



TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Parámetros comparativos de células fotoeléctricas para generación de energía: implementación de banco de pruebas usando DSP

Comparative parameters of solar cells for power generation: test stand implementation using DSP

Ramón A. - Álvarez López
Maritza A. - García Angarita

Recibido: enero de 2014

Aprobado: abril de 2014

Resumen/ Abstract

Las tecnologías utilizadas en los módulos solares se distinguen principalmente por la eficiencia de conversión energética. En consecuencia, la selección del panel fotovoltaico es determinante para el rendimiento a largo plazo de una instalación generadora fotovoltaica. Por lo cual, dicha selección debe estar soportada por resultados experimentales obtenidos bajo un entorno de operación específico. En el artículo se implementa un banco de prueba para obtener de manera experimental los parámetros característicos de un módulo solar, se analiza la eficiencia de conversión energética y otros parámetros correlacionados que inciden directamente sobre el rendimiento de un generador fotovoltaico. Los resultados obtenidos demuestran que el uso de un sistema de prototipado rápido mediante open hardware, como es el caso del kit de desarrollo TMS320F28335, permite construir fácilmente un banco de prueba de sistemas de generación fotovoltaica. Esto último, justificado por el bajo costo de dichos dispositivos y su facilidad de programación.

Palabras clave: células fotovoltaicas, DSP, propiedades eléctricas.

The technologies used in solar modules are distinguished mainly by the energy conversion efficiency. Consequently, the module selection is critic to the long term performance of photovoltaic generating facility. Therefore, the selection must be supported by experimental results obtained under a specific operation condition. The article implements an experimentally test for obtain the characteristic parameters of a solar module, we analyze the energy conversion efficiency and other correlated parameters that directly affect the performance of a photovoltaic generator. The results show that the use of a rapid prototyping system using open hardware, such as TMS320F28335 development kit makes it easy to build a test photovoltaic generation systems. Latter justified by the low cost of such devices and ease of programming.

Key words: photovoltaic cells, DSP, electrical properties.

INTRODUCCIÓN

El sector de energía solar fotovoltaica (FV) exhibe una amplia serie de nuevos desarrollos, así como nuevas perspectivas de desarrollo [1]. Uno de los principales intereses de la comunidad científica, dedicada al desarrollo de sistemas de generación fotovoltaica, es bajar los altos costos de producción y las pérdidas eléctricas de las células [2]. Con lo cual, la ingeniería de desarrollo se ve obligada a realizar la validación experimental de las diferentes tecnologías de células fotovoltaicas disponibles en el mercado, de tal manera que la selección sea realizada siguiendo las expectativas de vida útil previstas para la solución. Esto último, debido a la degradación que presentan

las células fotovoltaicas a través de los años, que de no ser tenido en cuenta puede poner en riesgo la masificación de dicha tecnología [3].

La principal dificultad que enfrenta el ingeniero desarrollador de sistemas de generación FV es obtener y validar experimentalmente los parámetros físicos de las células fotoeléctricas, en lo que corresponde a eficiencia y potencia máxima extraíble. Esto último, debido a la gran dependencia que presenta dicha tecnología respecto de las condiciones ambientales y las limitaciones presentadas por los modelos de predicción. Lo anterior conlleva la necesidad de contar con un banco de pruebas para verificar experimentalmente bajo condiciones reales de operación, los parámetros característicos de un generador fotoeléctrico. Dado que, dichos parámetros son obtenidos mediante pruebas de laboratorio basadas en variaciones de corriente, que van desde circuito abierto a cortocircuito, lo cual permite construir la curva características de corriente-voltaje y con ella la implementación del modelo eléctrico de la célula fotoeléctrica. Es claro que dicho proceso puede ser automatizado mediante un sistema de adquisición de datos por computador, que permita aplicar una variación de carga a la célula fotoeléctrica, muestrear y almacenar en memoria los datos correspondientes a las medidas de corriente y voltaje. Posterior a la digitalización de los datos, se procede entonces a graficar la curva característica de corriente-voltaje y a obtener un modelo estimado de la célula que permita predecir su comportamiento.

