, como resultado de reacciones nucleares de fusión, que llegan a la Tierra a través del espacio en paquetes de energía llamados fotones (luz), que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres. Sin la presencia del sol no existiría vida en la tierra ([Kreith y Kreider, 1978](#); [Iqbal, 1983](#); [Manrique, 1984](#); [Nelson, 2003](#); [Espejo Marín, 2004](#)). El planeta sería demasiado frío, no crecerían las plantas ni habría vida alguna,

excepto algunas Bacterias. Los recursos energéticos provienen directa o indirectamente del sol. Los combustibles fósiles son plantas y árboles muy antiguos, que crecieron gracias a la luz solar y han sido comprimidos durante millones de años. La energía eólica y la hidráulica son generadas mediante procesos conducidos por el sol ([Meinel y Meinel, 1982](#); [Manrique, 1984](#); [Ginley et al., 2008](#); [Morales, 2014](#)). La madera para combustible es obtenida de los árboles, los cuales no podrían crecer sin luz solar ([Kreith y Kreider, 1978](#); [Böer, 1979](#); [Daniels, 1981](#); [Espejo Marín, 2004](#); [Berri, 2014](#)). La conversión de la radiación solar en energía eléctrica se realiza por medio de celdas fotovoltaicas ([Bacus, 2001](#); [Doherty y Malone, 2001](#); [Ginley et al., 2008](#)).

La eficiencia de las celdas solares es determinante para reducir los costos de los sistemas fotovoltaicos, ya que su producción es la más cara de todo el sistema ([Iqbal, 1983](#)). El efecto fotovoltaico se produce cuando el material de la celda solar (silicio u otro material semiconductor) absorbe parte de los fotones del sol. El fotón absorbido libera a un electrón que se encuentra en el interior de la celda. Realmente la eficiencia de la celda es la relación entre la cantidad de electrones liberados para conducción eléctrica y la cantidad de fotones de luz que llegan a la celda y es llamada eficiencia cuántica interna ([Böer, 1979](#); [Harper, 2000](#); [Doherty y Malone, 2001](#); [Bahnemann, 2004](#); [Berri, 2014](#)).

De aquí se desprende que es necesario medir con precisión y confiabilidad la eficiencia energética y la potencia eléctrica que entregan los paneles solares para cada aplicación en específico.

Determinándose como situaciones problemáticas, el bajo aprovechamiento de la energía solar en Cuba y en la provincia, desconocimiento de los parámetros fundamentales de las celdas solares y su modo de empleo, no existencia de mediciones de las variables energéticas solares y la falta de equipamiento y metodologías de medición de la energía solar y la eficiencia de las celdas y paneles solares ([Kreith y Kreider, 1978](#); [Espejo Marín, 2004](#); [Meinel y Meinel, 2013](#); [Berri, 2014](#)).

Se declara como objetivo de la investigación desarrollar un sistema para la medición de la eficiencia energética de celdas solares, para su empleo en el diseño y montaje de sistemas de paneles fotovoltaicos con el fin de un uso racional y eficiente de la energía solar.

El fenómeno fotovoltaico se determina a nivel atómico al poder incidir un fotón en el enlace entre dos átomos y romperlo, para que se permita esta ruptura en el enlace con poca energía es necesario que el átomo sea inestable, esto es, que tenga incompleta su banda de valencia y el número de electrones ahí contenidos sea diferente de ocho ([Shah et al., 1999](#); [Harper, 2000](#); [Wolfgang, 2002](#); [Würfel, 2005](#); [Ginley et al., 2008](#)). Los materiales que presentan esta característica en sus átomos son los semiconductores ([Boer y Bhattacharya, 1994](#)). En un semiconductor puro la corriente producida por el movimiento de los electrones es insignificante debido al bajo valor de portadores libres, por lo que se le añaden impurezas al material para aumentar los portadores libres, el nuevo material obtenido es llamado semiconductor extrínseco. La luz está compuesta de un conjunto de radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia, a este rango se le llama espectro luminoso ([García y Boix, 1996](#); [Shah et al., 1999](#); [John y William, 2006](#); [Meinel y Meinel, 2013](#)).

