



RELEVADOR PORTÁTIL DE CURVAS I-V PARA ARREGLOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

V. Toranzos¹, A. Busso², L. Vera², C. Cadena³.

² G.E.R – Grupo en Energías Renovables – FaCENA – UNNE

Campus Libertad – Av. Libertad 5460 – 3400 Corrientes

Tel: +54 3783 473931 int. 129 / Fax: +54 3783 473930/ e.mail: ajbusso@exa.unne.edu.ar

³ INENCO – CONICET - UNSa.

RESUMEN: El presente trabajo muestra un sistema portátil para relevamiento *in situ* de curvas I-V para arreglos de paneles fotovoltaicos. Se describe la electrónica utilizada, modelo eléctrico de celda fotovoltaica utilizado para trasladar datos experimentales para las condiciones estándares de temperatura y radiación solar, funcionalidades del programa de control y análisis y se presentan resultados preliminares obtenidos con el prototipo. En relación a los valores reportados por el fabricante, las diferencias obtenidas para los diversos parámetros característicos del panel ensayado son menores al 10%, error que se encuentra dentro de la tolerancia especificada por los fabricantes y considerado aceptable por tratarse de un equipo para medición de campo. Se concluye que estos errores podrían acotarse mediante una mejor calibración de los sensores empleados, especialmente el sensor de radiación solar.

Palabras clave: panel solar, curvas I-V, generación fotovoltaica.

INTRODUCCIÓN

Las zonas rurales del país han sufrido un cambio considerable en los últimos años debido a la existencia de programas especiales para la instalación de sistemas de generación eléctrica fotovoltaica. El contexto de crisis energética que vive el país, hace que sea previsible que el mercado en cuestión siga creciendo en virtud de las bondades relativas de estos sistemas de generación: ser autónomos, requerir mantenimiento mínimo, posibilidad de escalabilidad, entre otras.

En este marco, como parte del PERMER (Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales), en la provincia de Corrientes se instalaron 85 escuelas rurales, con sistemas de generación fotovoltaica con potencias de generación pico entre los 400 W_p a 1500 W_p, dependiendo de las necesidades de cada establecimiento. Estos sistemas han sido diseñados para generar en 24V (corriente continua) DC y suministrar a la instalación interna de la escuela, inversor mediante, tensión de red de 220 V y una frecuencia de 50 Hz. En virtud de esto, los bancos de generación están compuestos por arreglos serie-paralelo de colectores de 50 W_p, cada uno, en número suficiente para alcanzar la potencia deseada. Como dato general, para este proyecto particular, se han empleado 1300 paneles de 50 W_p, 61 de los cuales han sido ensayados individualmente en el laboratorio del INTEC, mostrando responder a los valores reportados por el fabricante. No obstante ello, el comportamiento en campo del conjunto instalado no ha sido aún medido por la falta de herramientas apropiadas que permitan hacerlo de manera simple, rápida y confiable.

En términos generales, los paneles fotovoltaicos son sometidos individualmente a ensayos bajo condiciones controladas y estandarizadas de temperatura (25°C) y radiación (1000 W/m²), según lo especificado en las normas correspondientes. De esta forma, el fabricante garantiza, para cada panel, determinados valores de corriente de corto circuito (I_{cc}), tensión de circuito abierto (V_{oc}), potencia pico (P_p), entre otros. Además se dispone de la curva I-V y de potencia del panel, las que nos brindan información sobre el comportamiento del dispositivo frente a diferentes situaciones de funcionamiento. Teniendo en cuenta las condiciones del lugar de instalación (temperatura ambiente, irradiación, etc.), estos datos son utilizados luego para el dimensionamiento de sistemas compuestos por arreglos de paneles individuales.

A pesar de manejar datos de laboratorio y adecuarlos a la realidad local, una de las cuestiones principales es ¿cómo se comportará el arreglo de paneles en su lugar de destino?, ¿Responderá el conjunto de la manera esperada bajo situaciones de trabajo?.

Para responder estas cuestiones existen dos cursos de acción, 1) monitorear a lo largo de un período de tiempo en forma continua los parámetros operativos del sistema instalado, 2) realizar ensayos *in situ*^{10,11} del banco de colectores levantando su curva I-V. Cada alternativa tiene sus ventajas y desventajas.