Dado que en la actualidad se cuenta con un sin número de herramientas basadas en sistemas embebidos, es posible pensar en la síntesis del proceso de verificación de parámetros de la célula fotoeléctrica como una tarea de relativa facilidad y bajo coste. Pero contrario a dicha disposición, es importante resaltar que a pesar de la cantidad de dispositivos programables de bajo coste disponibles en el mercado, la mayoría de ellos no cuentan con herramientas de depuración en tiempo real, que permita el prototipado rápido. En contraposición, los procesadores digitales de señales (DSP, del inglés Digital Signal Processor) ofrecen gran cantidad de recursos al diseñador y sistemas de depuración en tiempo real de gran potencia, pero conlleva un elevado coste en comparación con otros sistemas embebidos de aplicación general. Para solventar los problemas presentados por la relación beneficio-coste que presenta un DSP, la casa fabricantes de circuitos integrados Texas Instruments lanzó un kit de demostración basado en el DSP TMS320F28335, denominado "Delfino". Dicho DSP se caracteriza por presentar excelentes prestaciones y bajo coste, resultando en una gran herramienta para los ingenieros que se dedican a la implementación de sistemas de generación fotovoltaica. Teniendo en cuenta todo lo anterior, en este trabajo se presenta la implementación de un sistema para la construcción de la curva característica de celdas fotoeléctricas, basado en un DSP TMS320F28335.

El artículo está organizado como se indica a continuación: una primera parte en la cual se explican los aspectos generales sobre la medida de eficiencia y demás parámetros característicos de una célula fotoeléctrica. Posteriormente, se describe la implementación del banco de pruebas de las características físicas de una celda fotoeléctrica usando un DSP. Además se presentan los resultados obtenidos en un caso de estudio en el laboratorio y se listan las referencias bibliográficas citadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Eficiencia de conversión:

Por eficiencia de conversión (η) entiéndase la relación entre la potencia eléctrica útil de la célula (P_{MPP}) y la potencia útil de la radiación solar incidente (P_G), resultante de la superficie irradiada A y de la densidad de radiación P .

Ver ecuación (1):

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_G} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A \cdot P}$$

La potencia (P_{MPP}) será analizada a continuación, en el tópico "Curvas corriente-voltaje (IV)". La eficiencia de conversión de una célula es expresada en (%). Cuanto más alto sea su valor, tanto mejor es el aprovechamiento de la irradiación solar global disponible. Se trata de un parámetro decisivo para el rendimiento económico de una instalación generadora FV. Si la eficiencia fuese baja, se necesitará, para el mismo rendimiento, de un área irradiada mayor. Por eso, para pequeñas áreas se deben seleccionar módulos con una excelente relación entre costo y eficiencia de conversión figura 1, [4, 5].

Gráfico comparativo de la eficiencia de conversión

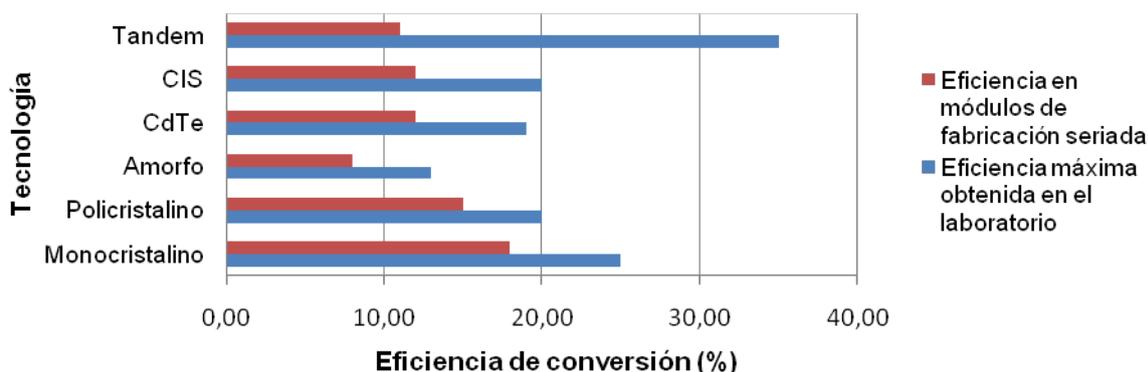


Fig. 1. Gráfico comparativo de eficiencia de conversión a Junio de 2013.

Degradación:

Todas las células solares pierden una fracción de potencia en las primeras horas en las que son expuestas a la luz, esto es debido, a las radiaciones ultra violeta (UV). En las células cristalinas, la degradación se produce después de aproximadamente 50 horas de exposición al sol. Con células amorfas este efecto se puede prolongar por unos tres meses y reducir la eficiencia de conversión en 1% a 2%. También a lo largo de toda su vida útil, las células solares continúan perdiendo potencia. Mientras tanto, las caídas en la eficiencia de conversión y la generación de energía en módulos solares pueden ser producidas por muchas causas simples, tales como polución en el vidrio de los módulos, acumulación de polvo, sombreado parcial o la sombra producida por el crecimiento de árboles y arbustos [3].