## MÉTODOS

### Determinación de la intensidad de la radiación emitida por el filamento

La intensidad de la radiación o irradiancia  $E$  emitida por un cuerpo negro es proporcional a la temperatura absoluta elevada a la cuarta, según la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = E = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

donde:

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann. Para los cuerpos grises como el filamento de tungsteno:

$$E = E = \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

donde:

$\varepsilon(T)$  es la emitancia del tungsteno que también es función de la temperatura.

Luego conociendo la temperatura del filamento se puede determinar la irradiancia o potencia

luminosa radiada por unidad de área del filamento (en unidades de  $W/m^2$ )

### Determinación de la temperatura T del filamento

La medida de la temperatura del filamento se realiza indirectamente, midiendo su resistencia en función de la temperatura. Para un filamento de wolframio, su resistencia se relaciona con la temperatura de acuerdo con la ecuación.

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (3)$$

donde:

$T$  es la temperatura en grados centígrados, y los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$ , valen para el wolframio respectivamente,  $\alpha = 4.82 \cdot 10^{-3} / K$  y  $\beta = 6.76 \cdot 10^{-7} / K^2$ .

La resistencia del filamento  $R(T)$  se calcula aplicando la ley de Ohm, a partir de las indicaciones del voltímetro y del amperímetro.

### La potencia de la lámpara es el producto $V \cdot I$

Despejando  $t$  y teniendo en cuenta que la temperatura absoluta  $T$  del filamento es  $T=t+273$ , obtenemos.

Y la resistencia a  $0^\circ C$  es:

La emisividad del filamento viene dada por:

$$\varepsilon(T) = -0.02071284 + 1.73311816 \cdot 10^{-4} \cdot T + -1.99182555 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad (4)$$

la irradiancia total en función de la temperatura.

## MATERIALES

### Bombillo Tungsteno 12 Voltio

A continuación, en la [Figura 1](#) se mostrará el foco de referencia utilizado para comprobar la calibración del sensor utilizado.

### Sensor de luz B04

En la [Figura 2](#) se muestra el sensor utilizado para obtener la intensidad lumínica, formado por un fototransistor ST-1KL3A de la firma coreana Kodenchi.

El esquema del transistor se presenta en la [Figura 3](#) junto a su característica corriente colector vs. luminancia. En la [Figura 3](#) se observa el esquema eléctrico del sensor utilizado para poder hallar la emisividad ( $W/m^2$ ) del bombillo de tungsteno, se encuentra un fototransistor de referencia ST-1KL3A y una resistencia comercial de  $10K\Omega$  de precisión (Se midió la resistencia en el equipo XJ2811C LCR METER ([Figura 3](#)



**FIGURA 1.** Foco de referencia.



**FIGURA 2.** Sensor de iluminación.

dando como resultado 9,991 K $\Omega$ ), en paralelo a esa resistencia se encuentra un capacitor cerámico, comercial de 103 (Se midió el capacitor en el equipo XJ2811C LCR METER ([Figura 3](#)) dando como resultado 8,787 pF).

#### **Celda solar**

Para este trabajo se utilizó una celda solar de baja potencia ([Figura 4](#)). La selección se hizo de acuerdo a las opciones presentes en el mercado y seleccionando la de mejores características eléctricas. Los parámetros tenidos en cuenta fueron entre otros; Potencia, Voltaje máximo, Corriente máxima etc.

Las características eléctricas de las celdas son:

- Tamaños 54.50mm x 54.50 mm

- Máxima potencia ( $P_m$ ) = 0.414W.
- Máximo voltaje de trabajo óptimo ( $V_m$ ) = 4.6V.
- Máxima corriente activa óptima ( $I_m$ ) = 90mA.
- Voltaje de circuito abierto (VOC) = 5V.
- Corriente de corto circuito (ICC) = 100mA.

#### **Servomotor**

Se utilizan dos servomotores de serie Towardpro MG9965, como se puede apreciar en la [Figura 5](#)

Especificaciones

- Peso: 55 g
- Dimensiones: 40,7 x 19,7 x 42,9 mm aprox.

