

TRAZADOR DE CURVAS I-V CAPACITIVO PARA CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Juan J. Stivanello^{1,2}, Gabriel Gareis¹, Javier Schmidt²

¹Laboratorio de Energías Alternativas – Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Paraná.
Av. Almafuerde 1033, 3100 Paraná, Entre Ríos

²IFIS Litoral – CONICET-UNL. Güemes 3450, 3000 Santa Fe
Tel. 0342-455 9174/77 e-mail: juan.stivanello@santafe-conicet.gov.ar

RESUMEN: Este trabajo describe el principio de funcionamiento, las características, la implementación y los primeros resultados experimentales de un trazador de curvas corriente-tensión (I-V) capacitivo. Mediante el mismo, es posible caracterizar eléctricamente módulos fotovoltaicos empleando luz solar natural y siguiendo las recomendaciones de la norma IRAM 210013-2. El equipo es simple, portable, de bajo costo y controlado por cualquier dispositivo de uso masivo que posea módulo de conexión inalámbrica. Los resultados se almacenan en una tarjeta SD para su posterior procesamiento. Se presentan resultados medidos sobre un módulo comercial.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica. Curva I-V. Ensayos normalizados. IRAM.

INTRODUCCIÓN

Las energías renovables en general, y la generación de electricidad a partir de la tecnología solar fotovoltaica (FV) en particular, han tenido un progresivo y sostenido crecimiento en los últimos años. Los números a nivel global dan cuenta de esta realidad. En el año 2020 se adicionaron 256 GW de potencia renovable, superando el récord del año anterior en aproximadamente un 30%. De esos 256 GW, 139 GW fueron de tecnología solar FV, lo cual representa más del 50% del total (REN21, 2021). A nivel nacional, si bien hasta mediados de 2021 la energía eólica lidera la potencia instalada renovable en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) con 3170 MW, la solar FV viene dando pasos concretos y ocupa el segundo lugar con 761 MW (CMMESA, 2021). En lo que respecta a generación distribuida, la cantidad de Usuarios-Generadores también viene aumentando. Al mes de marzo de 2021, alcanzan una totalidad de 4868 kW instalados y conectados a la red mediante un medidor bidireccional (Secretaría de Energía, 2021).

Frente a este escenario de crecimiento de la potencia instalada solar FV a nivel nacional, se hace necesario contar con laboratorios de ensayos fotovoltaicos que, siguiendo la normativa nacional e internacional, permitan certificar la calidad de los módulos fotovoltaicos ya sea importados o de producción nacional.

Una barrera importante para el ensayo de módulos FV en lo que respecta a su caracterización eléctrica, es la de contar con instrumentos que puedan realizar el procedimiento de trazado de curvas corriente versus tensión (I-V) ya que por lo general son costosos para los presupuestos locales.

En este trabajo se presenta una contribución que consiste en un trazador de curvas I-V capacitivo para la caracterización de módulos fotovoltaicos empleando luz solar natural. El equipo es portátil y de bajo costo y permite obtener curvas con una muy buena precisión, pudiéndose usar siguiendo las

recomendaciones de la norma IRAM 210013 Parte 2 “Determinación de las características eléctricas en condiciones de ensayo normalizadas (CEN)”.

Existen trabajos precedentes (Oliveira *et al.*, 2015; de la Casa *et al.*, 2012; Muñoz *et al.*, 2011; Muñoz *et al.*, 2006) en los que se utiliza el principio de la carga de un capacitor para el trazado de la curva característica. No obstante, el presente otorga un aporte diferente en lo que respecta a la portabilidad y simplicidad. El equipo no requiere de instrumentos externos para la medición de variables de corriente y tensión, como así tampoco para la adaptación de señal del instrumento de medición de la radiación solar.

