

# Aportaciones al diseño y construcción de trazadores de curvas características de dispositivos fotovoltaicos

E.F. Fernández, J. Montes-Romero, J. de la Casa  
Centro de Estudios Avanzados en Energía y Medio Ambiente  
Grupo de Investigación IDEA, Universidad de Jaén,  
Campus Lagunillas, 23071 Jaen, España  
E.F. Fernández: fenandez@ujaen.es

A. Firman, M. Cáceres, L.H. Vera  
GER – Grupo en Energías Renovables –  
Universidad Nacional del Nordeste  
Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina

**Abstract**— Sin duda, el trazado de la curva característica  $I-V$  de cualquier dispositivo fotovoltaico es el experimento esencial que permite obtener información fidedigna sobre su estado y comportamiento. Por tanto, debe ser parte de los contenidos prácticos obligatorios en cualquier asignatura, ya sea de Grado, Máster o Doctorado que persiga formar a los estudiantes en el campo de la ingeniería de los sistemas fotovoltaicos. En esta comunicación se presenta los avances-logros de dos grupos de investigación, uno argentino y otro español, en el diseño de prototipos electrónicos o sistemas ad-hoc que permiten realizar este experimento y que, posteriormente han sido integrados en las prácticas de las asignaturas donde dictan docencia o en las investigaciones en las que están involucrados y que abordan los pormenores de esta tecnología.

**Keywords**— Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos; cargas electrónicas; caracterización de dispositivos fotovoltaicos, docencia en energías renovables.

## I. INTRODUCCIÓN

La generación eléctrica por medio de la tecnología fotovoltaica (FV) ha sido una de las técnicas renovables que mayor éxito ha presentado durante la última década. Por ejemplo, durante el periodo 2005-2015, se registró una tasa de crecimiento anual del 27% en la inversión de este tipo de sistemas [1]. Además, durante el año 2016, 75 GWp fueron instalados en todo el planeta [2]. A finales del año 2017, se superaron los 320 GWp de potencia instalada global [3]. Actualmente, los países que lideran la potencia instalada de esta tecnología son: China, Japón, EEUU y Alemania, pero existen razones para intuir que el uso de esta tecnología, en la próxima década, se va a repartir de manera uniforme por todo el planeta, especialmente, en los países emergentes que necesitan aumentar su potencia de generación de energía eléctrica para su desarrollo.

Se considera de gran importancia el fomento y la formación de personal cualificado que lidere este mercado emergente. Para lograr este objetivo, se estima imprescindible incluir este tipo de conocimientos en las currículas dentro de estudios de ingeniería [4].

Existe una relación directa entre áreas de conocimiento como la Ingeniería Eléctrica o la Tecnología Electrónica y la tecnología fotovoltaica. La propia célula FV de 1º generación, tecnología de silicio cristalino, se basa en una unión PN. Además, gran parte del equipamiento necesario (inversores,

reguladores de carga, equipos de caracterización, etc.) para el uso de dicha tecnología no son otra cosa que sistemas cuyos fundamentos son estudiados en cualquier titulación de ingeniería electrónica.

Para comprender la tecnología FV, es fundamental entender de qué manera se comporta el generador FV. El experimento que más información aporta acerca del funcionamiento de cualquier dispositivo fotovoltaico es el trazado de su curva  $I-V$ . Dicha curva está formada por los infinitos pares de puntos tensión-corriente a los que opera un dispositivo FV, en función de las condiciones medioambientales a las que haya estado sometido durante el experimento. A partir de este conjunto de puntos es posible obtener todos los parámetros eléctricos característicos de interés del dispositivo, así como, determinar cualquier tipo de anomalía, defecto o situación de mal funcionamiento [5]–[8].

Los grupos de investigación a los que pertenecen los autores de este artículo llevan más de una década desarrollando diferentes arquitecturas y soluciones de diseño directamente relacionadas con este experimento. Las mismas han sido utilizadas para sus trabajos de investigación e incorporadas en sus labores docentes [9]–[12]. Se presenta a continuación una revisión de los logros más destacados.

## II. FUNDAMENTO TEÓRICO DEL TRAZADO DE LA CURVA $I-V$

En la Figura 1 se muestra la curva  $I-V$  típica de un dispositivo fotovoltaico. Esta curva característica está formada por los pares de puntos tensión corriente que se obtienen si, encontrándose el dispositivo en condiciones de operación, se varía la impedancia entre sus extremos desde cero hasta infinito. En la figura también se resaltan los puntos de mayor interés de la curva, ya que son los que proporciona el fabricante en sus hojas de características técnicas, donde se distinguen tres situaciones principales: corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ), la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y el punto de potencia máxima ( $P_m$ ), que se encuentra definido por la tensión ( $V_m$ ) y la corriente ( $I_m$ ) de máxima potencia.