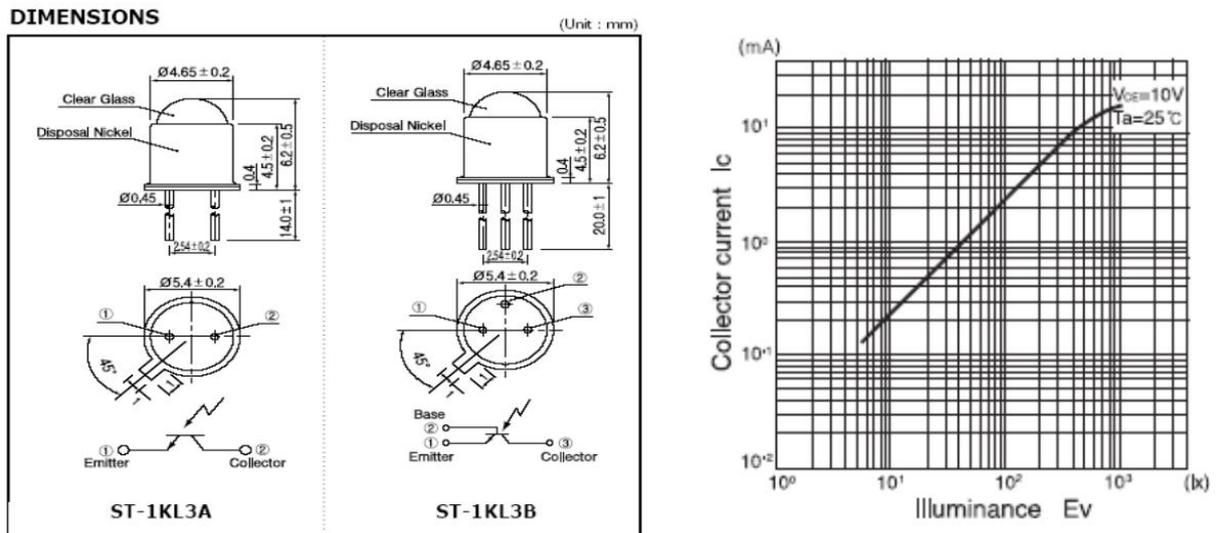


FIGURA 3. Diagrama del sensor de iluminación y sus características opto-ampericas.



FIGURA 4. Celda Solar utilizada.



FIGURA 5. Servomotor Towardpro MG9965.

- Torque de eje: 9.4 kgf·cm (4,8 V), 11 kgf·cm (6 V)
- Velocidad operación: 0,17 s/60° (4,8 V), 0,14 s/60° (6 V)
- Voltaje de operación: 4,8 V a 7,2 V
- Rango de corriente 500 mA--900 mA (6V)
- Dead band width: 5  $\mu$ s
- Rango de Temperatura: 0 °C-55 °C.

Arduino Mega 2560 (Figura 6)

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica basada en el Atmega 2560. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertas

seriales), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o el poder con un adaptador de CA o la batería a CC para empezar. La Mega es compatible con la mayoría de los escudos diseñados para el Arduino Duemilanove o Diecimila.

Con el voltaje y la corriente y aplicando la ley de Ohm ([Ecuación 5](#)), se puede determinar la resistencia de la bombilla de tungsteno.

Midiendo la potencia eléctrica en la fotocelda y sabiendo el área de la celda solar se puede hallar la eficiencia de la celda solar:

$$\eta_{celda_j} = \frac{P_{EleCel_j}}{E_{celda_j} \cdot A_{celda}} \cdot 10^3 \quad (5)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Determinación del poder emisivo total del foco

Aplicando la [ecuación 3](#), se determinó la resistencia del filamento de la lámpara de tungsteno en variación con la temperatura.  $R_0=3,17 \Omega/^\circ C$ , la temperatura ambiente es de  $28^\circ C$ , La resistencia del filamento medida en un RLC arrojó  $3,6 \Omega$ . ([Figuras 7 y 8](#)).

En la [Figura 9](#) se observan la gráfica que se obtuvo de Voltaje y la corriente del bombillo de tungsteno cuando se varía el voltaje de la fuente de 4 V a 12 V, en este caso es lineal.

A partir de la ecuación de temperatura absoluta del filamento que está dado en K se puede relacionar con la corriente suministrada por el sensor de iluminación que se encuentra en la [Figura 9](#). Como se puede apreciar en una excelente correlación ( $R^2 = 0,978$ ) con la ley de Stefan-Boltzmann de una dependencia con  $T^4$ .

En la [Figura 10](#) se presenta el montaje para la medición de la eficiencia de la celda solar, con el diagrama para calcular la potencia que llega a esta desde el filamento.