Si bien se presenta el principio de funcionamiento, las características, la implementación y los primeros resultados experimentales, no se describen contrastaciones utilizando trazadores certificados debido a que aún no se han podido realizar. De todas formas, cabe destacar que en general los fabricantes de módulos fotovoltaicos comerciales ofrecen en sus catálogos un error de $\pm 5\%$ que permite intuir el buen funcionamiento del equipo como se verá más adelante.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO – GENERALIDADES

La caracterización eléctrica de un módulo FV permite conocer aquellos parámetros que definen su funcionamiento y que permiten determinar entre otras cosas la calidad del mismo. Estos parámetros se desprenden de la curva característica de corriente versus tensión (I-V) obtenida en condiciones de ensayo normalizadas (CEN) (o STC, Standard Test Conditions, por sus siglas en inglés) definidas por la norma IRAM 210013-2: radiación de 1000 W/m^2 , temperatura de celda de $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ y aeromasa 1,5. El fabricante los publica en la hoja de datos de cada módulo FV y es posible verificarlos si se obtiene en forma experimental la curva I-V. Los parámetros arriba nombrados se identifican como (i) corriente de cortocircuito (I_{sc}), (ii) tensión de circuito abierto (V_{oc}), (iii) tensión a potencia máxima nominal (V_{mpp}), (iv) corriente a potencia máxima nominal (I_{mpp}) y (v) potencia máxima nominal (P_{mpp}) la cual se surge del producto entre (iii) y (iv) (Fig. 1).

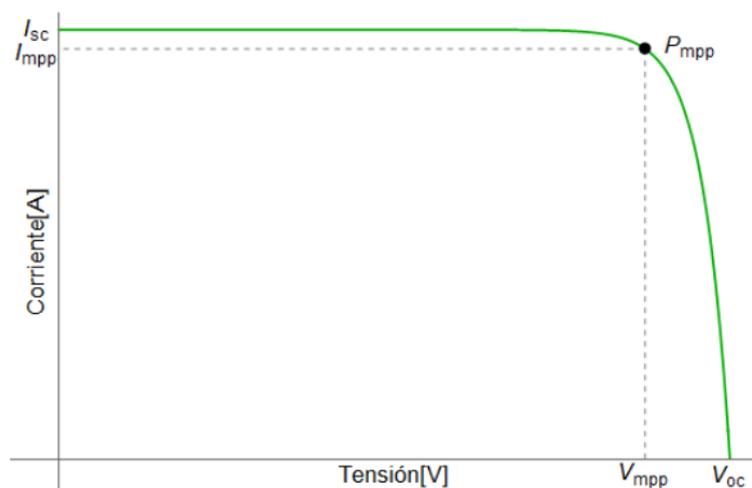


Figura 1: Curva I-V de un dispositivo fotovoltaico

Si el ensayo se realiza con la exposición del módulo FV a luz solar natural, alcanzar las condiciones de ensayo normalizadas puede resultar muy difícil. Por este motivo, la clave está en poder realizar el trazado de la curva I-V con un equipo que obtenga los valores de tensión y corriente en forma rápida y luego extrapolar a las CEN con el procedimiento establecido por la norma. Una opción es la utilización de una carga resistiva variable programable. Otra es optar por un capacitor (Fig. 2) de manera tal que la carga del mismo sea el medio para crear una impedancia variable que nos obligue a pasar por diferentes estados intermedios, con la excepción de la condición del cortocircuito para la medición de I_{sc} y circuito abierto para hacer lo propio con V_{oc} . Como se mencionó con anterioridad, existen trabajos

precedentes que explican y validan este método por lo que no se expondrán mayores detalles. Cabe agregar que en la medida en la que se miden los valores de corriente y tensión, se hace necesario tomar muestras tanto de la irradiancia solar y de temperatura del módulo bajo ensayo.