Por un lado, monitorear implica instalar equipamiento de medición y registro en el lugar de emplazamiento, desplazamiento de personal para recolección de datos, etc., con todas las complicaciones y costos asociados. Los resultados que se obtienen de esta manera permiten visualizar de manera detallada el comportamiento dinámico del conjunto de paneles bajo situaciones de operación real. Por otro lado, el ensayo *in situ*^{1,2,3,4} resulta simple y económico de implementar y brindaría información sobre la capacidad de generación del SF bajo situaciones reales de operación. De esta forma, este método permite detectar inmediatamente, posibles problemas tanto del conjunto como de alguno de sus componentes, convirtiéndose en un

¹ Becario SeCyt-CONICET

herramienta de análisis y diagnóstico muy útil para la operación y mantenimiento del SFA. Con el equipamiento adecuado, esta información puede ser obtenida de manera rápida, eficiente y confiable, mostrando los resultados en el momento del ensayo o trazado de la curva I-V.

El presente trabajo, surgió debido a que el GER – Grupo en Energías Renovables de la FaCENA – UNNE, tiene la responsabilidad de realizar las tareas de operación y mantenimiento de los SFA instalados en las 85 escuelas de la provincia de Corrientes. La necesidad de contar con una herramienta de análisis y diagnóstico simple, rápida y confiable para facilitar estas actividades, mediante la detección de problemas en el sistema de generación a través del relevamiento *in situ* de curvas I-V derivó en el desarrollo de la unidad descrita en este trabajo.

DESCRIPCIÓN TÉCNICA

El Relevador de curvas I-V puede dividirse en 4 etapas para su correspondiente análisis:

PC Y PROGRAMA:

Como interface entre la unidad de medición y el usuario se utiliza una computadora personal, de escritorio o portátil. Esta interface permite visualizar, procesar y almacenar los datos obtenidos. El módulo de medición se conecta a la PC a través del puerto serie con un conector DB9 o del puerto USB mediante un conversor USB/serie.

La Figura 1 muestra la interface grafica principal del programa de control. Este programa fue realizado utilizando el software Visual Basic 6.0 y permite entre otras cosas: auto escalar los ejes de tensión y corriente o ingresar manualmente los máximos de escala (V_{max} – I_{max}), establecer el número de puntos que conformaran la curva I-V a levantar, ingresar la configuración del banco de paneles a ensayar (N_s : número de paneles en serie; N_p : número de paneles en paralelo), ingresar manualmente el valor de temperatura del panel (temperatura $^{\circ}C$) y el valor de la radiación solar (Radiación W/m^2) al momento de la medición. Como alternativa, el programa admite el registro de estas variables de manera automática mediante sensores utilizados a tal efecto. Es apropiado mencionar en este punto, que el programa se encuentra en etapa de desarrollo por lo que las ventanas mostradas en el trabajo son a modo de referencia y de ningún modo definitivas o terminadas.

Como sensor de temperatura se utiliza un termistor¹² calibrado en un intervalo entre $0-85^{\circ}C$. Para la radiación solar se emplea una celda fotovoltaica que fue calibrada frente a otra de respuesta conocida. La visualización de los datos obtenidos durante la medición se realiza en tiempo real y los puntos levantados son almacenados en un archivo plano cuyo nombre y ruta son ingresados por el usuario. El programa permite determinar las resistencias serie y paralelo del modelo eléctrico equivalente de la celda fotovoltaica (Fig.4) mediante un ajuste paramétrico de los datos experimentales a la ec.[1] con R_s y R_p parámetros variables. Las curvas I-V y de potencia medidas y calculadas por el modelo son presentadas en pantalla a través de la tecla "Plot". La figura 2 muestra la interface de presentación grafica de estas curvas. Al pie de la ventana correspondiente se presenta información, tanto ingresada como resultante del ensayo, sobre el arreglo de paneles bajo estudio. Una vez obtenidos los valores de estas resistencias, el programa permite graficar la curva I-V y de potencia para condiciones estándares de medición, $1000 W/m^2$ y $25^{\circ}C$.