A partir de la ecuación del vector intensidad del campo eléctrico en función del filamento se obtiene el flujo luminoso que llega a la celda fotoeléctrica. Este se correlacionó con el dado por la medición de la fotocorriente del fototransistor y están en concordancia con un 96% de coincidencia entre ambas mediciones del flujo luminoso en la celda. Luego el error máximo en la medición de la irradiancia y por tanto de la eficiencia no sobrepasa el 4%.

En el siguiente gráfico ([Figura 11](#)) se presenta la relación entre la potencia eléctrica que entrega

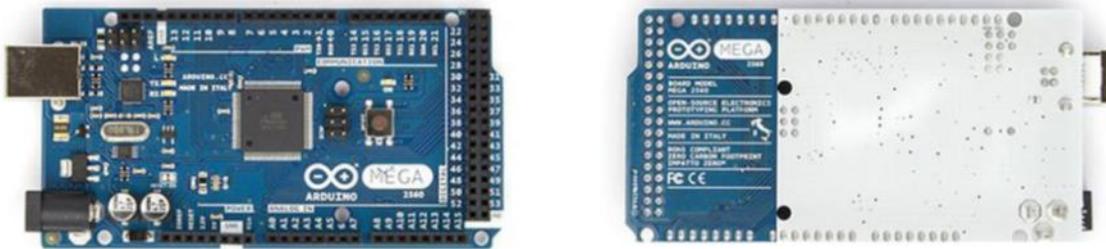


FIGURA 6. Placa del Arduino Mega 2560 35.

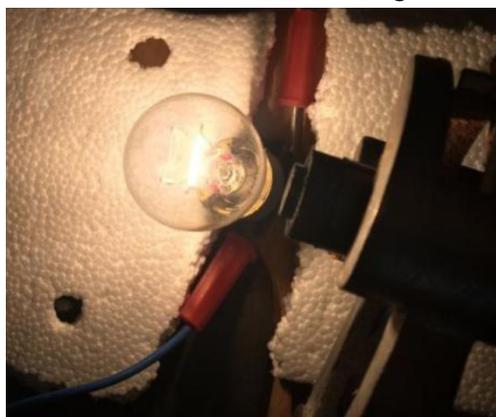


FIGURA 7. Toma de las medidas del sensor de luz.

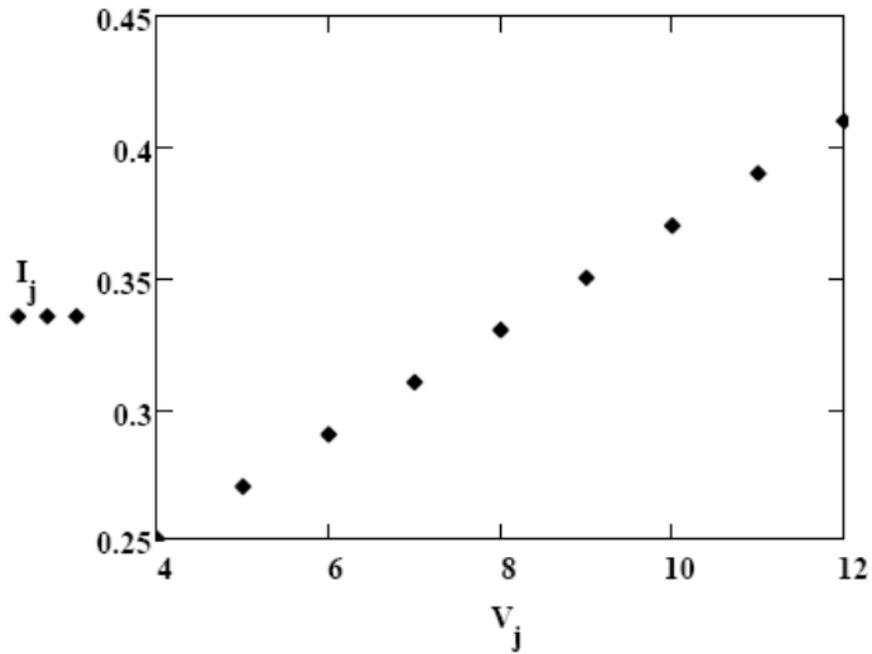


FIGURA 8. Gráfica del Voltaje vs Corriente.