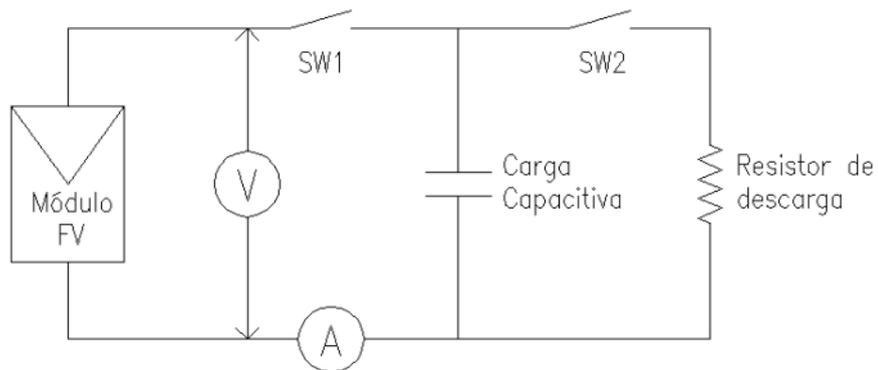


Figura 2: Circuito esquemático simplificado

CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO PROPUESTO

El circuito del trazador de curvas I-V puede dividirse en tres etapas: (i) etapa de potencia, (ii) etapa de control, medición y almacenamiento, (iii) fuente de alimentación.

Etapa de potencia: En la Figura 3 se puede apreciar la etapa de potencia. Se asocian algunos elementos comunes a la Figura 2. Cuenta con la carga capacitiva y los componentes necesarios para la medición de la corriente (R_{shunt}) y la tensión (divisor resistivo R_1 , P_1 y R_2), así como también el resistor para descargar los capacitores luego de cada medición. El circuito incluye la posibilidad de elegir entre uno o dos capacitores, según sea la potencia del módulo FV, pudiéndose medir desde pequeñas celdas de referencia con potencias menores a 10 Wp hasta módulos comerciales de más de 450 Wp, puesto que el circuito soporta corrientes de 15 A y tensiones cercanas a los 60 V.

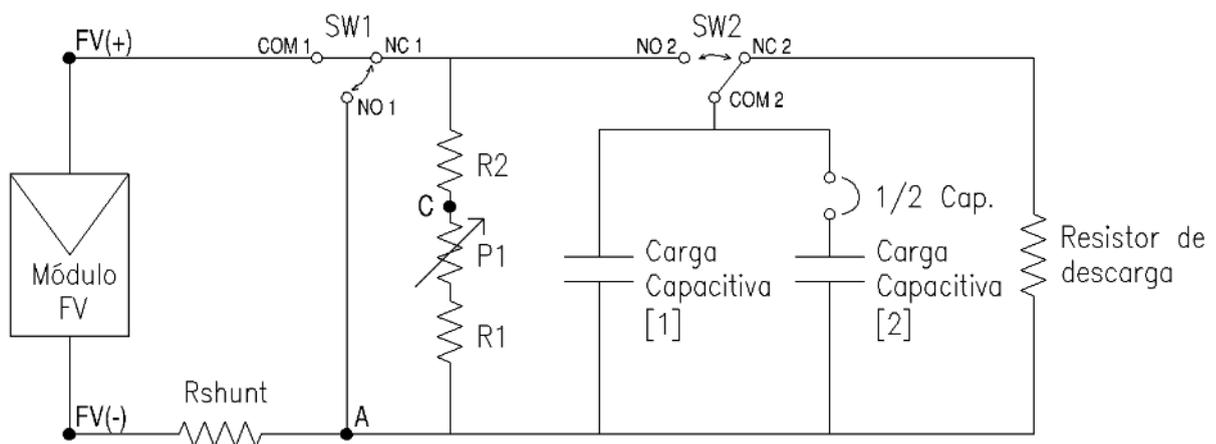


Figura 3: Circuito de la etapa de potencia

La secuencia de medición se realiza utilizando la combinación de activación de los relés SW1 y SW2 (Tabla 1). De esta forma, los parámetros característicos correspondientes a la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y a la tensión de circuito abierto (V_{oc}), para una impedancia igual a cero e infinita respectivamente, se realizan en forma independiente al proceso de carga del capacitor. En la Tabla 1 se detallan los tres estados que forman la secuencia de medición de la curva completa.

#	Medición	ESTADO	
		SW1	SW2
1	V_{oc}	NC	NC
2	I_{sc}	NO	NC
3	Curva I-V	NC	NO

Tabla 1: Combinación de SW1 y SW2 para la medición de la curva I-V

Cuando los relés SW1 y SW2 se encuentran en #1 (situación o estado de “reposo” esquematizada en la Figura 3), y dado que los valores resistivos que forman la serie R_1 , R_2 y P_1 son elevados, es factible considerar que entre los puntos A – C hay un valor proporcional a V_{oc} . Este valor es leído por un conversor analógico digital (ADC). Se opta por la utilización de un divisor resistivo que permita ajustar el valor de tensión de muestra al rango de valores del ADC. La resistencia variable P_1 se introduce a fin de poder realizar un ajuste fino de calibración de la muestra de tensión. Cabe destacar que en este estado los capacitores se descargan a través del resistor de descarga, el cual es de bajo valor resistivo y alta potencia.