Además de estos valores eléctricos básicos que se obtienen directamente de la curva  $I-V$ , a partir de éste conjunto de puntos, se pueden obtener otros parámetros de interés, mediante modelos matemáticos [13], que permiten realizar modelos eléctricos equivalentes del funcionamiento de la célula, módulo o generador FV. Dichos parámetros serán, en el caso por ejemplo de pretender obtener un modelo teórico de cinco parámetros: la corriente fotogenerada ( $I_{ph}$ ), la corriente

de saturación del diodo ( $I_0$ ), el factor de idealidad del diodo ( $m$ ), la resistencia serie ( $R_s$ ) y la resistencia paralela ( $R_{sh}$ ) [14], [15].

Todos los parámetros eléctricos obtenidos durante el trazado de la curva son dependientes de la tecnología del dispositivo y de las condiciones de operación a las que ha estado expuesto. Evidentemente, el parámetro que más influye es la irradiancia incidente en el plano, casi directamente proporcional a la corriente obtenida. En segundo orden de magnitud, la temperatura de célula, que afecta, como en cualquier dispositivo basado en semiconductores, al valor de la tensión.

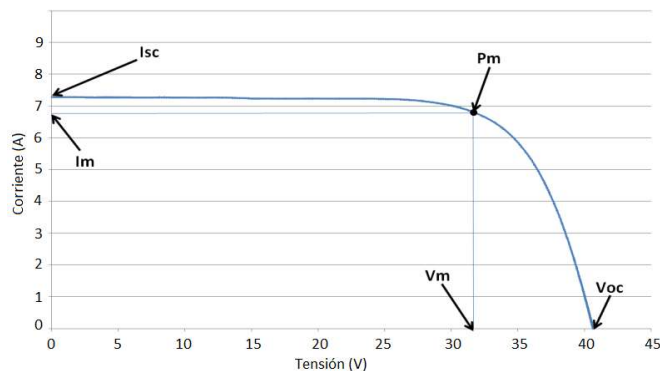


Figura 1. Curva característica  $I-V$  de un módulo fotovoltaico y la localización sus parámetros eléctricos básicos característicos.

Los fabricantes de módulos FV proporcionan el valor de los parámetros eléctricos básicos bajo unas condiciones ambientales específicas conocidas como Condiciones Estándar de Medida (CEM), que son definidas en la norma IEC 60891 [16] y que serán  $1000 \text{ W/m}^2$  de irradiancia,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura de célula y espectro solar AM 1.5.

Encontrar unas condiciones similares a las CEM resulta extremadamente complicado. Por este motivo, existen métodos de extrapolación a CEM [17]–[19]. También en este aspecto, existe un procedimiento normalizado para realizar esta traslación mediante el trazado de curva  $I-V$  en la norma IEC 60904 [20]. Estos métodos también han sido de interés para material docente de apoyo a estudiantes en materias directamente relacionadas con la energía solar fotovoltaica [21].

Para realizar el trazado de la curva característica de un módulo FV se requerirá de un equipamiento que es comúnmente accesible en cualquier laboratorio básico de electrónica. A grandes rasgos, un trazador de curvas  $I-V$  es un sistema electrónico capaz de producir una variación de impedancia entre cero e infinito, para de este modo, realizar un barrido en todo el rango de funcionamiento de elemento FV cuando está correctamente polarizado. Además, por los motivos expuestos anteriormente, el sistema debe registrar cuasi-simultáneamente los parámetros ambientales a los que trabaja el módulo FV, principalmente irradiancia y temperatura, en el momento del trazado de la curva. Como no siempre es posible su medida durante el trazado, se podrá medir en los instantes anterior y posterior a dicho proceso, y posteriormente comprobar que las condiciones ambientales no

han variado significativamente durante ese periodo para validar el experimento.

Aunque no sea uno de los objetivos principales del presente trabajo, indicar brevemente que para la medida de irradiancia se puede recurrir a dos opciones principales. Una opción será mediante el uso de piranómetros, aunque también es posible realizar esta medida por medio de células o módulos FV de referencia [22]. Si el elemento FV de referencia fue construido con los mismos materiales que el dispositivo bajo ensayo y se dispone de manera coplanaria al mismo, responde, angular y espectralmente igual que el dispositivo a ensayo. Permitiendo obviar los cambios espectrales si estos dispositivos son calibrados bajo el espectro de referencia AM 1.5.

En cuanto a la medida de temperatura de célula indicar que, comúnmente se aproxima su valor al de la temperatura posterior del módulo FV. El dispositivo que más se utiliza es la resistencia de platino (PT100), acoplada en su parte posterior tal y como se recomienda en el anexo B de la IEC 61724-1 [23]. Se recomienda realizar la medida a cuatro hilos para evitar la caída de tensión en los conductores y mejorar la precisión.

Como es obvio, el mercado ofrece equipos comerciales que permiten el trazado de la curva  $I-V$ . Tales equipos ofrecen las ventajas de cualquier equipo comercial, han sido probados y caracterizados por el fabricante, pero normalmente su coste es prohibitivo para los grupos de investigación o para montar un laboratorio dedicado a la docencia. Otro inconveniente es que estos productos comerciales incluyen dispositivos medidores de irradiancia y temperatura exclusivos y difíciles de reemplazar por otros tipos en caso de necesidad. Los algoritmos de tratamiento o traslación con que cuentan son cerrados y no se puede acceder a ellos. Además, pueden no incluir información detallada de las incertezas asociadas a las medidas experimentales que ofrecen. En resumen, estos equipos, por lo general, están pensados para un uso profesional [24]–[26].