Amortización energética:

Por amortización energética se entiende el tiempo en el cual la energía producida por un generador FV alcanza la energía empleada en su fabricación. Módulos FV de película fina presentan el mejor desempeño, amortizándose en dos o tres años figura 2. Instalaciones con células policristalinas necesitan de tres a cinco años para su amortización, y aquellas con células monocristalinas requieren de cuatro a seis años. Por ello, este tiempo depende, entre otros factores, de la eficiencia de conversión energética efectiva.

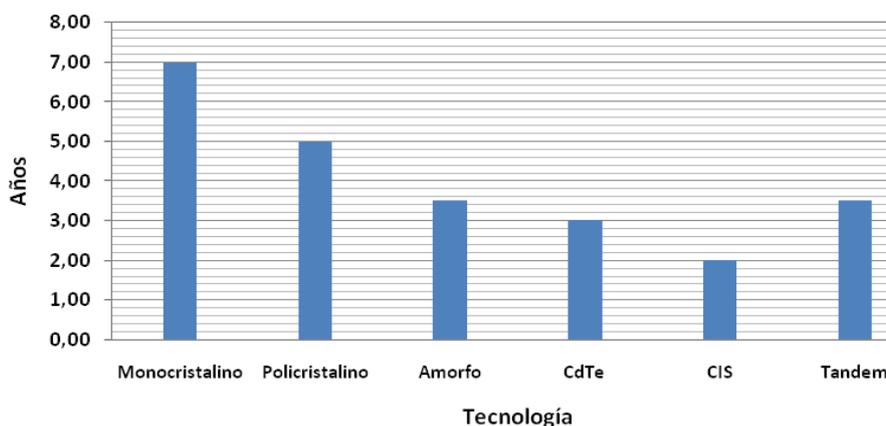


Fig. 2. Amortización energética a Junio de 2013.

Características fotoeléctricas:

Las características de las células fotoeléctricas son determinantes en la producción de energía solar optimizada sobre los aspectos técnicos y económicos. Tales características son indicadas en las especificaciones dadas por los fabricantes de los módulos. Además de la eficiencia de conversión, merecen un énfasis la temperatura nominal, la curva característica corriente-voltaje, el factor de relleno y el coeficiente de temperatura. Para posibilitar la comparación de la potencia de diversos módulos FV se utilizan condiciones de ensayo uniformes. Los datos técnicos de catálogo de las células solares se refieren siempre a condiciones normalizadas definidas. Las condiciones de ensayo internacionales estandarizadas (STC) son: 25 °C de temperatura del módulo, 1000 W/m² de irradiación solar y Air Mass (AM) de 1.5.

Esas condiciones de ensayo raramente o incluso nunca son alcanzadas a lo largo de un año de operación normal de una instalación generadora FV. Una radiación de 1 kW/m^2 no es común en las latitudes de Europa Central [5]. En operación normal sobre esa densidad Alemania ($900\text{-}1250\text{ kWh/m}^2$), Francia ($900\text{-}1650\text{ kWh/m}^2$) e España ($1200\text{-}1850\text{ kWh/m}^2$). Por el contrario, se tienen registros para países de América Latina donde se obtienen las condiciones de radiación de test, con lo cual se evidencia la necesidad de validar el comportamiento en campo de una célula fotoeléctrica [6].

El voltaje en vacío U_{OC} (del inglés open circuit, circuito abierto) y la corriente de corto circuito I_{SC} (short circuit) son parámetros determinantes que deben ser considerados en el proyecto de una instalación generadora FV.

La potencia nominal P_{MPP} o P_{Max} e los módulos FV es dada en W_p (watt pico). El término "pico" se refiere a potencia sobre condiciones de ensayo, que no corresponden directamente a aquellas de operación normal de la instalación generadora FV. No se trata tampoco de la potencia de célula o del módulo sobre radiación solar máxima figura 3, pero si es el valor de potencia bajo determinadas condiciones de radiación.

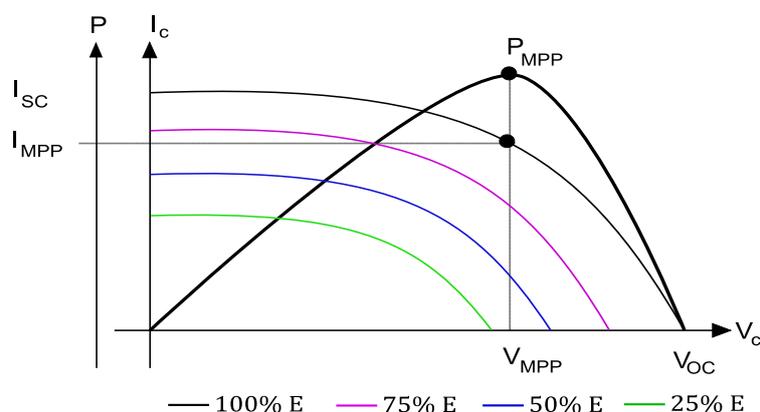


Fig. 3. Corriente y voltaje típico de una célula fotoeléctrica, en términos de la radiación nominal E.