Dado que actualmente se está trabajando con una versión prototipo de la unidad de medición y programa de control, en la versión final se prevé que el programa disponga de una base de datos con los paneles comerciales más utilizados de forma que permita comparar estos con los datos relevados. Por otro lado, por las características de operación del módulo de medición, la unidad podrá también ser utilizada para caracterizar baterías a través de su curva de descarga.

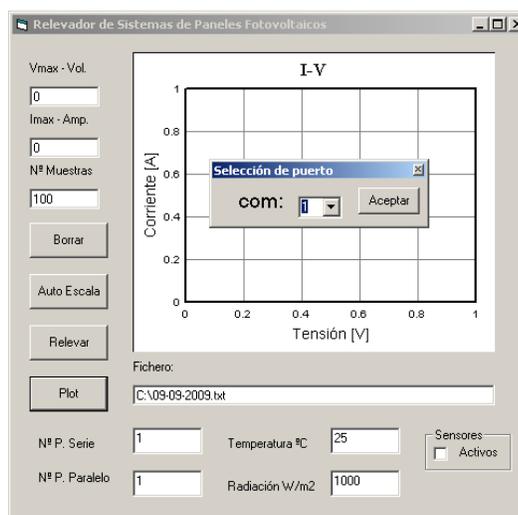


Figura 1.- Interfase gráfica del programa de control

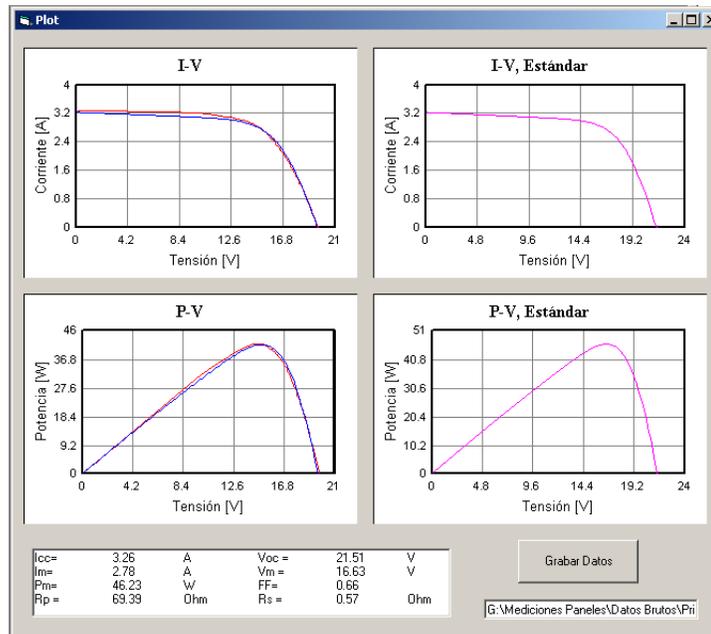


Figura 2.- Ventana de visualización de curvas I-V y de potencia resultante. Ensayo panel N°070711690.

INTERFASE DE ADQUISICIÓN Y CONTROL:

El equipo de control y adquisición se desarrolló en torno a un microcontrolador de la familia Microchip (PIC16F877)⁹, se eligió este dispositivo por incluir en su estructura los módulos de comunicaciones RS232, salida de modulación por ancho de pulso (PWM) y conversores analógico digital (ADC) de 10 bits.

El módulo de PWM se lo ocupa como convertidor digital analógico (DAC) para comandar la carga activa, mientras que los ADC se encargan de leer las señales de tensión, corriente, temperatura y radiación.

La señal medida por los sensores de temperatura y radiación es amplificada por amplificadores operacionales y sus niveles adaptados a las entradas del adquisidor cuyo rango de tensión de entrada es de 0 a 5V y 10 bits de resolución.

SENSORES:

Como sensor de radiación se utiliza una pequeña celda de silicio monocristalino acoplada a una resistencia de bajo valor, el conjunto entrega unos pocos milivoltios que son amplificados y enviados al adquisidor. Para la medición de temperatura se optó por el uso de termistores de coeficiente negativo de temperatura (NTC) debido a su pequeño tamaño y rápida respuesta. El sensor se calibró en un rango de 0-85°C. La constante de calibración determinada para ambos sensores fue introducida en el programa.