Cualquier sistema trazador de curvas  $I-V$ , puede dividirse en un diagrama de bloques básico como el que se muestra en la Figura 2. Se pueden distinguir tres bloques principales: bloque variador de impedancia, bloque de medida y bloque de control.

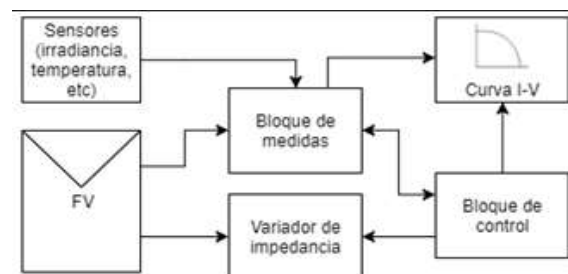


Figura 2. Diagrama de bloques básico de un trazador de curvas  $I-V$ .

## III. BLOQUE VARIADOR DE IMPEDANCIA

El bloque variador de impedancia se encarga de realizar el barrido completo de la curva  $I-V$  del módulo FV variando, por tanto, su punto de operación. Para esto, se pueden distinguir distintos procedimientos que vienen resumidos en [27], y que deben de ser escogidos y diseñados en función de las características eléctricas del elemento FV a ensayo y la disponibilidad de equipo y material con el que se cuente. Los métodos posibles serán: resistencias variables, fuentes de alimentación de cuatro cuadrantes, convertidores DC/DC, cargas activas y cargas capacitivas.

El método más sencillo es el uso de resistencias variables o reóstatos. La impedancia del componente se varía de forma manual, y se puede elegir el punto de operación en cada momento. El principal inconveniente de este método es la disipación de potencia. Toda la energía generada por el elemento FV debe ser disipada por la resistencia en cada instante de tiempo. Esta solución puede ser interesante para tareas docentes si se utilizan módulos de muy baja potencia, y por tanto, no se produzcan problemas de disipación de calor en la resistencia. Este método difícilmente permite la automatización del trazado

Otro método es el uso de fuentes de alimentación de cuatro cuadrantes comerciales como, por ejemplo, las que ofrece la marca comercial Kepco [28]. Este instrumento ajusta el punto de trabajo del módulo FV en una tensión determinada en cualquiera de los cuatro cuadrantes —siendo de interés especialmente el primero, aunque también tendrán utilidad el segundo y el cuarto cuadrante— y, actuando como sumidero de corriente, consumen la energía generada por el módulo FV. El objetivo de polarizar desde tensiones negativas y corrientes positivas es la de definir perfectamente los puntos  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$  cuando se produce el cruce por sus respectivos ejes, ya que, por ejemplo, para la  $I_{sc}$  se dificulta su obtención debido a resistencias en serie de otros elementos (cableado, interruptores, contactos, resistencia *shunt*, etc). De esta manera se consiguen puntos perfectamente determinados. En principio, este método puede parecer una solución sencilla, sin embargo, este tipo de fuentes de alimentación son equipos de muy alto coste, con rangos de tensión y corriente limitados, y con un tamaño importante que dificulta su transporte, relegando su uso a laboratorio. En este aspecto poder ajustar el punto de operación del elemento FV, el uso de estos equipos para fines docentes puede ser de gran interés.

La experiencia de los grupos de investigación en este tipo de sistemas se basa en [29], donde se usó una fuente de cuatro cuadrantes para controlar el punto de trabajo del módulo FV, integrando este método en un sistema completo de caracterización en la Universidad de Málaga, tal y como se ve en la Figura 3.



Figura 3. Sistema trazador de curvas  $I-V$  basado en fuentes de cuatro cuadrantes instalado en la Universidad de Málaga.

Los convertidores DC/DC son otra posible solución al problema del barrido de la curva  $I-V$ . Esos convertidores tienen la capacidad de variar la impedancia dependiendo del régimen de trabajo. Esta propiedad los hace adecuados para resolver el problema propuesto. Un esquema simplificado de la etapa de potencia de este tipo de convertidores se muestra en la Figura 4. La principal dificultad de este tipo de sistemas es el manejo y disipación de la energía del generador. Para poder manejar una mayor cantidad de potencia, será necesario realizar asociaciones en serie o paralelo de convertidores de este tipo, lo cual es, a su vez, una ventaja al tratarse de sistemas modulares. Aun así, se requiere de estrategias especiales de diseño para evitar rizados excesivos en el perfil de la curva  $I-V$ .

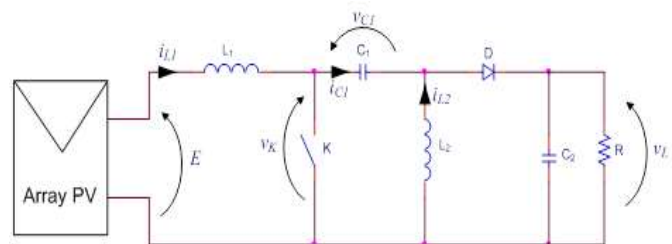


Figura 4. Esquema simplificado de la etapa de potencia mediante convertidores DC/DC.