Temperatura nominal de operación: El acrónimo inglés NOCT, de Nominal Operating Cell Temperature, designa la temperatura de la célula solar que se verifica en condiciones normales de servicio. Para lo cual, se toma como base un día normal de primavera europea, considerando una irradiación solar de 800 W/m^2 , temperatura ambiente de $20\text{ }^\circ\text{C}$, Air-Mass de 1.5 y velocidad del viento de 1 m/s . La temperatura de la célula se sitúa en general entre $45\text{ }^\circ\text{C}$ y $50\text{ }^\circ\text{C}$. Los datos numéricos anteriores pueden ser considerados como estándar mundial, pero para los de las temperaturas de la célula, debe aclararse que solo son para un día normal de la primavera europea y no para otras situaciones en nuestro planeta.

Finalmente, se debe tener presente que especialmente en días de verano, la irradiación solar y la temperatura de las células (hasta $60\text{ }^\circ\text{C}$) son más elevadas, lo que resulta en una alteración de las potencias de las células. En los ensayos de certificación de los módulos, el parámetro NOCT es medido con el voltaje en vacío figura 4.

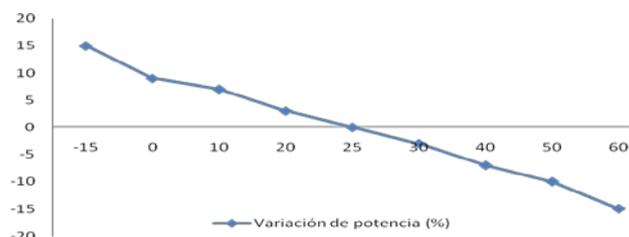


Fig. 4. Variación de potencia (kWh/m^2) en función de la temperatura de célula ($^\circ\text{C}$).

Curva corriente-voltaje (IV):

Para representar las características eléctricas y la potencia de las células solares se construyen las curvas características corriente-voltaje (curvas IV). La corriente nominal de la célula solar (I_{MPP}) es aproximadamente, un 5% inferior a la corriente de corto-circuito (I_{SC}). Puesto que el voltaje de la célula (U_{MPP}) depende del material, su valor

es un 20% inferior al voltaje en vacío, en la figura 5, se ha exagerado la representación gráfica de estos % solo para hacerlos más notorios visualmente. El punto de potencia máxima (MPP, del inglés Maximum Power Point) es el punto de operación ideal de una célula, en el cual se alcanza la potencia máxima que puede ser proporcionada, producto del voltaje por la corriente de célula figura 5. A los fabricantes le compete proporcionar las curvas corriente-voltaje para las células y módulos. Los datos son obtenidos en condiciones de laboratorio con base en parámetros definidos (STC), [7].

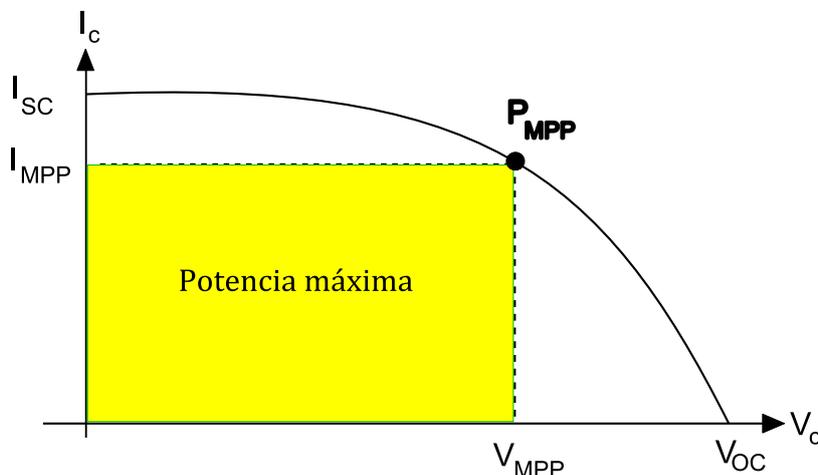


Fig. 5. Característica corriente – voltaje de una célula cristalina de silicio.

El voltaje que surge en la célula con una pequeña radiación solar y permanece entonces casi constante. La corriente de corto-circuito se comporta proporcionalmente a la radiación, una característica de los materiales semiconductores como el silicio figura 6.

