

## **DISEÑO DE DISPOSITIVO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

M. Ordóñez, M. Bartolomeo, D. Barrera  
Grupo de Estudios Sobre Energía (GESE) UTN Facultad Regional Córdoba  
Av. Cruz Roja Arg. esq. Maestro Lopez, Ciudad Univ – 5016 Córdoba

P. Galimberti, J. Barral  
Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nacional N° 36- Km. 601 – 5800 Río Cuarto - Córdoba  
Tel. 0358-4676488 – Fax 0358-4676246 e-mail: pgalimberti@ing.unrc.edu.ar

**RESUMEN:** Se realizó el diseño y construcción de un dispositivo electrónico ideado especialmente para obtener la característica tensión-corriente en módulos fotovoltaicos. El desarrollo se orientó a obtener una herramienta portátil de diagnóstico para el montaje y mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas. El dispositivo se basa en un microcontrolador, que desarrolla la medición de la característica tensión corriente de los módulos fotovoltaicos en forma automática. Los resultados de esta medición son comunicados a una PC, que se utiliza como elemento de visualización gráfica e interfaz con el usuario.

**Palabras clave:** Energía Solar, módulos fotovoltaicos, ensayos.

### **INTRODUCCION**

Los módulos son el elemento esencial de los sistemas fotovoltaicos, y se caracterizan por su robustez, durabilidad y confiabilidad. Estas características están relacionadas directamente con el alto grado de normalización alcanzado en torno al mismo. Existen ensayos que abarcan distintos aspectos tendientes a caracterizar el comportamiento de los módulos como dispositivo de conversión de energía y comprobar su resistencia ante los fenómenos climáticos a los que están expuestos durante su utilización. No obstante, no se detiene la investigación para desarrollar nuevos procedimientos y dispositivos de ensayos (King et al. 1998; Durisch et al. 2001; Hoyos et al. 2006).

El ensayo más difundido que se realiza a los módulos es la obtención de la gráfica corriente tensión. La misma determina entre otros parámetros que caracterizan al generador, la potencia eléctrica máxima que entrega el dispositivo funcionando en condiciones normales. La importancia de este ensayo radica en que por medio del mismo se puede determinar la potencia del módulo operando en condiciones normales. Este parámetro sirve para comparar los distintos dispositivos y en definitiva define la capacidad de los mismos para realizar la conversión fotovoltaica de energía.

Por otra parte, para el ensamblado de los módulos, es preciso realizar la medición de las características corriente tensión sobre cada celda, con el propósito de descartar las celdas defectuosas y clasificar las mismas para lograr un mejor acoplamiento en los arreglos serie o paralelo y de esa manera optimizar la utilización de las mismas. De igual forma, durante el montaje de paneles es conveniente agrupar módulos con características corriente tensión idénticas para evitar las pérdidas de acoplamiento. Por último la característica corriente tensión se utiliza para detectar rápidamente la existencia de fallas en los dispositivos generadores.

El presente trabajo presenta el diseño de un dispositivo, que llamamos “trazador”, para realizar la determinación de la curva corriente tensión en experiencias de campo, para ser utilizado como una herramienta de diagnóstico durante la reparación o el montaje de sistemas fotovoltaicos. Ya se han desarrollado otros dispositivos semejantes, pero están orientados fundamentalmente al trabajo de laboratorio, su costo es elevado, y no resultan portátiles.

Numerosas normas indican como se debe realizar el ensayo bajo condiciones controladas a los efectos de determinar con precisión los parámetros del módulo. En el ámbito nacional podemos citar las normas IRAM - Instituto Argentino de Normalización e IEC -International Electrotechnical Comisión a nivel internacional (IEC, 1993; IRAM, 1998).

El diseño propuesto no pretende ajustarse estrictamente a estas normas, por lo contrario, se realizan algunas simplificaciones del sistema para mejorar su portabilidad y facilidad de manejo. Sin embargo, a los efectos de poder comprender como repercuten las mismas en la calidad de la medición realizada resulta de utilidad estudiar lo planteado en la normativa para ser adoptado como marco referencial.