Para el estado #2, el módulo FV tiene como única carga R_{shunt} , de valor resistivo muy bajo, de manera que sobre los puntos FV(-) - A hay un valor de tensión proporcional a la I_{sc} . Este valor de tensión es leído por un conversor analógico digital y traducido a corriente conociendo el valor de R_{shunt} . Es decir que, para medir la corriente, se utiliza un método de medición indirecta.

En #3, el o los capacitores se cargan a través de R_{shunt} y se pueden obtener los pares de valores corriente-tensión en los puntos FV(-) - A y A - C en forma simultánea. Como se hizo referencia en el estado anterior, la medición de corriente se realiza indirectamente. Al culminar la medición, se retorna al estado #1.

En el apartado de resultados, se hará referencia a la precisión de la medición, por lo que no se hace referencia a los eventuales errores introducidos en cada una de las etapas antes nombradas.

Etapas de control, medición y almacenamiento: En la Figura 4 se observa un diagrama de bloques de la etapa. En primer lugar, se destaca el uso del módulo ESP32, en particular el modelo más popular ESP32-WROOM-32D. El módulo cuyo corazón es el microcontrolador ESP32, es una solución de WiFi/Bluetooth integrada que facilita la conexión a una variedad de interfaces externas como Interfaz Periférica Serial (SPI), I2C, tarjetas SD entre otras.

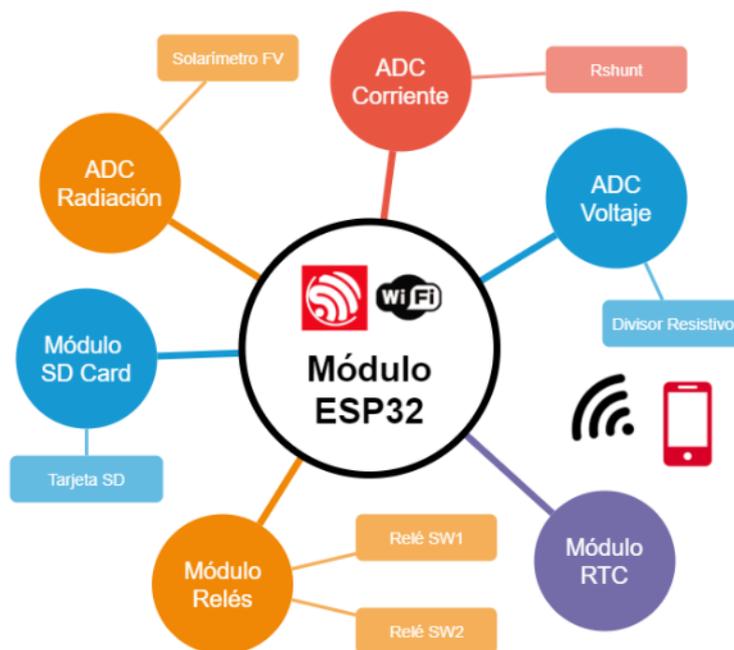


Figura 4: Diagrama de bloques de la etapa de control, medición y almacenamiento

A través de un bus I2C el ESP32 recibe los datos de tres módulos direccionables convertidor analógico digital (ADC) ADS1115 de 15 bits (más signo). Como se observa en la Figura 4, cada módulo ADC mide una variable diferente: tensión, corriente y radiación. Para este prototipo, no se incluye la posibilidad de la variable temperatura. Dado el gran abanico de instrumentos para la medición de esta variable, se ha dejado abierta la posibilidad de su medición en forma separada durante el ensayo.

Asociado al mismo bus I2C se encuentra un módulo de reloj de tiempo real (RTC, por sus siglas en inglés) que proporciona al equipo los datos de día y hora necesarios.