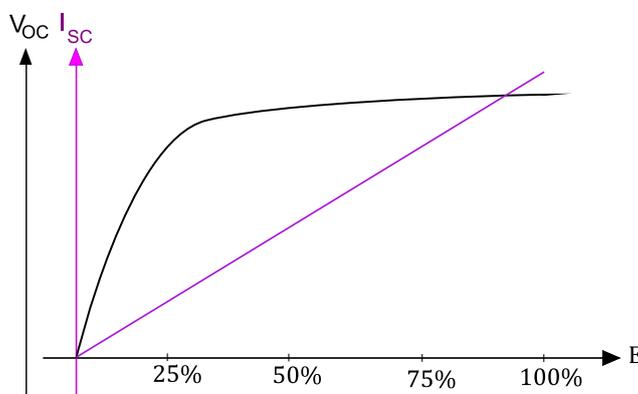


Fig. 6. Curva característica de corriente de cortocircuito y voltaje en vacío en función de la radiación E en W/m^2 .

Con el fin de que las células solares puedan entregar su potencia máxima, la carga alimentada debe ser ajustada de modo que el punto de operación se localice siempre en el Punto de Potencia Máxima (MPP). Ese ajuste debe ser efectuado regularmente, dado que el MPP se desajusta constantemente en función de la radiación solar y de la temperatura de la célula. En general, esa tarea de ajuste es realizada por el rastreador (MPP-Tracker) o regulador integrado en el inversor. En generadores FV conectados a red, la regulación de MPP se procesa a través del inversor, cuyo voltaje continuo (U_{cc}) de entrada es ajustado al voltaje de servicio ideal por medio de resistores.

Factor de relleno: La calidad de una célula solar puede ser deducida de la curva característica corriente-voltaje, y es expresada por el factor de relleno (FF, del inglés Fill Factor): ecuación (2).

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \text{ o } FF = \frac{P_{MPP}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2)$$

Ilustrado en la figura 7, el factor de relleno describe la relación entre el área rectangular de la potencia en el Punto de Máxima Potencia (MPP) y la mayor área ideal resultante del producto de la corriente de corto-circuito I_{SC} por el voltaje en vacío, o voltaje de circuito abierto U_{OC} .

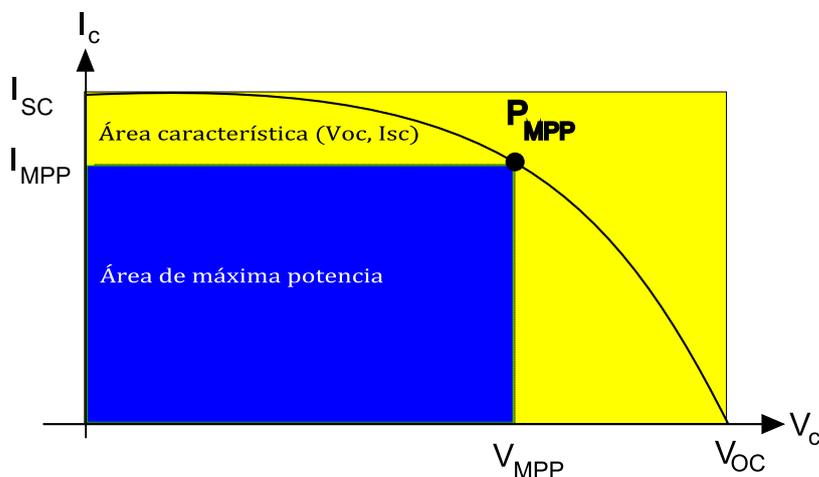


Fig. 7. El factor de llenado muestra la relación entre las áreas rectangulares definidas por (V_{oc}, I_{sc}) y (V_{MPP}, I_{MPP}) .

Cuanto más alto es el factor de relleno, tanto mejor es la calidad de la célula solar. Valores típicos están comprendidos entre 0.7 – 0.85 para células solares cristalinas y 0.5 – 0.7 para células amorfas.

Coefficiente de temperatura:

Al seleccionar un tipo de montaje de módulos, los coeficientes de temperatura (T_F) son decisivos. Dado que, para efectos de una mejor comparación, los módulos son evaluados conforme a parámetros estandarizados, según los cuales la temperatura considerada es de 25 °C. El voltaje, la corriente, y por tanto, la potencia de una célula solar dependen de la temperatura de la célula. El coeficiente de temperatura indica en cuanto el voltaje en vacío, la corriente de corto-circuito, la potencia y la eficiencia de conversión de una célula se reducen ante un incremento de temperatura.