A continuación se presentan algunas consideraciones sobre la normativa que tratan el ensayo para obtener la característica I-V, seguidamente se analizan distintas simplificaciones realizadas en el dispositivo diseñado con respecto a lo planteado en las normas, luego se muestra el diseño obtenido, con algunos resultados experimentales y conclusiones.

## ANÁLISIS DE LAS NORMAS Y LAS MODIFICACIONES INTRODUCIDAS

Existe gran similitud entre las normas para la determinación de la característica corriente tensión de los módulos fotovoltaicos para uso terrestre. El procedimiento consiste en someter al módulo a una irradiancia de características definidas, fijando su temperatura en un valor determinado, mientras con el mismo se alimenta una carga resistiva variable entre cero e infinito y, simultáneamente, se miden los valores de corriente suministrada y tensión entre bornes.

Cuando por razones climáticas o de infraestructura no se pueden lograr las condiciones normales de Irradiancia y temperatura de celda, las normas establecen un método de corrección para referir los valores de corrientes y tensiones medidos a las condiciones adoptadas por convención.

Las mayores controversias se ocasionan debido al comportamiento selectivo de las celdas ante la radiación y la variación de la composición espectral de la radiación solar bajo la atmósfera (Carr et al. 2004; Chivelet, 2000). Otras situaciones problemáticas se presentan al considerar el comportamiento direccional de las celdas ante la radiación y las alteraciones ocasionadas por las variaciones en la irradiancia y temperatura de celda.

Los problemas ocasionados por el comportamiento selectivo de las celdas solares se resuelven adoptando como instrumento para la determinación de la radiación una celda fotovoltaica patrón que posea una respuesta espectral idéntica a la del módulo bajo ensayo.

Se define a  $1000 \text{ W/m}^2$  como valor de irradiancia normal para el ensayo de los módulos y por medio de tablas se fija la composición espectral de la misma. Estas tablas se han confeccionado de tal forma que caracterizan la composición espectral de la radiación solar en una condición representativa del funcionamiento medio de los módulos fotovoltaicos. Por ejemplo la norma IEC 904-3 define la irradiancia espectral de referencia como la radiación total (directa más difusa) correspondiente a una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , con una masa de aire de 1,5, sobre una superficie inclinada  $37^\circ$  con respecto al plano horizontal, con un albedo del terreno de 0,2, contenido de agua en la atmósfera 1,42 cm, contenido de ozono en la atmósfera 0,34 cm, y turbidez de 0,27 a  $0,5 \mu\text{m}$ .

Las celdas patrón se calibran bajo las condiciones normalizadas de irradiancia y temperatura. Luego, el comportamiento del módulo se releva por comparación con la celda patrón y los resultados se refieren a las condiciones normales por correcciones sobre las tensiones y corrientes medidas. Esta corrección se realiza mediante correlaciones que determinan los valores de las variables de interés bajo condiciones normales tomando como punto de partida los valores medidos con niveles de temperatura e irradiancia distintos a los de referencia.