Para el almacenamiento de todos los datos, el equipo cuenta con un módulo para tarjetas SD. Luego de cada ensayo, el dispositivo guarda en un archivo CSV (valores separados por comas) todos los datos relevantes.

Por último, se visualiza la utilización de módulos relés doble inversor, que sirven para realizar la secuencia de medición, como se explicó con anterioridad.

Dado que el módulo ESP32 posee WiFi, dispone de un modo de configuración como Punto de Acceso (AP), es decir que el propio chip interno puede actuar como enrutador y crear su propia red inalámbrica. A través de esta funcionalidad, cualquier dispositivo puede conectarse a dicha red. Más aún, es posible utilizarlo como servidor de una página web embebida dentro del mismo chip. Esta posibilidad es aprovechada para la visualización y el control del proceso de ensayo como se verá más adelante.

Fuente de alimentación: La alimentación de todo el dispositivo se realiza a través de dos pilas de iones de litio H18650CH, de 3,6 V y 2600mAh, las cuales están dispuestas en serie. Permiten alimentar sin problemas las bobinas de los módulos relé y toda la lógica de control. Para esta última, se debe utilizar además un regulador de 5V. La fuente incluye un módulo XI4015 Step Down utilizado para la regulación y el control de la recarga de las pilas de litio a través de una fuente de corriente continua de hasta 35 V. Se incluye además una placa que administra la carga/descarga de ambas pilas en forma homogénea. La misma se conoce como BMS (Battery Management System, por sus siglas en inglés).

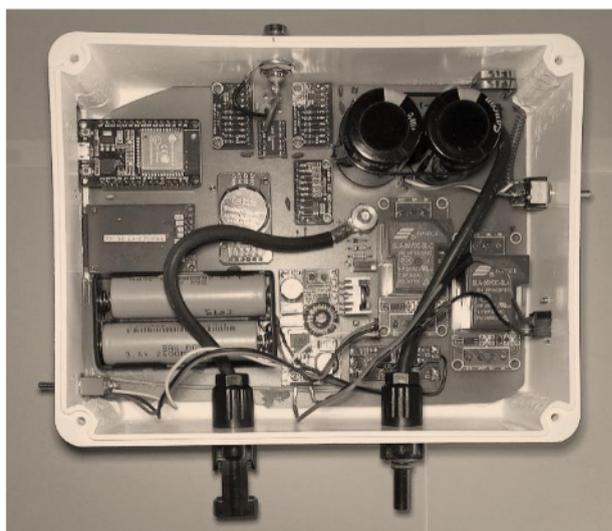


Figura 5: Fotografía de la placa del primer prototipo.

MONTAJE FÍSICO - PORTABILIDAD

Como se puede observar en la Figura 6, para el primer prototipo se utilizó sencillamente una caja estanca de PVC de 200 x 150 x 80 mm, a la cual se puede conectar fácilmente el módulo FV a ensayar mediante conectores MultiContact 4 (MC4). Para la conexión del sensor de radiación posee un conector BNC (Bayonet Neill-Concelman). Dispone además los interruptores de encendido/apagado y selección de 1/2 capacitores, así como también el conector para la fuente de carga de baterías y la

ranura para la tarjeta SD.

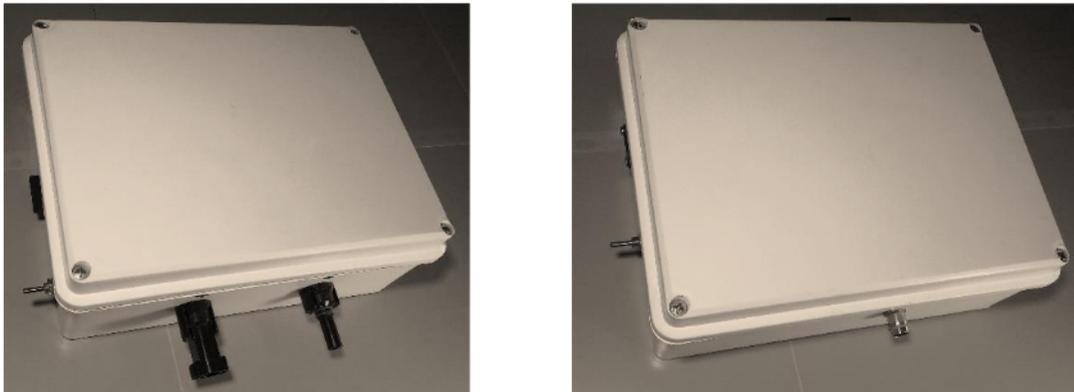


Figura 6: Montaje físico: Conexión de módulo a ensayar (izquierda) y conexión de radiómetro (derecha).