Se admite un valor del orden de ≤ 0.5 %/K. Cuanto más próximo de cero se encuentre este valor, mejor es el desempeño en cuanto a temperatura. El coeficiente de temperatura es dado en (%) o en (V) referido a 1K o 1 °C, como diferencia con respecto a la temperatura de referencia. En módulos cristalinos el coeficiente de temperatura es de cerca de -0.45 %/K. Módulos de película fina presentan un valores debajo de -0.2 %/K. Como en las células cristalinas el coeficiente de temperatura negativo es comparativamente alto, se recomienda ventilación suficiente en la parte posterior. Experiencias demostraron que un incremento de apenas 5 cm en la distancia entre el generador FV y la superficie de cobertura o el techo posibilita un rendimiento de 2 % a 3 % mayor.

RESULTADOS

La implementación del banco de pruebas para la verificación de parámetros de la célula fotoeléctrica, se realiza siguiendo la metodología propuesta en [8], adicionando el DSP TMS320F28335 como herramienta de adquisición de corriente y voltaje. En la figura 8, se ilustra el diagrama esquemático del banco de prueba, el cual consta de un reflector LED (LED Lamp) con su respectivo regulador de intensidad lumínica (Regulator of the lighting), encargado de generar una irradiación de prueba. Cuenta además con un medidor de Lux (Luxmeter) para estimar la radiación aplicada a la célula fotovoltaica. Finalmente, la medida de corriente es realizada a través del circuito integrado de medio puente BTS 7960, el cual incluye un amplificador de instrumentación de ganancia configurable.

Las medidas de corriente y tensión son fácilmente digitalizadas a través de dos entradas analógicas del DSP, el cual puede ser fácilmente programado a través de Matlab/Simulink, usando la Toolbox "Embedded Coder – Embedded Targets" y la librería "Processor", accediendo a los módulos de la familia Texas Instruments C2000. Una vez diseñado el diagrama de bloques para la adquisición-almacenamiento en memoria y con la configuración apropiada de parámetros de simulación, en los cual se indica al Embedded Coder la tarjeta con la cual se trabajando, se puede generar el código de programación del sistema embebido. Es válido indicar, que el código generado con Simulink

debe ser importado desde la consola del software Code Composer Studio (CCS) de Texas Instruments, para posteriormente realizar la programación y depuración en tiempo real del DSP.

Otra forma fácil de realizar la programación del DSP, es accediendo a la coltrolSUITE gratuita que acompaña el kit de desarrollo de la familia C2000 y utilizar el ejemplo "Example_2833xAdcSoc" que se encuentra en el directorio "ti\controlSUITE\device_support\c2834x\v112\DSP2834x_examples_ccsv4\adc_soc". Dicho ejemplo puede ser importado desde el CCS y depurado para leer directamente valores análogos de voltajes conectados a las entradas A3 y A4 del DSP.

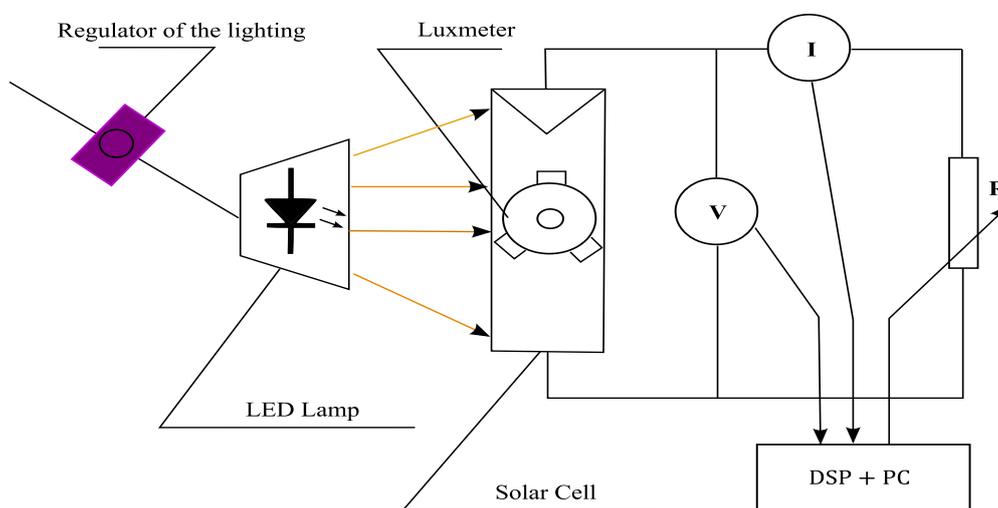


Fig. 8. Banco de pruebas.

Una vez implementado el esquema de la figura 8 y programado el DSP, se procede a verificar el proceso de adquisición, el cual debe contar con el sincronismo de la resistencia variada R y los sensores. Lo anterior, con el objeto de hacer un barrido desde la corriente de corto circuito y de circuito abierto. Los datos deben ser almacenados en un vector de memoria, para posteriormente ser graficados utilizando la herramienta incluida por el Code Composer Studio, denominada "Tool-Graph". Una vez graficados los datos pueden ser exportados como un archivo de datos y analizados mediante una hoja de cálculo.