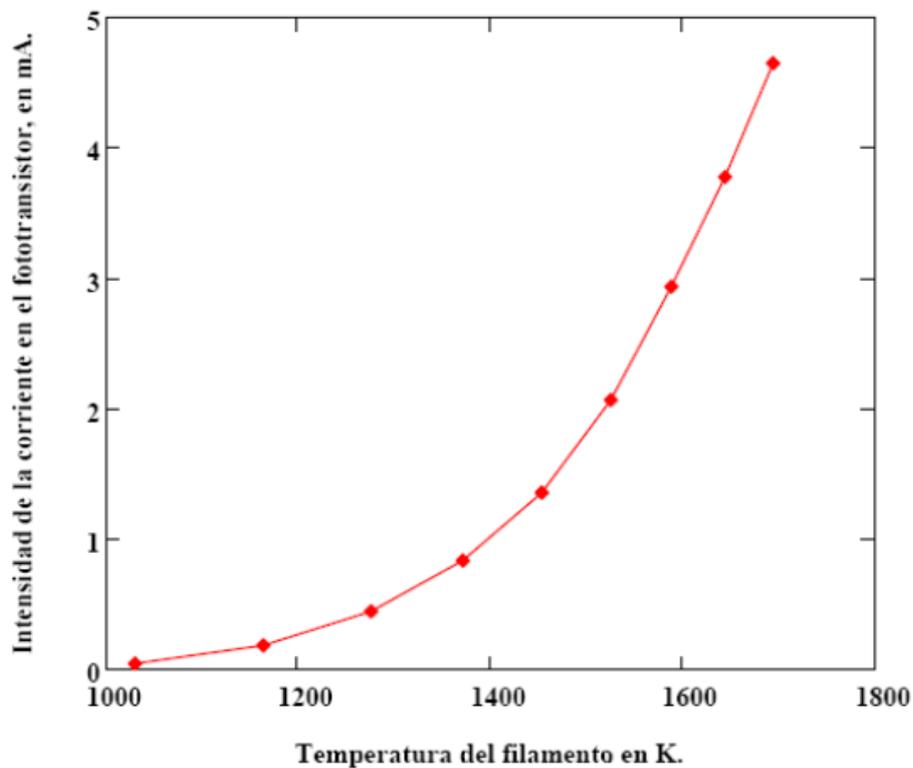


FIGURA 9. La relación de la corriente del colector del sensor iluminación con la temperatura absoluta del filamento.

la fotocelda con la iluminancia que recibe del filamento de tungsteno:

Midiendo la de la potencia eléctrica en la fotocelda y sabiendo el área de la celda solar se puede hallar la eficiencia de la celda solar, en la

Figura 12 se muestra la eficiencia de la celda con el flujo que llega a la celda

Luego con una irradiancia máxima de 399,4 W/m<sup>2</sup> esta celda tiene una eficiencia de conversión de energía luminosa en eléctrica de un 12,4%.

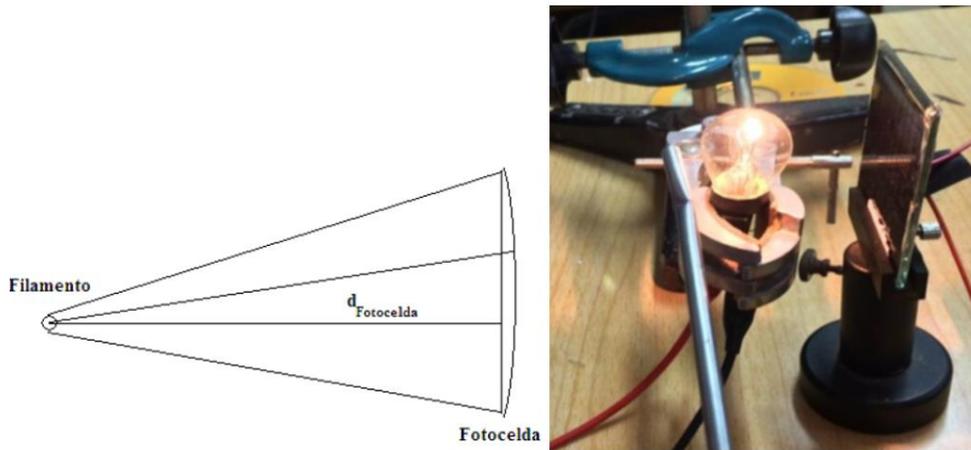


FIGURA 10. Medición de la eficiencia de la foto celda.