FUNCIONAMIENTO Y MODO DE USO

Al encender el dispositivo, el mismo genera una red inalámbrica a la cual es posible conectarse mediante cualquier dispositivo móvil, portátil o tableta. El proceso de conexión es simple, seleccionando la red e introduciendo la contraseña preestablecida.

Por medio de cualquier navegador web se puede levantar la página web embebida que posee el ESP32. Debido a la simplicidad de la misma y al estar programada en HTML (Hyper Text Markup Language) un lenguaje muy expandido y utilizado, cualquier navegador puede interpretarla sin mayores inconvenientes. Esto se realiza tipeando la dirección IP establecida que, para el caso del detalle de la Figura 7 será 192.168.4.1. El navegador muestra la página de inicio mediante la cual es posible configurar los datos del radiómetro utilizado, la fecha y hora, los datos característicos del módulo bajo ensayo y el valor de la capacitancia (según se usen uno o dos capacitores).

192.168.4.1	192.168.4.1/modulofv
<h3>TRAZADOR DE CURVAS IV</h3> <hr/> <h4>PARÁMETROS ACTUALES</h4> <hr/> <p>Generales: Fecha: 7/7/21 Capacitancia [mF]: 10.00 Cantidad Muestras: 250</p> <p>Radiómetro: Fabricante: Genérico Modelo: Genérico K Radiómetro [$\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$]: 11.21</p> <p>Módulo FV: Fabricante: Genérico Modelo: QPE60PS Serial Number: C3QF5A0954 Potencia [Wp]: 260.00</p> <p>Variables Actuales: Voltaje Radiómetro [mV]: 0.930 Radiación [W/m^2]: 82 Tensión de Entrada [V]: 0.01</p> <hr/> <h4>CONFIGURACIÓN</h4> <p><input type="button" value="Radiómetro"/> <input type="button" value="Fecha y Hora"/> <input type="button" value="Módulo FV"/> <input type="button" value="Capacitancia"/> <input type="button" value="Medir Icc"/></p> <p><input type="button" value="Ensayo"/></p>	<h3>TRAZADOR DE CURVAS IV</h3> <hr/> <h4>CARACTERÍSTICAS DEL MODULO FV A ENSAYAR</h4> <hr/> <p>Características Generales: Fabricante: <input type="text" value="Genérico"/> Tecnología Celda: <input type="text" value="Poly"/> Modelo: <input type="text" value="QPE60PS"/> Serial Number: <input type="text" value="C3QF5A0954"/></p> <p>Datos eléctricos Condiciones STC: Potencia [Wp]: <input type="text" value="260.00"/> Vmpp [V]: <input type="text" value="30.30"/> Voc [V]: <input type="text" value="37.70"/> Impp [A]: <input type="text" value="0.58"/> Isc [A]: <input type="text" value="8.95"/> Eficiencia [%]: <input type="text" value="0.00"/></p> <p>Características Térmicas: TC Isc (α): <input type="text" value="0.059"/> [%/°C] TC Voc (β): <input type="text" value="-0.365"/> [%/°C]</p> <p>Constantes Corrección: Rserie [Ω]: <input type="text" value="2.162"/> K [$1/^\circ\text{C A}$]: <input type="text" value="0.00125"/></p> <p><input type="button" value="Guardar"/></p> <p><input type="button" value="Volver"/></p>

Figura 7: Interfaz web del trazador I-V: Página de inicio (izquierda) y configuración del módulo a ensayar (derecha).