La figura 9, muestra las características de corriente-voltaje (a) y potencia-voltaje (b), obtenidas experimentalmente usando el banco de prueba descrito en el presente trabajo. Se puede apreciar, que las respuestas obtenidas experimentalmente se corresponden con lo esperado, resultando de gran apoyo a la hora de diseñar una instalación de generación fotoeléctrica residencial. A partir de las características experimentales de las células fotoeléctricas, se puede caracterizar su comportamiento, obtener un modelo parametrizado que permita definir la potencia total instalada y evaluar el rendimiento. La implementación del banco de pruebas brinda un gran soporte al ingeniero diseñador de sistemas de generación fotovoltaica y permite predecir su comportamiento desde el punto de vista de eficiencia de conversión.

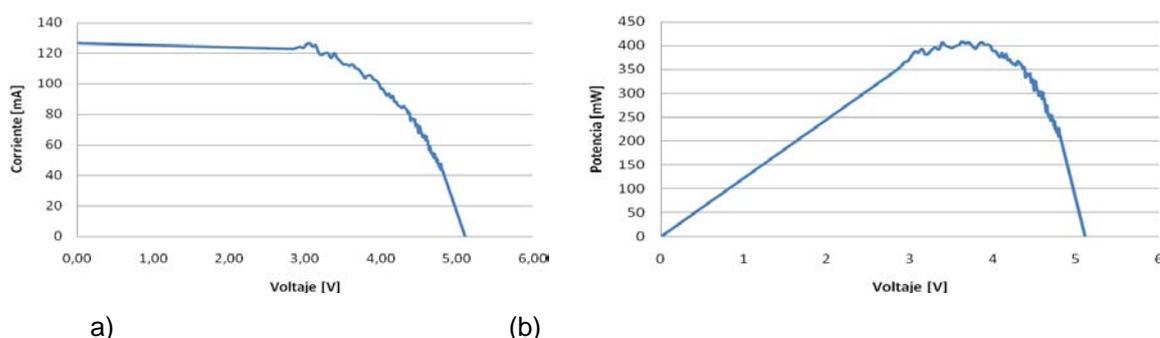


Fig. 9. Medida experimental de la característica. (a) Corriente-voltaje y (b) potencia-voltaje.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La figura 10, permite comprobar que a través de equipos básicos de laboratorio de electrónica y componentes de fácil adquisición, se puede implementar un banco de prueba de células fotoeléctricas, facilitando así, la labor investigativa de un innovador. De igual forma, el hecho de contar con una herramienta de verificación de las características de generación de una célula fotoeléctrica, propicia el uso de estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y promueve el uso eficiente de dicha tecnología. Todo lo anterior teniendo en cuenta que muchos desarrolladores con poca experiencia deciden usar la generación fotovoltaica de forma alternativa, pero por desconocimiento del comportamiento físico de la misma, no optimizan el aprovechamiento del recurso.