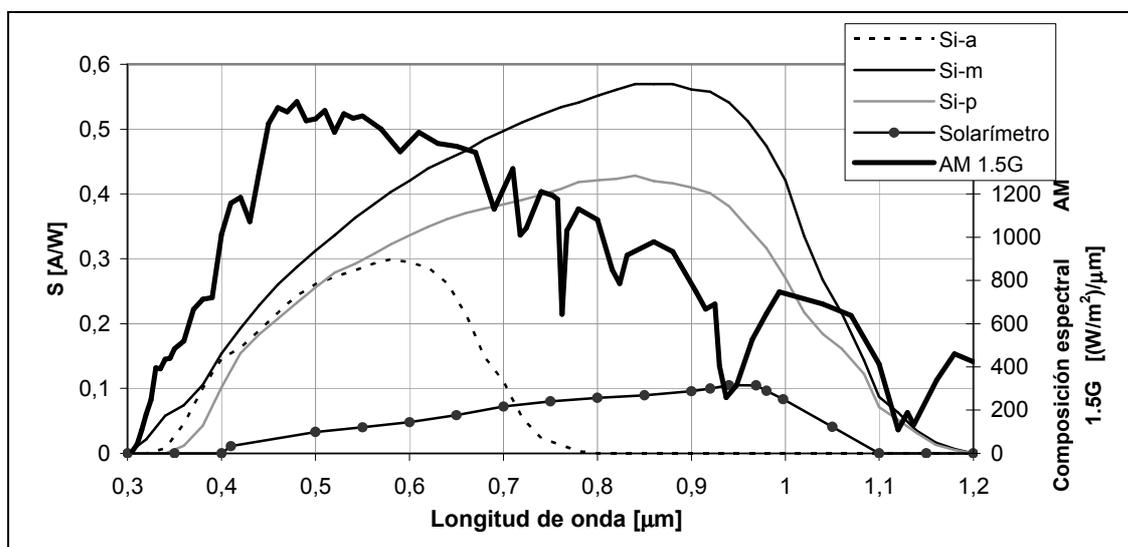


Figura 1: gráfico de comparación de la respuesta espectral típica de distintas celdas fotovoltaicas (Si-a: silicio amorfo, Si-p: silicio policristalino, Si-m: silicio monocristalino) y el solarímetro utilizado. La línea gruesa representa la composición espectral normalizada AM 1.5G.

En el diseño desarrollado, la modificación de mayor relevancia con respecto a lo planteado por norma es el reemplazo de la celda patrón por un solarímetro montado en forma coplanar con el dispositivo bajo ensayo. Se adoptó para esta función un piranómetro LI-200SA de la empresa Li-Cor. El elemento sensible de este solarímetro es una celda fotovoltaica cuya característica espectral no coincide necesariamente con la de los módulos a ensayar. En la figura 1 se muestra la respuesta espectral típica para las tecnologías fotovoltaicas más difundidas comparadas con la del sensor de radiación utilizado. Asimismo, se grafica la composición espectral de la radiación AM 1.5 G en el rango donde los dispositivos anteriores son sensibles. Tomando como base al modelo espectral de radiación solar desarrollado por Richard Bird (Bird,1984) se pudo determinar que para niveles de radiación natural superiores a los  $600 \text{ W/m}^2$ , el error debido al comportamiento espectral disímil puede encontrarse en el orden del 2 % en el caso más desfavorable, es decir el silicio amorfo.

## DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO ELECTRÓNICO

El elemento esencial del dispositivo diseñado es un microprocesador instrumentado para medir y almacenar los valores de corriente y tensión a los bornes del módulo mientras se modifican estos parámetros mediante la variación en forma automática de una carga electrónica. En forma simultánea se miden temperatura e irradiancia en la superficie del módulo. Los datos obtenidos son transmitidos a la PC por conexión RS-232 o pueden ser almacenados en una memoria externa para su posterior procesamiento.

La figura 2 muestra un diagrama en bloques del dispositivo propuesto y cuenta con los siguientes componentes:

- microcontrolador responsable del control de la carga electrónica, la conversión A/D y la comunicación con una PC,
- carga electrónica controlable compuesta por una fuente de corriente controlada desde el microprocesador por medio de un filtro activo,
- etapa de medición y adaptación de señal compuesta por sensores para medir las distintas variables de interés con el correspondiente tratamiento de señal según los casos.

El microcontrolador desarrolla tres tareas principales: Comunicación bidireccional con la PC, control de la Fuente de Corriente y muestreo de los parámetros medidos por los transductores. El mismo contiene un núcleo procesador de 8-bit y 8K de memoria de programa, módulo de PWM - pulse-width modulation, convertor analógico-digital y módulo de comunicación serie USART- Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter. La resolución del convertor analógico digital es de 10-bit, sin dejar de mencionar que la referencia de tensión para el convertor es realizada con un circuito integrado de precisión de bajo costo.

El microcontrolador contiene una rutina de software que se encarga de controlar la fuente de corriente y realizar la adquisición de datos provenientes de las mediciones. La rutina de medición consiste básicamente en excitar la fuente de corriente para que extraiga corriente del panel obteniendo en forma secuencial distintos puntos desde circuito abierto hasta corriente de corto circuito y simultáneamente tomar muestras de todos los parámetros.