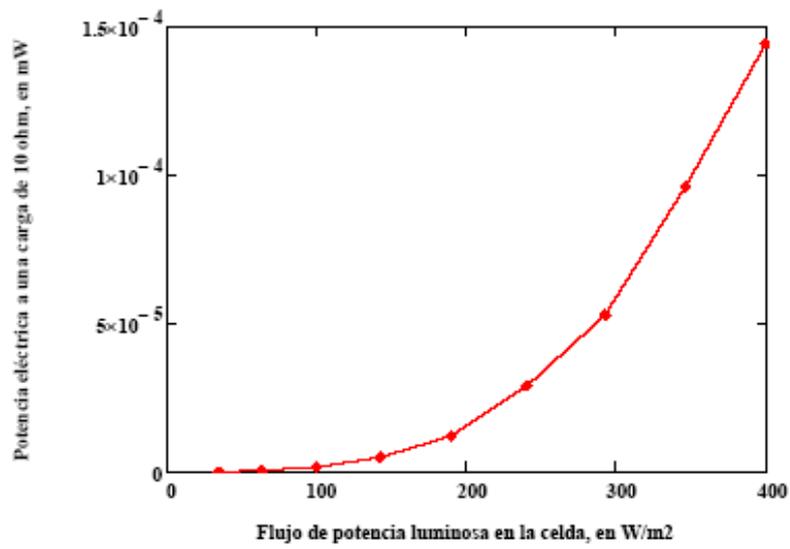


FIGURA 11. Potencia eléctrica en función de la potencia luminosa.

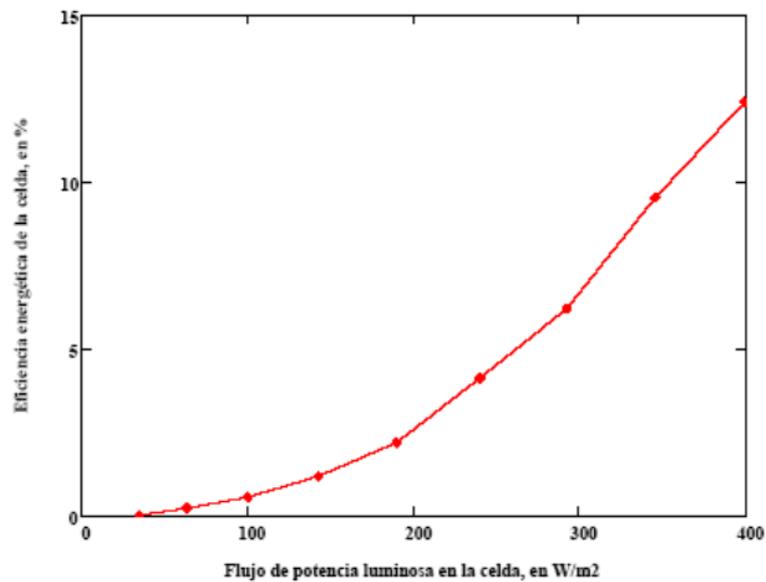


FIGURA 12. La eficiencia de la celda con el flujo que llega a la celda.