Este tipo de cargas han sido utilizados por los grupos de investigación en Proyectos Final de Carrera, y que, además, fueron publicados en [30]. Para este sistema se usaron cuatro convertidores SEPIC (*Single-ended primary-inductor converter*), permitiendo el trazado de la curva  $I-V$  de elementos FV con unos rangos máximos de hasta 400 V de  $V_{oc}$  y 10 A de  $I_{sc}$ , y hasta 400 W de disipación de potencia continua. Uno de los sistemas desarrollados se puede ver en la Figura 5.

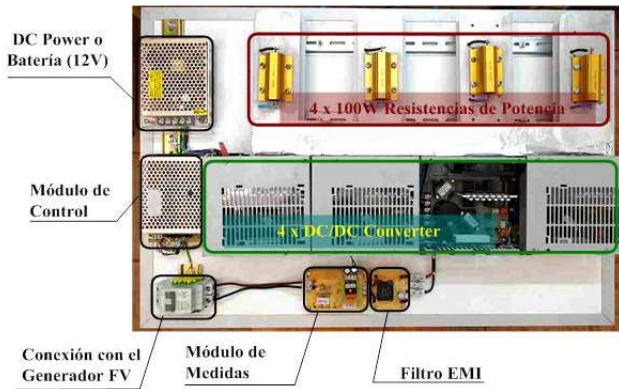


Figura 5. Sistema trazador de curvas  $I-V$  basado en convertidores DC/DC.

Una de las propiedades tanto de las fuentes de cuatro cuadrantes, como de los convertidores DC/DC es que el trazado de la curva  $I-V$  puede ser realizado en ambos sentidos. Es decir, se puede trazar desde el punto de  $I_{sc}$  hasta el punto de  $V_{oc}$ , o en el sentido contrario.

También es posible realizar la variación de impedancia a través de cargas activas. Éstas basan su funcionamiento en el trabajo de transistores en su zona activa. Para variar la impedancia, se variará la zona de trabajo desde el estado de saturación al de corte, produciendo una variación en el punto de operación del módulo FV desde circuito abierto hasta cortocircuito. Los transistores utilizados se encargan de disipar la potencia generada durante el trazado de la curva  $I-V$ , por lo tanto, la carga activa deberá tener la capacidad necesaria de disipación. Para ello, se podrá realizar asociaciones en paralelo con el fin de aumentar la capacidad disipativa de la carga activa. Aun así, se debe prestar especial atención para no superar la temperatura máxima permitida de estos componentes, por lo que se recomienda utilizar velocidades elevadas de barrido.

Uno de los diseños posibles con una carga activa se muestra en la Figura 6.

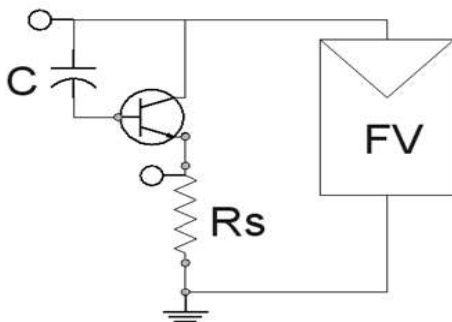


Figura 6. Esquema simplificado de una posible etapa de potencia mediante carga activa con transistor bipolar.

Como experiencia de los grupos de investigación, se han usado cargas activas basadas en transistores bipolares para

realizar la variación de impedancia y disipación de potencia del elemento FV [10]. El prototipo de este sistema se puede ver en la Figura 7.

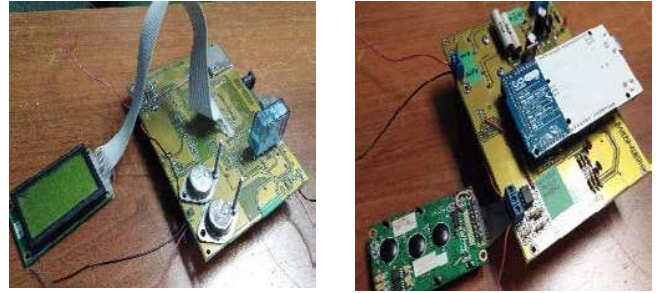


Figura 7. Sistema trazador de curvas  $I-V$  basado en carga activa mediante transistores bipolares instalado en la Universidad Nacional del Nordeste.

Finalmente, las cargas capacitivas serán otra forma de realizar el trazado de la curva. Su funcionamiento se basa en el transitorio de carga de un banco capacitivo. Para ello, un condensador completamente descargado comenzará su proceso de carga – iniciando con impedancia cero –, hasta que esté completamente cargado, presentando una impedancia infinita. Durante la carga, el módulo FV varía su punto de operación, barriendo la curva  $I-V$  por completo. Las curvas de tensión y corriente de este proceso se observan en la Figura 8, en la cual se aprecia el comportamiento descrito.