Estas muestras son transmitidas en tiempo real a la PC y son graficadas en pantalla y guardadas en disco en un archivo, simplificando la tarea de documentación de los resultados. El tipo de comunicación con la PC empleado es serial RS-232 por su simpleza y compatibilidad.

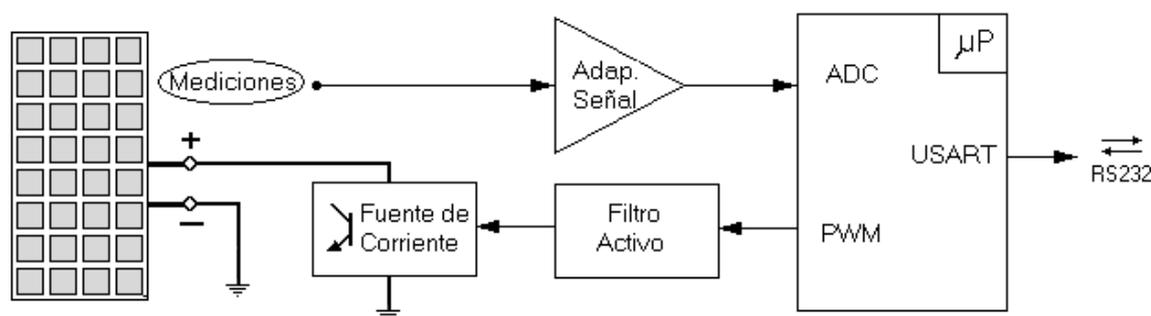


Figura 2: Diagrama en bloques del hardware.

Como se mencionó anteriormente, la fuente de corriente controlada actúa como una carga resistiva variable que puede ser llevada desde circuito abierto hasta corto circuito, disipando la potencia extraída del panel en forma de calor. Para este fin, un disipador de calor forma parte del diseño de la etapa de potencia.

Un aspecto crítico a tener en cuenta es la resolución de la referencia para la fuente de corriente, ya que la curva característica del panel presenta una región de corriente casi constante con una leve pendiente. Para este fin, se utilizó la combinación de una modulación de PWM filtrada montada en 4 niveles de cuantificación que generan una referencia de corriente de 5120 valores discretos superando 11-bits de resolución. Finalmente, la fuente de corriente es realizada con transistores bipolares operando en la región lineal por un pequeño intervalo de tiempo conservando el criterio de un diseño compacto y robusto.

Las mediciones son realizadas con transductores de temperatura, radiación y shunt de corriente; luego son adaptadas con amplificadores operacionales de bajo offset a los niveles de tensión de entrada del convertor analógico digital del microcontrolador.

La temperatura del panel es medida con un sensor AD590 de dos terminales que transforma la temperatura en una corriente proporcional. Este dispositivo es apropiado para mediciones remotas ya que es insensible a variaciones en la tensión de alimentación y proporciona una salida de corriente con inmunidad a perturbaciones. En adición, no es

necesario proporcionar circuitos de compensación o de linealización. El dispositivo es ubicado en el panel con sus terminales aislados y es conectado eléctricamente en serie con la tensión de alimentación y una resistencia de precisión en el circuito impreso para producir la tensión que es posteriormente adaptada con un amplificador operacional. La tensión de salida del panel es adaptada preliminarmente con un divisor resistivo de resistencias de precisión.

La corriente de salida del panel es medida en la resistencia shunt de la fuente de corriente. La precisión de esta medición depende de la deriva térmica de la resistencia shunt que puede ser realizada con diversos materiales con coeficientes casi constantes a bajas temperaturas de operación. El piranómetro proporciona una corriente proporcional a la radiación recibida y es convertida a tensión en una resistencia de precisión.