CARGA ACTIVA:

La figura 3 muestra el esquema circuital de la carga activa utilizada para levantar la curva I-V. La carga activa es la parte fundamental del sistema de medición ya que es la encargada de extraer la corriente de los paneles y permitir que los datos sean obtenidos en cada punto de la curva característica I-V.

Para el diseño de esta etapa se prestó especial consideración en los siguientes aspectos:

Disipación de Potencia: La carga activa debe ser capaz de disipar la potencia máxima del arreglo durante unos pocos segundos.

Estabilidad Térmica: Al aumentar la temperatura, los componentes activos modifican sus parámetros característicos, pudiéndose apartar del comportamiento previsto. Un buen diseño debe considerar tales derivas.

Linealidad: La corriente drenada por la carga debe ser linealmente proporcional a la tensión de control.

Posibilidad de expansión: Es deseable que pueda extenderse el rango de potencias medibles sin modificar sustancialmente el equipo.

Costo de la unidad: Para que su implementación resulte ventajosa, es de esperar que los costos del instrumento sean accesibles al instalador.

Tamaño y peso: Se pretende disponer de un equipo portátil para uso en campo. Resulta conveniente que sus dimensiones y peso no resulten inconvenientes para que lo cargue una persona.

Para cumplir con los aspectos mencionados, se determinó el uso de transistores MOSFETs los cuales pueden agruparse en paralelo. El prototipo construido utiliza diez transistores IRFZ44, cuya asociación permite obtener corrientes mayores a 10

Amperes. En posteriores mejoras al prototipo, se reemplazó los IRFZ44 por IRFP4710 debido que soportan mayor potencia y se redujo a 0.22 ohm las resistencias de surtidor (source) para disminuir la caída de tensión en la carga activa. Otra mejora importante realizada sobre el prototipo original es la inclusión de una carga óhmica la cual se conecta en paralelo (de manera automática) a la carga activa cuando se supera el umbral prefijado de corriente, de esta forma se amplía el límite de potencia del instrumento sin modificar la etapa existente.

La carga activa funciona en forma realimentada. Cada transistor de potencia, que en la Figura 3 son designados como: Q1, Q2, ..., Qn, tiene una resistencia de surtidor (source) (Fig.3- designadas como: R1, R2, ... ,Rn) quien cumple la función de distribuir la corriente homogéneamente en los transistores y shunt sobre el cual se mide la corriente que circula por cada transistor. Un sumador analógico (Fig.3- IC3) es el encargado de calcular la corriente total que toma la carga, este valor es reportado al adquisidor y simultáneamente realimenta a un comparador que permite que todo el conjunto funcione como una fuente de corriente controlada por tensión.

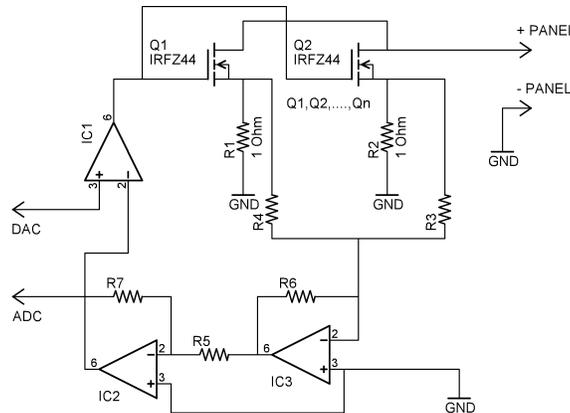


Figura 3.- Diagrama del circuito electrónico que controla de la carga activa.

MODELO DE CELDA UTILIZADO

Con el objetivo de extrapolar los datos obtenidos bajo las condiciones de campo en el momento del ensayo a radiación y temperatura estándar y seguidamente compararlas con las especificaciones del fabricante o con mediciones de laboratorio, se utilizó el circuito eléctrico equivalente de celda fotovoltaica presentado en la figura 4. Este modelo se encuentra extensamente tratado en la literatura^{7,8}. En el mismo, $I = f(V)$ está dada en forma aproximada por la ec.[1]. Se asume $R_s \ll R_p$, de forma que a circuito abierto R_s es despreciable y en corto circuito R_p puede despreciarse. R_s y R_p se determinan del ajuste paramétrico de los datos experimentales con la ec.[1].