Una vez configurados todos los parámetros necesarios, conectado el módulo FV y el radiómetro es

posible realizar el ensayo siguiendo las recomendaciones de la norma IRAM 210013-2. Para el ingreso del dato de temperatura, la interfaz web dispone de una casilla para tal fin en el paso previo a la orden del trazado de la curva. Vale aclarar que tanto la visualización como el control se realiza desde el dispositivo con el cual se levanta la página web embebida, es decir, no se requiere de ningún otro elemento adicional.

Inmediatamente después de la obtención de la curva, la interfaz web arroja una vista preliminar (Fig. 8), de manera tal de tener una primera aproximación para así saber si se debe volver a realizar otro trazado.

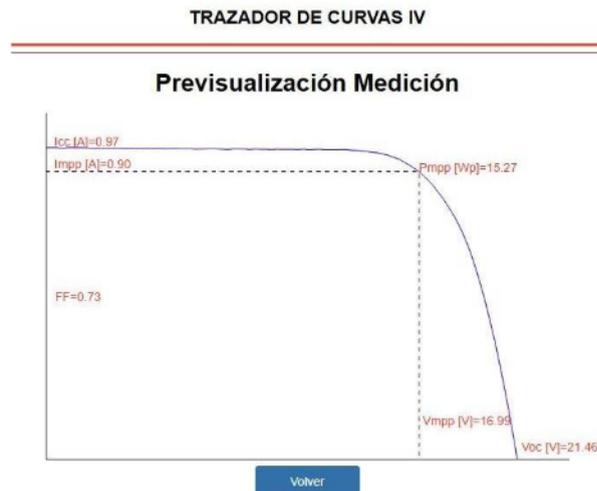


Figura 8: Ejemplo de previsualización de la curva I-V para un ensayo.

VISUALIZACIÓN DE DATOS: RESULTADOS

Como se describió precedentemente, el dispositivo guarda en un archivo CSV todos los datos relevantes del ensayo realizado para su posterior procesamiento. En la Figura 9, se observa un ejemplo para un módulo ensayado en el mes de febrero de 2021. Las curvas fueron graficadas en base a los valores medidos y a los corregidos. En lo que se refiere a la corrección, ésta la realiza el equipo internamente siguiendo el procedimiento sugerido por la norma IRAM 210013-2 en su Anexo A.

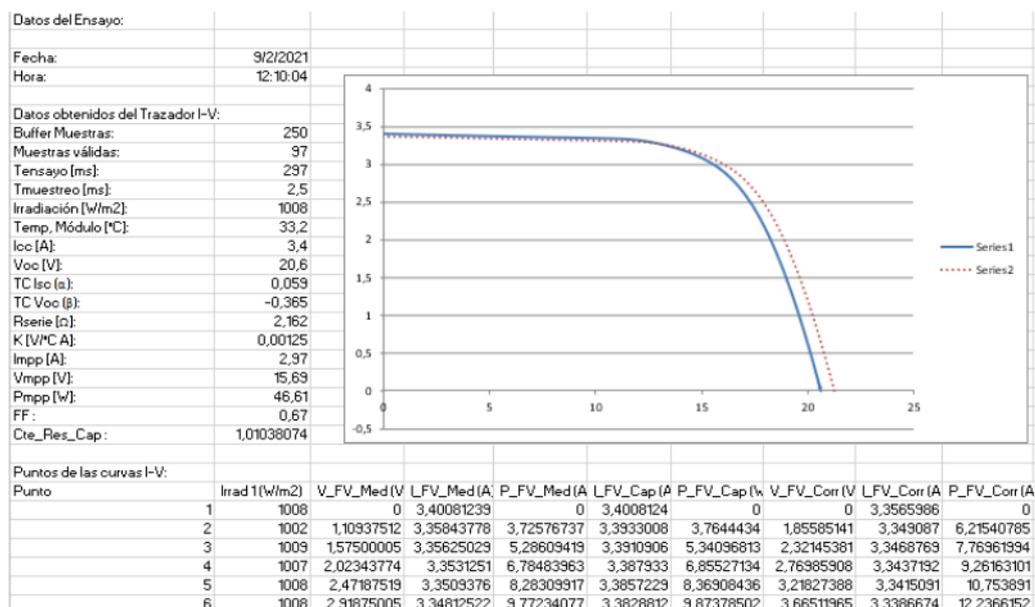


Figura 9: Presentación de resultados del ensayo en archivo CSV.