Todas las variables son posteriormente adaptadas por amplificadores operacionales que están insertados en zócalos. El layout del circuito impreso permite insertar en los zócalos diferentes familias de amplificadores operacionales de baja corriente de polarización y bajo offset, permitiendo flexibilidad en la selección del amplificador operacional por un criterio de costo y linealidad deseada. A efectos de lograr una adaptación de precisión que cumpla con los criterios de instrumentación portátil se selecciono el amplificador operacional OP 296 de Analog Devices. Las siguientes características lo hacen apropiado para este propósito: Tensiones de entrada y salida Rail-to-Rail, bajo consumo, alimentación simple de 3 a 12V y bajo offset (300uV max). Finalmente, filtros antialiasing son empleados en las entradas del microcontrolador donde se realiza la conversión analógica digital con 10 bits de resolución. La figura 3 muestra un diagrama conceptual de lo expuesto.

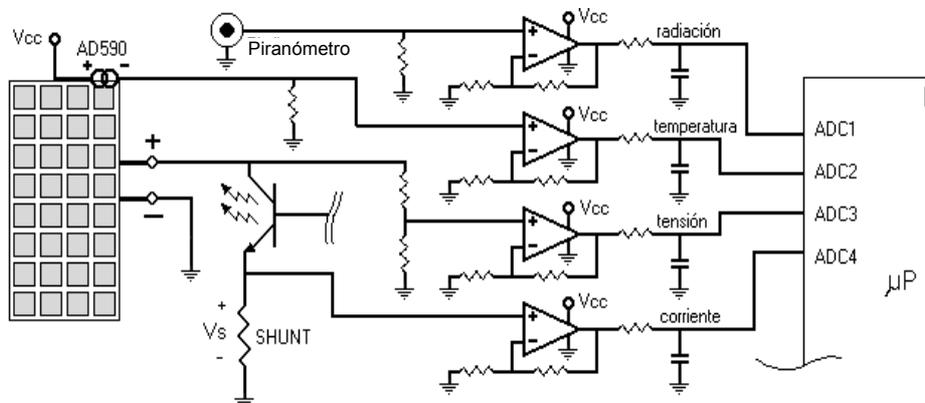


Figura 3: Diagrama conceptual de medición y adaptación de señales.

El dispositivo está montado físicamente en dos secciones, la primera compuesta por el microcontrolador y el acondicionamiento de señales y la segunda sección contiene la fuente de corriente controlada. La figura 4 muestra el aspecto del montaje de ambos conjuntos. En la parte posterior-izquierda se destaca la fuente de corriente con sus dos transistores de potencia montados en un dissipador de calor. La figura muestra también el dispositivo de visualización y la conexión para RS-232. Ambas secciones se montan en un gabinete plástico de pequeñas dimensiones.

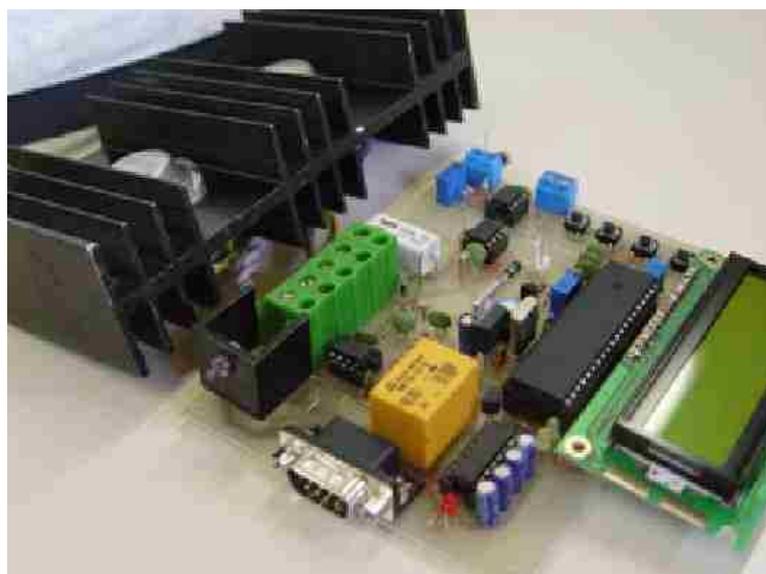


Figura 4: Fotografía del prototipo realizado mostrando aspectos de ambas secciones.

## DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

La interfaz usuario fue realizada enteramente bajo entorno Windows por razones de compatibilidad y puede ser utilizado en cualquier PC con procesador Pentium II (equivalente) o mayor. La Figura 5 muestra la pantalla principal de la interfaz usuarios y contiene las siguientes funciones:

- Trazador de curva: Realiza el trazado de la curva característica I-V y de Potencia en tiempo real enviando un comando al microcontrolador el cual se encarga de controlar la fuente de corriente y realizar las tareas de adquisición de datos y transmisión hacia la PC.
- Control del módulo de carga (fuente corriente): Esta función envía un comando al microcontrolador para modificar el valor de referencia de la fuente de corriente que esta conectada al panel solar como carga. Esto permite al usuario desplazarse por toda la curva característica del panel en tiempo real. Una recta con un cursor indican la posición actual sobre la curva característica. El cursor circular de la Fig. 3 muestra el punto de máxima potencia.
- Mediciones: Pone en pantalla los valores de los parámetros medidos y parámetros calculados derivados de los medidos.

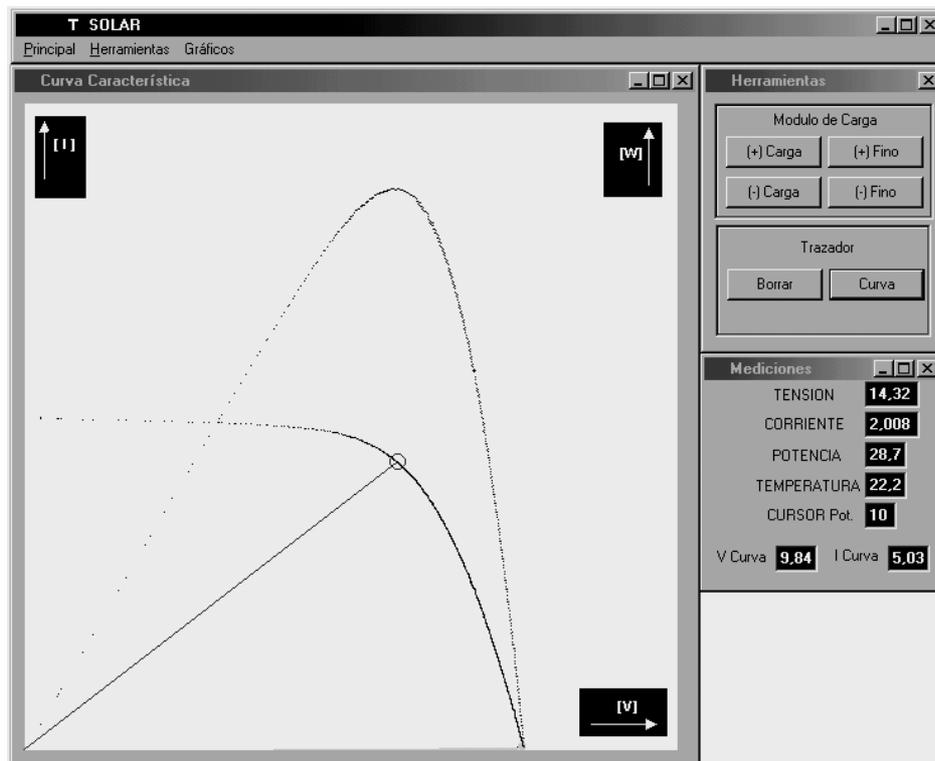


Figura 5: Pantalla principal de la interfaz usuario.

## CONTRASTACIÓN

A los efectos de comparar los resultados obtenidos mediante la utilización del dispositivo diseñado con respecto a mediciones realizadas con instrumental de laboratorio se utilizó una unidad adquisidora de datos 34970A de Agilent dotado de una placa 34901A de múltiples canales conectado a una PC. Se constató que las medidas provistas por el trazador tienen una precisión aceptable mientras que la exactitud es comparable con otros equipamientos comercializados a mayor precio. Particularmente se observó alta repetibilidad en la medición de corriente y tensión de máxima potencia donde el error porcentual es inferior al 3 % para los módulos de potencia superiores a 30 Wp. En los módulos de menor potencia el error porcentual en las medidas de corriente es algo mayor.