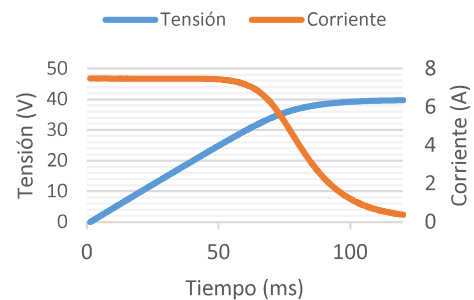


Figura 8. Forma de onda de tensión y corriente en el proceso de carga del condensador.

Las principales ventajas de este tipo de cargas son la sencillez de este método y que no existe disipación de potencia durante el trazado. La energía generada por el módulo FV es almacenada en el condensador, que luego será descargado sobre una resistencia de potencia en un proceso completamente controlado. Como principal desventaja, este proceso no permite la polarización del módulo FV en un punto determinado. Además, debido a la curva de carga del condensador, las medidas se encontrarán gradualmente más agrupadas a medida que se acercan a la  $V_{oc}$ , tal como se muestra en la Figura 8.

Los grupos de investigación tienen una amplia experiencia en el desarrollo de sistemas que utilizan este procedimiento [9], [12], [31]. Debido a la simplicidad y el bajo coste de las cargas capacitivas, se han realizado varios modelos de

trazadores de curvas  $I-V$  basados en esta metodología a lo largo de los últimos años, y siendo actualmente el más utilizado por los grupos de investigación. En la Figura 9 se muestra como ejemplo uno de los sistemas desarrollados.



Figura 9. Sistema trazador de curvas  $I-V$  basado en carga capacitiva e instalac en la Universidad de Jaén.

#### IV. BLOQUE DE MEDIDA

El bloque de medida se encargará de adquirir-acondicionar de manera simultánea los valores de tensión-intensidad que conforman la curva característica, así como de los parámetros ambientales relevantes a los que se ha realizado el experimento. Un esquema simplificado se puede ver en la Figura 10, donde es muestra el conexionado correcto para realizar las medidas de los pares tensión-corriente que componen la curva  $I-V$ .

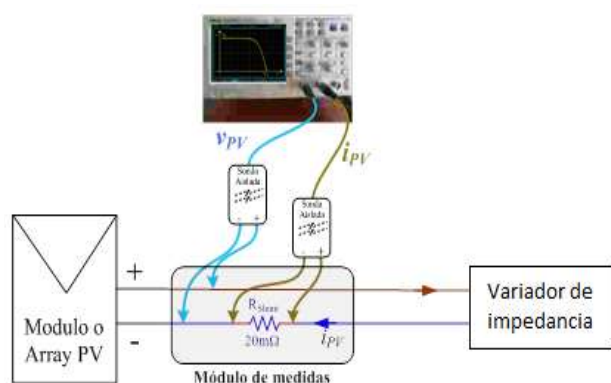


Figura 10. Esquema general del conexionado necesario para realizar la medida del generador FV.

La simultaneidad de la medida de los parámetros tensión y corriente es imprescindible por lo que es necesario asegurar que los pares medidos coinciden con la misma base temporal.

En la mayoría de las ocasiones, la medida de la corriente se realiza de forma indirecta. Para ello, se realiza la medida por medio del voltaje ofrecido por una resistencia *shunt* de valor óhmico despreciable o bien, por medio del voltaje obtenido por sensores efecto Hall, los cuales presentan la ventaja de que no requieren de una inserción física dentro del

circuito eléctrico. Se recomienda el uso de resistencias tipo *shunt*, ya que nuestra experiencia indica que, para los sensores de efecto Hall, se ha reportado una deriva en la medición que resulta complicada de cuantificar. Para la medida en tensión, en la mayoría de los casos y usando equipamiento comercial, será posible realizarla de forma directa. En caso de no ser posible, se puede optar por adecuar la señal mediante divisores de tensión con un adecuado tratamiento de la impedancia de entrada del sistema de medida

La solución a priori más sencilla para realizar las mediciones es mediante el uso de osciloscopios comerciales. Con un osciloscopio de dos canales es posible realizar la medida de tensión y corriente de cualquier módulo FV de forma simultánea. Mejor solución es utilizar osciloscopios de cuatro canales aislados con los que será posible realizar la medida de tensión y corriente para la curva  $I-V$  y, además, de los sensores ambientales básicos necesarios mediante el mismo instrumento de medida.

Como ventaja del uso de osciloscopios para esta tarea, destaca la simplicidad de su uso, alta velocidad de muestreo y la sincronización de las medidas de corriente y tensión.

En el caso de utilizar multímetros comerciales, obligatoriamente deben poder permitir la sincronización mediante una entrada externa, de forma que se asegure que las medidas se realizan de forma simultánea. Muchos incluso, ofrecen también la posibilidad de la medida de resistencia, permitiendo la medida de sensores de temperatura resistivos de forma directa.

La mayor ventaja de los multímetros es la alta precisión de estos instrumentos. Como inconveniente, debido a la necesidad de usar dos de estos instrumentos, se aumenta el coste final del sistema de forma significativa pero el desarrollo del control de los mismos a través de programas como LabVIEW puede ser una práctica muy formativa para cualquier estudiante.