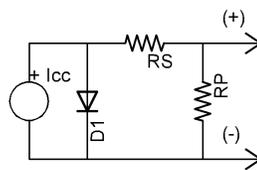


Figura 4.- Esquema del modelo eléctrico equivalente de la celda fotovoltaica

$$I = I_{CC} \times \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + I \times R_s}{m \times N \times V_t}\right) \right] - \frac{V}{R_p} \quad [1]$$

Donde:

- I_{cc} : Corriente de corto circuito.
- V_{oc} : Tensión de circuito Abierto.
- V : Tensión en bornes del panel.
- I : Corriente en bornes del panel.
- R_s : Resistencia serie asociada.
- R_p : Resistencia paralelo asociada.
- N : Número de celdas.
- V_t : 0.026 mV a 300 K, (k.T/q).
- m : Factor de idealidad del diodo ≈ 1.5

Los valores de R_p y R_s se obtienen de ajustar el modelo a la curva experimental en el punto de máxima potencia.

Dado que los ensayos son realizados a una temperatura y radiación diferentes a la estándar, para llevar el modelo propuesto a las condiciones estándares de 25°C y 1000 W/m^2 se utilizan las siguientes correcciones a los valores característicos de la ec.[1]:

$$V_{OC(25^\circ\text{C})} = V_{OC(T)} - 2,3 \times 10^{-3} [\text{V}^\circ\text{C}] \times N \times (T - 25^\circ\text{C}) \quad [2]$$

$$I_{CC(1000[\text{W/m}^2])} = I_{CC(R)} \times 1000 [\text{W/m}^2] / R \quad [3]$$

RESULTADOS EXPERIMENTALES

El funcionamiento del prototipo se probó realizando ensayos sobre módulos individuales y agrupaciones serie y paralelo de paneles, como ejemplo se presenta el ensayo del módulo serie N°070711690 de la marca *Photon Energy* y de un arreglo de 400 W_p , instalado en la escuela 867 del Departamento de San Cosme (latitud: $27^\circ 25' 50.92''\text{S}$; longitud: $58^\circ 29' 56.47''\text{O}$) en Corrientes. En la figura 5 se presentan las fotos del panel y del banco respectivamente.

Las curvas I-V y de potencia obtenidas con el adquisidor fueron presentadas en la Figuras 2, donde también se observan las graficas a 1000 W/m^2 y 25°C . La Tabla 1 compara los valores de la hoja datos del fabricante con los valores obtenidos experimentalmente y llevados a condiciones estándar de medida.

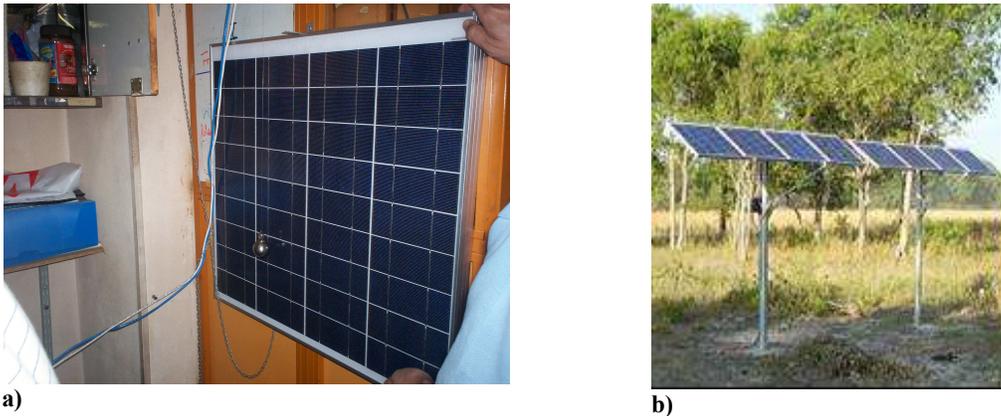


Figura 5.- a) foto del módulo 070711690 – b) foto del arreglo de paneles

070711690	V_{oc}	I_{sc}	P_{max}	V_{max}	I_{max}	FF
Hoja de datos	21.6	3.2	50	17.7	2.8	0.72
Experimental	21.51	3.26	46.23	16.63	2.78	0.66
Error absoluto	0.42%	1.87%	7.54%	6.05%	0.71%	8.33%

Tabla 1.- Comparación de datos reportados por el fabricante y los obtenidos con el adquisidor.