En la figura 6 se puede observar una gráfica los valores medidos mediante el instrumental de laboratorio y el trazador para un caso determinado. Se debe observar, gracias a una escala de corriente ampliada sobre el eje vertical, la discretización de los valores tomados por el trazador, producto de la conversión analógico-digital del microprocesador.

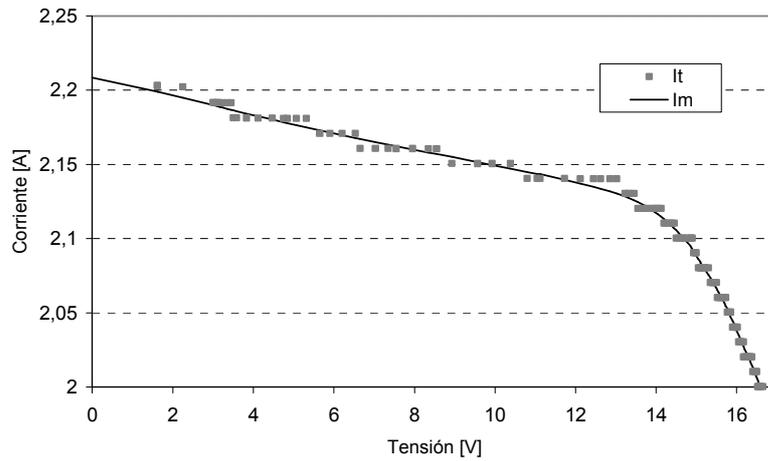


Figura 6: Gráfico de escala ampliada en corriente para tensiones bajas. Característica tensión-corriente tomadas mediante el trazador (It) comparada con una medición realizada con un sistema de adquisición de datos alta precisión (Im).

De igual manera, en la figura 7 se muestra los efectos de la digitalización de la medición en lo que respecta a las tensiones, en el trozo de característica cercano a la zona de circuito abierto. La figura 8 muestra los valores del error en la medición de corriente para los distintos valores de tensión.

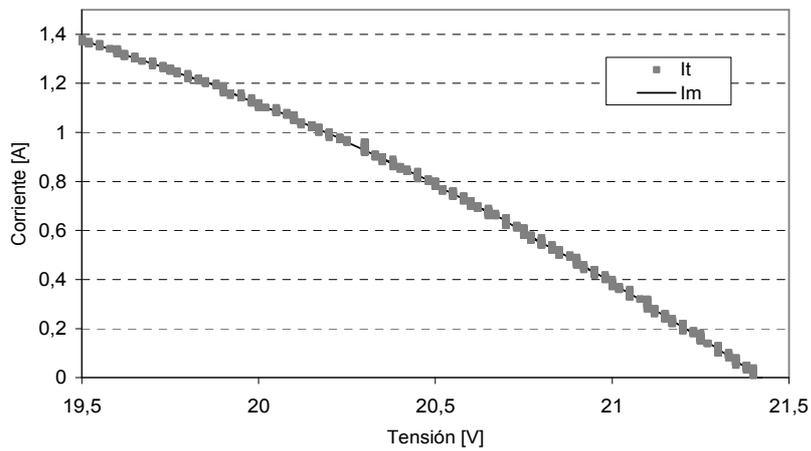


Figura 7: Gráfico de escala ampliada en tensiones altas para la característica tensión-corriente tomadas mediante el trazador comparada con una medición realizada con un sistema de adquisición de datos alta precisión.

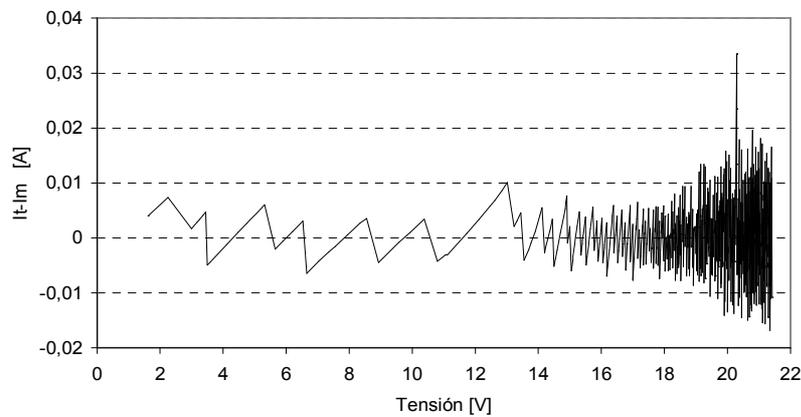


Figura 8: Gráfico del error de corriente para distintas tensiones. Se adopta como valor verdadero del mensurando a la medición realizada con el sistema de adquisición de datos alta precisión.