En caso de no disponer de equipamiento comercial, es posible realizar etapas electrónicas, basadas, por ejemplo, en plataformas de hardware libre. La elección de los componentes debe cumplir las condiciones expuestas anteriormente, por lo que una elaboración *ad-hoc* de un sistema a medida puede resultar algo complejo, pero fácilmente asumible por un ingeniero de la especialidad.

Evidentemente, si no se utiliza equipos de medida comerciales, el coste del sistema se reduce sustancialmente. Entre sus inconvenientes se encuentra la complejidad realizar el diseño completo con las condiciones marcadas y la dificultad de asegurar la calidad en las medidas obtenidas.

Para la tarea de medida, durante los años de experiencia de los grupos de investigación, se han utilizado osciloscopios de dos canales tanto aislados como comunes [30], [32]. También se han utilizado dos multímetros comerciales —uno para tensión y otro para corriente— para medir la curva  $I-V$  [11], [12], [31]. También se han diseñado y desarrollado etapas

electrónicas de medida adaptadas a las necesidades específicas de los sistemas FV.

## V. BLOQUE DE CONTROL

Como se enunció en los apartados anteriores, una vez que se consigue variar la impedancia con algún tipo de carga, solo resta medir los valores de corriente y voltaje del módulo FV junto con los datos de irradiancia y temperatura de célula. Todo esto es gobernado por un bloque que denominaremos de "control". Este bloque puede ser un dispositivo microcontrolador, una placa de adquisición de datos con entradas y salidas digitales, generadores de funciones, interruptores manuales o automáticos, etc. Todos estos componentes están generalmente gobernados por un software de control, encargado de secuenciar el funcionamiento, dependiendo el tipo de carga empleada.

En el caso de las fuentes de cuatro cuadrantes comerciales, el control se realiza de forma directa, normalmente, mediante un PC. Al tratarse de equipos comerciales, el control variará dependiendo del fabricante, pero como característica común, estos equipos son controlables por software, por lo que para realizar el barrido  $I-V$ , sólo será necesario disponer de un PC y programar un software para llevar a cabo el experimento

El control para los convertidores DC/DC se realiza mediante trenes de pulsos de onda cuadrada para la activación de los convertidores, y trenes de pulsos de onda triangular para la alteración de la tensión de referencia, que variará la impedancia del convertidor. Para esto, el método más sencillo será el uso de un generador de funciones. Estos instrumentos aseguran la tensión y frecuencia de las señales necesarias. Una solución más compleja puede ser el uso de circuitos electrónicos para generar dichas señales de control. Un posible esquema de estos sistemas se presenta en la Figura 11.

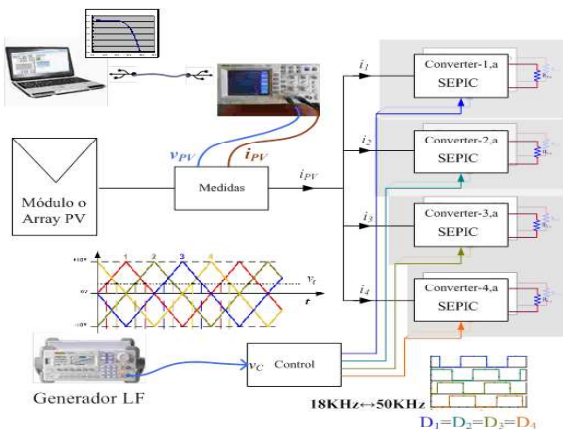


Figura 11. Esquema general del sistema de trazado de curvas  $I-V$  mediante convertidores DC/DC.

El control de las cargas activas se realizará de forma distinta según el transistor utilizado. Si se usan transistores bipolares, se podrá realizar el control mediante la corriente en la base del transistor. Como en el caso de [10], dicho control

se realizará de forma automática en función de la variable  $\beta$  del transistor por medio de la carga de un condensador de control. La ecuación de control que rige el tiempo de trazado de la curva  $I-V$  se muestra como ecuación (1). En caso de usar transistores controlados en puerta mediante tensión (MOSFET e IGBT), se podrá realizar mediante señales que varíe o bien de forma creciente o de forma decreciente como pueden ser una onda senoidal, una onda triangular, etc.

$$t = \frac{V_{oc}^2 \cdot C \cdot \beta}{P_m} \quad (1)$$

El control de la carga capacitiva se realiza mediante interruptores. Se destacan los procesos de carga y descarga que son controlados por dichos interruptores. Al cerrar el interruptor de carga SW1 (Figura 12), se comienza el proceso, que finalizará cuando la tensión del condensador y la  $V_{oc}$  del módulo se igualen. A continuación, se abre el interruptor de carga y se cierra el de descarga SW2, con el que se disipa la energía almacenada en el condensador por la resistencia de descarga. Se debe tener en cuenta que los interruptores deberán poder soportar tanto la corriente generada por el módulo FV como la tensión máxima en estado de circuito abierto. La potencia disipada por estos interruptores será mínima, pero deben poder soportar las características mencionadas anteriormente. Para este fin se pueden usar como interruptores una gran variedad de elementos: transistores de cualquier tipo (BJT, MOSFET, IGBT), tiristores, relés de estado sólido, relés electromecánicos, etc.