En referencia a las diferencias obtenidas, estos oscilan entre 0.42% y 8.33 %, dependiendo del parámetro. Estos valores pueden ser considerados aceptables por tratarse de un instrumento de campo, por otro lado la hoja de datos del fabricante acota la dispersión de sus datos a un 5 %. Un análisis de las contribuciones al error total indica que, el modelo de celda utilizado ajusta con un 5% de error a la curva experimental, el sensor de temperatura contribuye con un 3% y el de radiación solar con más de 15%. En virtud de que la mayor contribución proviene del sensor de radiación solar, se espera mejorar la calibración de este instrumento para acotar su incidencia al error total.

En las figuras 6 y 7 se exponen los resultados obtenidos al ensayar el banco de 400 W_p instalado en la escuela 867. El mismo está compuesto por un arreglo de 4x2, esto es, cuatro series de dos paneles de 50 W_p cada una interconectadas en paralelo. Cada serie contribuye con una potencia de 100 W_p al arreglo total.

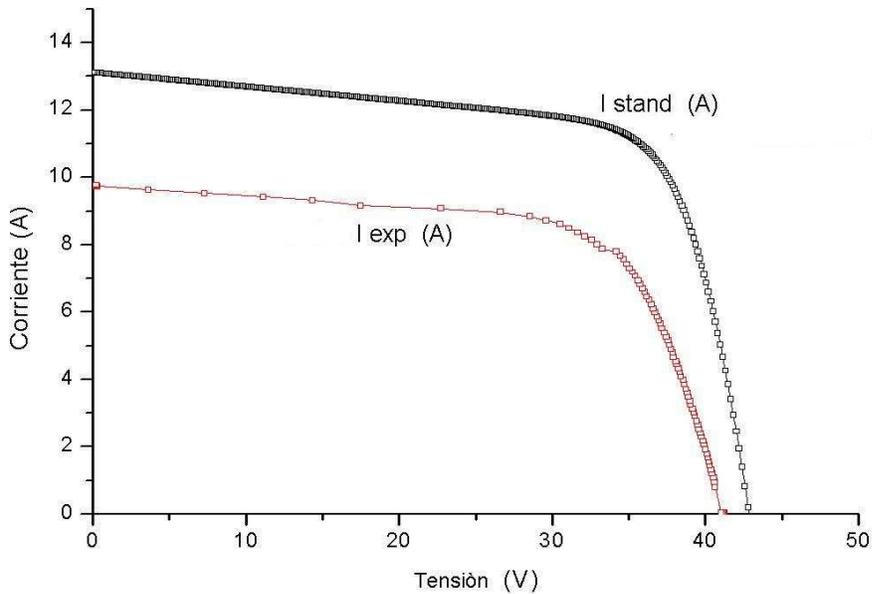


Figura 6.- Curva I-V del arreglo de paneles ensayado en la escuela 867.