## CONCLUSIONES

Como resultado del desarrollo se ha obtenido dispositivo para el trazado de la característica corriente tensión de módulos fotovoltaicos que tiene las siguientes características:

- Ante la realización de contrastaciones realizadas bajo condiciones de laboratorio se constató que las medidas provistas por el trazador constan de gran precisión mientras que la exactitud es comparable con otros equipamientos comercializados a mayor precio. Particularmente se observó alta repetibilidad en la medición de corriente y tensión de máxima potencia donde los errores porcentuales no superan el 3 % para los módulos de potencia superiores a 30 WP. En los módulos de menor potencia el error porcentual en las medidas de corriente es algo mayor.
- Realiza la medición en forma totalmente automática. Pudiendo programarse el tiempo o las condiciones de radiación que actúen como disparador del suceso.
- Se adapta perfectamente al uso portátil ya que todo el sistema está montado en un único gabinete compacto de pequeño tamaño y peso. Por otra parte, la alimentación se realiza por medio de batería (9V ANSI-1604A o IEC 6LR61). En forma adicional puede realizar la medición sin la conexión a PC y luego descargar los datos así obtenidos.
- Con algunas modificaciones puede adaptarse al uso en laboratorio. El sistema puede adecuarse perfectamente a la señal de salida de una celda solar de referencia que posea un control de temperatura y de esta forma se mejora la exactitud del sistema.
- Como resultado de la medición entrega los valores de los parámetros característicos del módulo en las condiciones de radiación y temperatura reinantes durante el ensayo y además los parámetros referidos a las condiciones nominales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional en colaboración con el grupo de energía solar de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto y fue subsidiado por ambas instituciones universitarias.

## REFERENCIAS

- Bird, R. (1984) A simple solar spectral model for direct normal and diffuse horizontal Irradiance, *Solar Energy* 32, 461-471
- Carr, A. and Pryor L. (2004) A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates, *Solar Energy* 76, 285-294.
- Chivelet, N. M. (2000) Estudios de la influencia de la reflexión, el ángulo de incidencia y la distribución espectral de la radiación solar en los generadores fotovoltaicos. 1ª edición, pp. 82-94. Editorial Ciemat. España..
- Durisch W. Struss O. Robert K. (2000) Efficiency of selected photovoltaic modules under varying climatic conditions. WREC 2000 Brighton UK.
- Hoyos, D; Montero, M; Bárcena, H; Cadena, C; Farfán, R (2006). Sistema de medida automatizado y de bajo costo para caracterización de módulos fotovoltaicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 10. 04-47 a 04-51.
- Instituto Argentino de Normalización (1998). IRAM 210013-2 - Módulos fotovoltaicos. Características eléctricas en condiciones normalizadas. Photovoltaic modules. Method for determining current-voltage characteristics.
- International Electrotechnical Commission (1993) -IEC 61215 (1993-04) Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval.
- King D.L., Kratochvil J.A., Boyson W.E., and Bower W.I. (1998) Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 6-10 July 1998, Vienna, Austria.

**ABSTRACT** - The design and construction of an electronic device dreamt up specially to obtain the characteristic current-tension in photovoltaic modules were accomplished. Development himself I guide to get an easily portable tool from diagnosis for the set-up and maintenance of photovoltaic facilities. The device is based on a microprocessed module, that develops the tasks of measurement of the parameters that intervene in the determination of characteristic current-tension of photovoltaic modules in automatic form. The results of this measurement are communicated to a PC that is utilized like element of visualization numerical and graph.

**Keywords:** Solar Energy, photovoltaic modules, test.