Es de destacar que el tiempo utilizado por el trazador para realizar la curva alcanzó los 297 ms, lo que

representa un valor razonable teniendo en cuenta que para un ensayo con luz solar natural, existen otras externalidades que afectan en forma considerable al ensayo. Es entonces que podría considerarse prácticamente despreciable a los efectos de intromisión de errores debidos al tiempo de muestreo.

Otra cuestión para destacar es que en cada muestra de tensión-corriente, el equipo toma una de radiación, promediando la misma como valor de radiación del ensayo.

Si bien por el momento no se han realizado contrastaciones con instrumentos certificados de ensayo de módulos, se puede visualizar en un primer grado de aproximación que los resultados son muy buenos. Los módulos utilizados para los ensayos preliminares son de buena calidad y sin uso. Se obtuvieron curvas con valores característicos que se encuadran dentro del rango de tolerancia del $\pm 5\%$ especificado por el fabricante. Análogamente, la potencia máxima obtenida en los ensayos resultó estar por encima del 95% de la nominal declarada por el fabricante, condición de aceptación establecida por la norma IRAM 210013-2.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado la factibilidad de desarrollar un trazador de curvas I-V para módulos FV portable y de bajo costo para ensayos de módulos FV con muy buenos resultados.

Por estar orientado a ensayos con luz solar natural, el equipo es simple, portable, de bajo costo y controlado por cualquier dispositivo de uso masivo que posea módulo de conexión inalámbrica como una computadora personal portátil, tableta o dispositivo móvil. Por estas mismas bondades, facilita el traslado a los ensayos en campo.

Como objeto de mejoras pueden nombrarse la posibilidad de la medición de la variable temperatura en el mismo ciclo de medición, tal como se realiza actualmente con la radiación solar. Puede incluirse también la opción de ampliación del banco de capacitores, de manera de ampliar el rango de medición actualmente limitado a módulos individuales, llevándolo a arreglos de módulos, es decir, generadores fotovoltaicos.

REFERENCIAS

- CAMMESA [en línea] Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A., Dirección URL: < <https://cammesaweb.cammesa.com/potencia-instalada/> > [consulta: 12 de julio de 2021]
- De la Casa J, Fuentes M, Muñoz J, Talavera D, Nofuentes G, Aguilera J. (2012). Herramientas para la docencia de créditos prácticos en asignaturas directamente relacionadas con la energía solar fotovoltaica. TAE 2012, 2012, pp. 168–173.
- IRAM 210013-2. (2015). Energía Solar. Módulos fotovoltaicos. Parte 2 – Determinación de las características eléctricas en condiciones de ensayo normalizadas (CEN).
- Muñoz J, de la Casa J, Fuentes M, Aguilera J, Bertolín J. (2011). New portable capacitive load able to measure PV modules, PV strings and large PV generators. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2011, vol. 1, pp. 4276–4280.
- Muñoz J, Lorenzo E. (2006). Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. Solar Energy, 80, pp. 1489-1497.
- Oliveira F, Rampinelli G, Gasparin F, Prieb C, Krenzinger A. (2015). Desenvolvimento e análise do desempenho de um traçador de curvas I-V portátil para arranjos fotovoltaicos. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 19. pp. 04.01-04.10. ISSN 2314-1433.
- REN21. (2021). Renewables 2021 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (ISBN 978-3-948393-03-8), pp. 17-22. (<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>)
- Secretaría de Energía (2021). Generación Distribuida en Argentina. Evolución de Trámites | Conexión de Usuario-Generador. Informe Mayo 2021.

ABSTRACT: This work describes the principle of operation, characteristics, implementation and the first experimental results of a capacitive current-voltage (I-V) tracer. Through it, it is possible to electrically characterize photovoltaic modules using natural sunlight and following the recommendations of the IRAM 210013-2 standard. The equipment is simple, portable, low-cost and controlled by any mass-use device that has a wireless connection module. Results are stored on an SD card for further processing. Results measured on a commercial module are presented.

KEYWORDS: Photovoltaic Solar Energy. I-V curve. Standardized tests. IRAM.