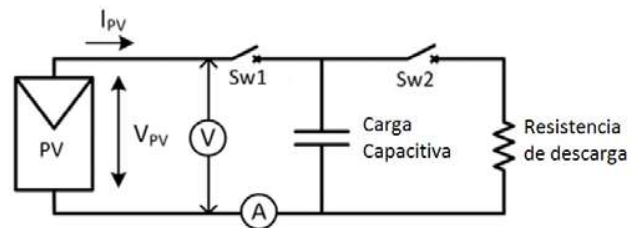


Figura 12. Esquema simplificado de una etapa de potencia mediante carga capacitiva.

El tiempo de carga del condensador se puede estimar a partir de la ecuación (2). Será necesario tener en cuenta parámetros del generador fotovoltaico como la  $V_{oc}$  y la  $P_m$ . Además, como es lógico, dependerá de la capacidad del condensador.

$$t = \frac{V_{oc}^2 \cdot C}{P_m} \quad (2)$$

Entre los dispositivos de control que se han utilizado por los grupos de investigación, se pueden destacar placas Arduino, placas TIVA, placas NI-DAQ, sistemas de adquisición de datos, puertos paralelos gobernados por un PC, interruptores manuales, microcontroladores PIC, generadores de funciones, etc. Con estos se han generado las distintas señales de control necesarias para el trazado de la curva  $I-V$ . Como interruptores de conexión en las cargas capacitivas se

han utilizado transistores MOSFET e IGBT, tiristores y relés de estado sólido. Como software de control, cabe destacar el uso de lenguajes de programación C, Visual Studio o LabVIEW.

## VI. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado de manera descriptiva los aspectos más importantes en lo que se refiere al diseño y construcción de trazadores de curvas  $I-V$  aplicados a tecnología fotovoltaica.

Probablemente, la conclusión más importante del presente trabajo es que resulta relativamente fácil incorporar este experimento en la curricula de cualquier asignatura relacionada con la tecnología si se dispone de un laboratorio de electrónica de nivel básico.

Además, si como es el caso de los autores, esas asignaturas dependen están integradas en una titulación de ingeniería en electrónica industrial o telecomunicación, resulta altamente formativo para los estudiantes el diseño, construcción o programación de cada uno de los bloques que forman el conjunto ya que permite afianzar y aplicar conocimientos que se han estudiado en otras materias troncales de la especialidad (Electrónica Analógica, Digital o de Potencia, Instrumentación, Sistemas de adquisición de Datos, ect). También se considera una buena opción como propuesta de Trabajo Fin de Grado o Fin de Máster por su carácter integrador de múltiples conocimientos relacionadas con la especialidad y aplicados a un caso concreto.

Se han presentado los diferentes métodos para realizar el proceso de trazado de la curva  $I-V$ , intentado guiar al lector y simplificando todo el proceso en tres grandes bloques: variación de impedancia, medida y control.

Sin duda, la parte más importante de los instrumentos destinados al trazado de la curva  $I-V$ , es la carga variable que se precisa para lograr la excursión de la impedancia requerida. Se han descrito y referenciado todos los tipos de carga que los grupos de investigación en los que trabajan los autores han diseñado y probado. Aunque se han expuesto los parámetros principales que deben ser tenidos en cuenta para el diseño y la implementación de este tipo de sistemas, se ha procurado además que la mayoría de las referencias, en las que se explica con detalle todo el proceso de diseño y construcción sean en abierto. Se recomienda al lector que pretenda implementar alguno de los diseños expuestos se dirija a las referencias propuestas.

De esta manera este artículo pretende convertirse en material de apoyo a la enseñanza de la energía solar FV, tanto a nivel de grado como de postgrado, en donde se necesiten implementar instrumentos que lleven a cabo el trazado de la curva  $I-V$  con fines didácticos o científicos.