## CONCLUSIONES

- Se desarrollaron fuentes calibradas de luz con lámparas incandescentes de tungsteno de alta precisión, con potencia luminoso controlada desde 0 hasta 400 W/m<sup>2</sup>
- Se montaron sensores calibrados de radiación luminosa en correspondencia con las fuentes patrones de luz desarrollados, lo que permite obtener una respuesta medible de fotoceldas a la radiación luminosa.
- Se estudiaron 4 celdas solares de alta calidad para las que se obtuvieron como valores medios un voltaje a circuito abierto  $V_{oc} = 4,6$  V, una intensidad de la corriente en cortocircuito  $I_{sc}$  de 87 mA, con una irradiación de 399,6 W/m<sup>2</sup>.
- La eficiencia de conversión de la energía solar en energía eléctrica por las celdas solares fue de 12,4%.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAN, H.; CROMER, H.; FERNÁNDEZ, F.J.: *Physic in Science and Industry*, Ed. McGraw-Hill, New York, USA, 1990.
- BACUS, C.E.: *Solar Cells*, Ed. IEEE Press, New York, USA, 2001.
- BAHNEMANN, D.: “Photocatalytic water treatment: solar energy applications”, *Solar energy*, 77(5): 445-459, 2004.
- BERRI, L.: “La energía solar en Cuba”, *Energía y tú*, 12(2): 34-45, 2014, ISSN: 1028-9925, E-ISSN: 2410-1133.
- BÖER, K.W.: “The physics of solar cells”, *Journal of Applied Physics*, 50(8): 5356-5370, 1979.
- BOER, K.W.; BHATTACHARYA, A.: “Survey of Semiconductor Physics-Vol. II: Barriers, Junctions, Surfaces and Devices”, *Medical Physics-New York-Institute of Physics*, 21(2): 327, 1994.
- DANIELS, F.: *Uso directo de la energía solar*, Ed. H. Blume, H. Blume ed., New York, USA, 1981.
- DOHERTY, M.F.; MALONE, M.F.: *Conceptual design of distillation systems*, Ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2001.
- ESPEJO MARÍN, C.: “La energía solar fotovoltaica en España”, 2004.
- GARCÍA, de L.C.J.; BOIX, O.: *Luminotecnica*, Ed. Érica, São Paulo, Brasil, 1996.
- GINLEY, D.; GREEN, M.A.; COLLINS, R.: “Solar energy conversion toward 1 terawatt”, *Mrs Bulletin*, 33(4): 355-364, 2008.
- GREEN, M.A.: “Solar cells: operating principles, technology, and system applications”, 1982.
- HARPER, G.E.: *El ABC del alumbrado y las instalaciones eléctricas en baja tensión*, Ed. Limusa, 2000.
- IQBAL, M.: *An introduction to Solar Radiation*, Ed. Academic Press, Toronto, Canada, 1983.
- JOHN, A.D.; WILLIAM, A.B.: “Solar engineering of thermal processes”, *America*, 2006.
- KREITH, F.; KREIDER, J.F.: *Principles of solar engineering*, Ed. Addison Wesley, USA, 230 p., 1978.
- MANRIQUE, J.A.: *Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas*, Ed. Harla, 1984.
- MEINEL, A.; MEINEL, B.: *Solar Energy*, Ed. Addison Wesley, New York, USA, 2013.
- MEINEL, A.B.; MEINEL, M.P.: *Aplicaciones de la energía solar*, Ed. Reverte, 1982.
- MORALES, A.: “Diseño óptimo y realización de celdas solares de silicio para producción industrial”, *Revista Mexicana de Física*, (49), 2014, ISSN: 0035-001X.
- NELSON, J.: *The physics of solar cells*, Ed. World Scientific Publishing Company, 2003.
- PCC (PARTIDO COMUNISTA DE CUBA): *Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, [en línea]*, VI Congreso del Partido Comunista de Cuba, La Habana, Cuba, 48pp., 2011, Disponible en: [http://www.cubadebate.cu/wp-content/uploads/2011/05/tabloide\\_debate\\_lineamientos.pdf](http://www.cubadebate.cu/wp-content/uploads/2011/05/tabloide_debate_lineamientos.pdf) , [Consulta: 28 de febrero de 2018].
- SHAH, A.; TORRES, P.; TSCHARNER, R.; WYRSCH, N.; KEPPNER, H.: “Photovoltaic technology: the case for thin-film solar cells”, *science*, 285(5428): 692-698, 1999.

WOLFGANG, B.K.: *Survey of Semiconductor Physics*, Springer, Oklahoma, USA, 701-719 p., 2002.

WÜRFEL, P.: *Physics of solar cells*, Ed. Wiley-vch Weinheim, vol. 1, 2005.

*Ivelisse Almanza Fundora*, profesora, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Facultad de Ciencias Técnicas, Ciego de Ávila, Cuba. Carretera a Morón km 9½, CP: 65300, Teléfono (33) 217009, Fax 5333 225768, e-mail: [ivelisse@unica.cu](mailto:ivelisse@unica.cu)

*Regla Ramona García Fernández*, e-mail: [rgarcia@unica.cu](mailto:rgarcia@unica.cu)

*Francisco García Reina*, e-mail: [pancho@unica.cu](mailto:pancho@unica.cu)

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.