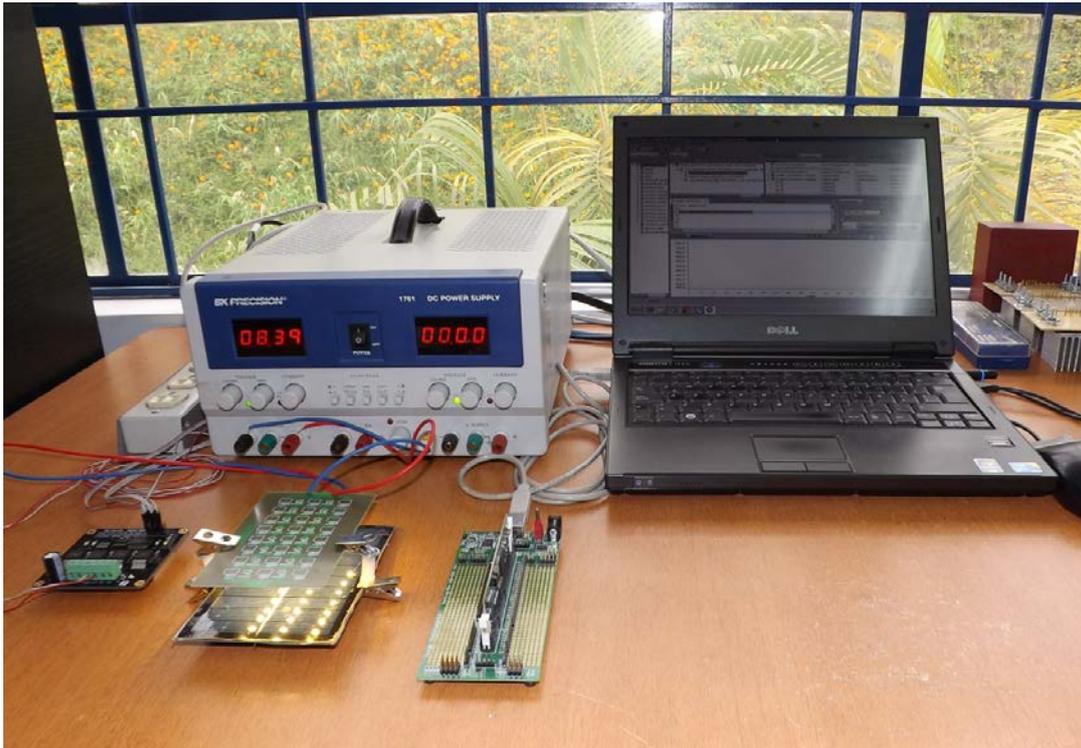


Fig. 10. Fotografía del Banco de pruebas.

CONCLUSIONES

Los parámetros fundamentales de las células solares para generación fotovoltaica fueron examinados, haciendo énfasis en la eficiencia de conversión, la curva característica corriente-voltaje, el factor de llenado y la temperatura de las células. Se han expuesto las principales implicaciones técnicas y económicas de los parámetros de rendimiento de un generador FV.

Por otra parte, se describe la implementación alternativa y fácil de un banco de pruebas para obtener la curva característica de corriente-voltaje para una célula fotoeléctrica. Adicionalmente, se presentaron resultados experimentales de la medida de las características de una celda, haciendo énfasis en las ventajas que presenta la herramienta de automatización del proceso de adquisición, basado en DSP TMS320F28335.

REFERENCIAS

- [1]. EUROPEAN COMMISSION PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY "Development and current research". [en línea], 2009, [Consultado: 25 Oct. 2013], Disponible en: <http://europa.eu>.
- [2]. EUROPEAN COMMISSION. "A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology". [en línea], 2011, [Consultado: 25 October 2013], Disponible en: <http://www.eupvplatform.org/publications/strategic-researchagenda-implementation-plan.html>.
- [3]. SIDRACH DE CARDONA, M.; *et al.* "Degradación de módulos fotovoltaicos de silicio cristalino tras 12 años de operación en España". En : *IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES)*, Cusco, 2010, [en línea], Disponible en: http://perusolar.org/17-spes-taller-2/Sidrach_Mariano/Sidrach_mariano.pdf.
- [4]. HUNTER FANNEY, A.; *et al.* "Comparison of Photovoltaic Module Performance Measurements. *Transactions of the ASME*", 2006, [en línea], [Consultado mayo 2013], vol. 128, n. 0199-6231, DOI: 10.1115/1.2192559, Disponible en: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build05/PDF/b05047.pdf>, ISSN 1087-1357.
- [5]. BONHAGEN, S. "Parámetros comparativos de células fotovoltaicas para generación de energía". *Eletricidad Moderna*, 2013, [en línea], [Consultado: 25 October 2013], Disponible en: http://www.arandanet.com.br/midiaonline/eletricidade_moderna.
- [6]. BUENO PEREIRA, E.; *et al.* "Atlas Brasileiro de Energia Solar". 2006, [en línea], [Consultado: 25 October 2013], Disponible en : http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf.
- [7]. LÓPEZ LAPEÑA, O.; *et al.* "Closed-Loop punto de máxima potencia del perseguidor para Subwatt Fotovoltaica Paneles. *Industrial Electrónica*", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [en línea]. [Consultado: October 2013] DOI 10.1109/TIE.2011.2161254. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.unal.edu.co/Xplore/home.jsp>, ISSN 0278-0046.
- [8]. DOBRZANSKI, L.A.; WOSINSKA, L.; *et al.* "Comparison of electrical characteristics of silicon solar cells". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, [en línea] vol. 18, n. 1-2, DOI 17348412. Disponible en: http://www.journalamme.org/papers_amme06/1306.pdf, ISSN 1734-8412.

AUTORES

Ramón Antonio Álvarez-López

Ingeniero Electrónico, Profesor Asistente de la Universidad de Sucre, Colombia, Estudiante de doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Manizales-Caldas, Colombia.

e-mail: ramon.alvarez@unisucre.edu.co; raaalvarezlop@unal.edu.co

Maritza Andrea García-Angarita

Ingeniera Electrónica, Magíster en ingeniería de software, Instituto Técnico Industrial Pascual Bravo, Medellín-Antioquia, Colombia.

e-mail: magangarita@gmail.com