## REFERENCIAS

[1] Bloomberg New Energy Finance, "Global Trends in Clean Energy

- Investment," 2017.
- [2] SolarPower Europe, "Global market outlook for solar power 2017-2021," 2017.
- [3] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, "Photovoltaics Report," 2017.
- [4] J. De Casa, M. Fuentes, J. V Muñoz, D. L. Talavera, G. Nofuentes, and J. Aguilera, "Herramientas para la docencia de créditos prácticos en asignaturas directamente relacionadas con la energía solar fotovoltaica .," in *TAE 2012*, 2012, pp. 168–173.
- [5] M. García, J. M. Maruri, L. Marroyo, E. Lorenzo, and M. Pérez, "Partial Shadowing, MPPT Performance and Inverter Configurations: Observations at Tracking PV Plants," *Prog. Photovolt Res. Appl.*, vol. 15, no. April, pp. 659–676, 2008.
- [6] D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. de la Casa, and J. Aguilera, "Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 7, pp. 1301–1309, 2010.
- [7] M. Piliouguine *et al.*, "Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates," *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 626–634, 2013.
- [8] A. Firman, V. Toranzos, A. Busso, L. Vera, and J. de la Casa, "Qualitative analysis of electrical mismatch losses in photovoltaic devices," in *EUPVSEC*, 2013, pp. 3212–3215.
- [9] C. Bello, V. Jimenez, V. Toranzos, A. Busso, L. H. Vera, and C. Cadena, "RELEVADOR PORTATIL DE CURVAS I-V DE PANELES FOTOVOLTAICOS COMO HERRAMIENTA DE DIAGNOSTICO IN SITU DE SISTEMAS DE GENERACION FOTOVOLTAICA," *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 13, pp. 77–83, 2009.
- [10] A. Firman, V. Toranzos, A. Busso, C. Cadena, and L. Vera, "Sistema hibrido para la caracterización eléctrica de arreglos fotovoltaicos," *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 14, pp. 17–23, 2010.
- [11] J. V. Muñoz, J. de la Casa, M. Fuentes, J. Aguilera, and J. C. Bertolin, "New portable capacitive load able to measure PV modules, PV strings and large PV generators," in *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2011, vol. 1, pp. 4276–4280.
- [12] J. Montes-Romero, M. Piliouguine, J. Muñoz, E. Fernández, and J. de la Casa, "Photovoltaic Device Performance Evaluation Using an Open-Hardware System and Standard Calibrated Laboratory Instruments," *Energies*, vol. 10, no. 11, p. 1869, 2017.
- [13] A. M. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef, and H. M. Hamada, "Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 494–509, 2016.
- [14] M. A. De Blas, J. L. Torres, E. Prieto, and A. García, "Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices," *Renew. Energy*, vol. 25, no. 3, pp. 371–380, 2002.
- [15] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, and J. R. Phillips, "Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters," *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 10, p. 406, 1984.
- [16] International Electrotechnical Commission, "IEC 60891, Photovoltaic Devices. Procedures for Temperature and Irradiance Corrections to Measure I-V Characteristics," Geneva, Switzerland, 2007.
- [17] G. . Araujo and E. Sánchez, "Analytical expressions for the determination of the maximum power point and the fill factor of a solar cell," *Sol. Cells*, vol. 5, pp. 377–386, 1982.
- [18] K. Emery and C. Osterwald, "Measurement of photovoltaic device current as a function of voltage, temperature, intensity and spectrum," *Sol. Cells*, vol. 21, no. 1–4, pp. 313–327, Jun. 1987.
- [19] A. Firman, V. Toranzos, A. Busso, C. Cadena, and L. Vera, "Determinación del punto de trabajo de sistemas fotovoltaicos conectados a red: metodo simplificado de traslacion punto a punto a condiciones estandar de medida," *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 15, pp. 1–8, 2011.
- [20] International Electrotechnical Commission, "IEC 60904-1, Photovoltaic Devices, Part 1: Measurement of Photovoltaic Current–Voltage Characteristics," Geneva, Switzerland, 2006.
- [21] J. Montes-Romero, M. Torres-Ramírez, J. De La Casa, A. Firman, and M. Cáceres, "Software tool for the extrapolation to Standard Test Conditions (STC) from experimental curves of photovoltaic

- modules,” in *Proceedings of 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching, TAAE 2016*, 2016.
- [22] A. Firman, L. Zini, R. Sanchez, and L. Vera, “Desarrollo y calibración de dispositivos fotovoltaicos para determinar el recurso solar utilizable por sfc<sub>r</sub>,” *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 18, pp. 9–17, 2014.
- [23] International Electrotechnical Commission, “IEC 61724-1: Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring,” 2017.
- [24] P. C. Neuenstein J., “Los módulos y sus curvas,” *Photon. La Rev. fotovoltaica*, pp. 54–71, 2009.
- [25] P. Hernday, “Field Applications for I-V Curve Tracers,” *SolarPro*, no. August/September, pp. 76–106, 2011.
- [26] Tritec, “Operating Instructions Tri-ka,” 2010.
- [27] E. Duran, M. Piliouguine, M. Sidrach-De-Cardona, J. Galan, and J. M. Andujar, “Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review,” in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008.
- [28] Kepco Inc., “<http://www.kepcopower.com/>.”
- [29] M. Piliouguine, J. Carretero, L. Mora-López, and M. Sidrach-De-Cardona, “Experimental system for current-voltage curve measurement of photovoltaic modules under outdoor conditions,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 19, no. 5, pp. 591–602, Aug. 2011.
- [30] J. C. Bertolin, M. Fuentes, J. V. Muñoz, and J. de la Casa, “Applications of DC/DC converters for obtaining characteristic curves of PV generators,” in *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2012.
- [31] J. V. Muñoz *et al.*, “Automatic monitoring system to assess the outdoor behaviour of photovoltaic modules,” in *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2014, pp. 2654–2657.
- [32] G. Nofuentes, J. Aguilera, E. Álvarez, L. Hontoria, and J. de la Casa, “Estimación de la potencia máxima media en condiciones estándares de medida de un módulo fotovoltaico de silicio cristalino,” in *X Simposio Peruano de Energía Solar*, 2003.