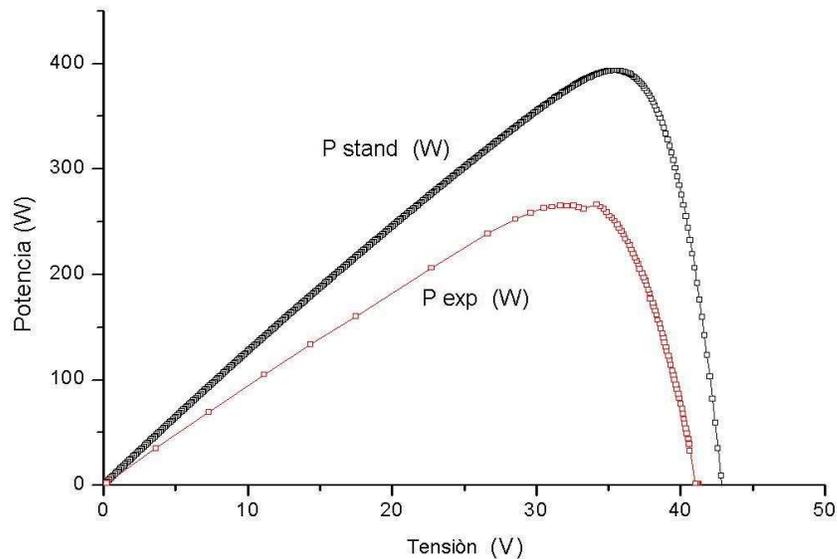


Figura 7.- Curvas de potencia del banco de panel ensayado en la escuela 867.

Al igual que en el caso del panel, las diferencias en la potencia medida respecto de la esperada por especificaciones podrían deberse a los errores propios del equipo. El defecto que se observa en las cercanías del punto de máxima potencia en las figuras 6 y 7 se debe a un ajuste incorrecto del módulo de precarga resistiva (para ampliar la escala de potencias) que se utilizó en el ensayo.

CONCLUSIONES

El equipo de adquisición de curvas I-V en desarrollo ha probado cumplir con las premisas bajo las cuales fue pensado: fácil uso, portable y confiable.

Dependiendo del parámetro medido, el ensayo de un panel y su comparación con los resultados del fabricante concuerdan con una diferencia inferior al 10%.

Como funcionalidad adicional, el programa de análisis y control permite determinar el valor de las resistencias R_s y R_p del panel. Estos parámetros pueden ser utilizados en programas de simulación de sistemas fotovoltaicos.

Como equipo pensado para su uso en campo, el mismo permite el diagnóstico y detección *in situ* de problemas en arreglos de módulos, mejorando las actividades de operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- 1.- Laboratorio de Energía Solar, GESTE - PROMEC. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS – Brasil. <http://www.solar.ufrgs.br>
- 2.- Sistema de Caracterización y Análisis de Campo de Paneles Fotovoltaicos. CIEMAT, España. www.ciemat.es
- 3.- Sistema Para la Generación Automática de Curvas I-V y P-V Monitorización de Módulos Fotovoltaicos. XXV Jornadas de Automática Ciudad Real. 8 al 10 de Septiembre. España. 2004
- 4.- Caracterización de Módulos Fotovoltaicos (2003). Revista Colombiana de Física, Volumen 35, N°1.
- 5.- Simon Roberts (1991). Solar Electricity. Prentice Hall.
- 6.- <http://www.rs485.com.ar/>
- 7.- Fred Treble (1991). Generating Electricity from the sun. Pergamon Press.
- 8.- Energía Solar Fotovoltaica (1985). Serie Mundo Electrónico. Editorial Marcombo.
- 9.- Microchip, PIC16F87X Data Sheet, 2001 Microchip Technology Inc.
- 10.- Diseño de Dispositivo para la Caracterización de Modulos Fotovoltaicos. Ordóñez, M. Bartolomeo, D. Barrera. ASADES. Vol. 11, 2007.
- 11.- Sistema de Medida Automatizado y de Bajo Costo para la Caracterización de Módulos Fotovoltaicos. Hoyos, D; Montero, M; Bárcena1, H; Cadena, C; Farfán, R. ASADES. Vol. 10, 2006.
- 12.- The NTC Thermistors, Panasonic, Technical Notes. Apr. 2008.

ABSTRACT: The present work reports the advances made in the development of a portable data acquisition system for measurement of I-V characteristics of PV arrays. The electronics used and the electric model of the PV cell are described. The electric model is employed to extrapolate experimental data to standard conditions. The features of the control and analysis software developed and preliminary results obtained with the prototype are presented. The comparison of values of characteristic parameters for a particular PV module determined experimentally with those reported by the manufacturer show a difference less than 10%, depending on the parameter. This difference can be considered acceptable for a field instrument. These errors may be further lowered by proper calibration of sensors used specially the solarimeter.

Keywords: photovoltaic module, I-V characteristic, photovoltaic generation