

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ciencias



TESIS

Optimización de un trazador de curva I-V para evaluar módulos fotovoltaicos

Para obtener el título profesional de Ingeniero Físico.

Elaborado por

Renzo Alexis Aira Moreno

 [0009-0003-9753-6900](https://orcid.org/0009-0003-9753-6900)

Asesor

Dr. Manfred Josef Horn Mutschler

 [0000-0003-4808-658X](https://orcid.org/0000-0003-4808-658X)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Aira Moreno [1]
Referencia/Reference	[1] R. Aira Moreno, " <i>Optimización de un trazador de curva I-V para evaluar módulos fotovoltaicos</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE	

Citar/How to cite	(Aira, 2024)
Referencia/Reference	Aira, R. (2024). <i>Optimización de un trazador de curva I-V para evaluar módulos fotovoltaicos</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A Dios en primer lugar por guiarme en cada paso que doy, y a toda mi familia porque me mostraron su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y me enseñaron el significado de tener una verdadera familia, este trabajo lo dedico a cada uno de ustedes.

Agradecimientos

Al Dr. Manfred Horn, quien con su experiencia me asesoró para la elaboración de este trabajo de tesis, por su dedicación y sus valiosos consejos.

A la Dra. Mónica Marcela Gómez León, quien con sus consejos y sugerencias aportó en el desarrollo de este trabajo de tesis.

Al Dr. José Solís, director del CER UNI, por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo en las instalaciones del laboratorio y alentar la investigación en el CER UNI.

Al Dr. Juan de la Casa, responsable del proyecto "Emergiendo con el Sol", quien dio su visto bueno para introducir los cambios al trazador de curva I-V.

Resumen

El conocimiento de las características eléctricas de un módulo fotovoltaico a condiciones estándar de medida es muy importante para estimar su rendimiento, es por ello que el presente trabajo describe la implementación de un trazador de curva I-V de módulos fotovoltaicos y el desarrollo de un software para el traslado de una curva I-V de un módulo fotovoltaico obtenida en condiciones reales de clima a condiciones estándar, según la norma IEC 60891:2021.

Se describen los métodos de obtención de la curva I-V y se mencionan las normativas de referencia para el trazado de la curva I-V. Luego se describe la optimización del trazador detallando los cambios en la instrumentación y se describe el software desarrollado en una serie de etapas para lograr la traslación, lo que permitirá realizar estudios y evaluaciones de módulos fotovoltaicos comparando los resultados experimentales con los datos del fabricante. Finalmente se muestran los resultados de la medición realizada a un módulo fotovoltaico comercial utilizando el trazador I-V y se realiza el traslado de la curva con el software desarrollado.

Palabras clave — Energía solar, curva I-V, módulo fotovoltaico, software de traslación.

Abstract

Knowledge of the electrical characteristics of a photovoltaic module under standard measurement conditions is very important to estimate its performance, which is why this work describes the implementation of an I-V curve tracer for photovoltaic modules and the development of a software to translate an I-V curve of a photovoltaic module obtained in real climate conditions to standard conditions, according to the IEC 60891:2021 standard. The methods used to obtain the I-V curve are described and the reference standards for I-V curve tracing are mentioned. Then the optimization of the tracer is described by detailing the changes in the instrumentation and the software developed in a series of stages to achieve the translation is also described, which will allow performing studies and evaluations of photovoltaic modules by comparing the experimental results with the manufacturer's data. Finally, the results of the measurement performed on a commercial photovoltaic module using the I-V tracer are shown and the translation of the curve is performed with the developed software.

Keywords — Solar energy, I-V curve, photovoltaic module, translation software.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Prefacio	xiii
I. Introducción	1
A. Generalidades	1
B. Descripción del problema de investigación	3
C. Objetivos	4
1) Objetivo general.....	4
2) Objetivos específicos	4
D. Antecedentes investigativos	5
1) A nivel mundial	5
2) En Perú.....	6
II. Marco teórico y conceptual	7
A. Marco teórico.....	7
1) Radiación solar	7
2) Curva I - V de una celda solar fotovoltaica	9
3) Circuito equivalente de una celda solar fotovoltaica.....	11
4) Parámetros característicos del módulo fotovoltaico	12
B. Marco conceptual	14
1) Métodos de obtención de la curva I-V.....	14

2) Normativas de referencia	24
III. Desarrollo del trabajo de investigación	28
A. Trazador de curva I - V del CER - UNI.....	28
1) Bloque de adquisición de datos	28
2) Circuito de potencia	32
3) Bloque de control.....	34
B. Optimización del trazador del CER-UNI.....	36
1) Instrumentación	36
2) Software de traslación	38
IV. Análisis y discusión de los resultados.....	44
Conclusiones	49
Recomendaciones	50
Referencias bibliográficas.....	51
Anexos	60

Lista de Tablas

Pág.

Tabla I: Valores obtenidos de la medida de la curva I-V de un módulo FV comercial utilizando el software	45
Tabla II: Valores obtenidos de la medida del trazador comercial a un módulo FV.....	46
Tabla III: Valores obtenidos en la medición de la curva I-V de un módulo FV Trina Solar.	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura I. Capacidad mundial instalada para producir energía de fuentes renovables [7].	2
Figura II. Curva de voltaje - corriente de un diodo.	9
Figura III. Desplazamiento de la curva I-V cuando está en iluminación.	10
Figura IV. Curva I - V y P - V típicas de una celda solar irradiada [43].	11
Figura V. Circuito equivalente de una celda solar.	12
Figura VI. Variación de la curva I-V de un módulo fotovoltaico dependiendo de la temperatura e irradiancia. A la izquierda, las curvas a temperatura constante. A la derecha, las curvas a irradiancia constante [47].	13
Figura VII. Diagrama general de un trazador de curva I-V [48].	14
Figura VIII. Método de carga resistiva. (a) Esquema general del método. (b) Obtención de los puntos de la curva I - V con el método [48].	15
Figura IX. Esquema del método de la carga resistiva variable utilizando varias resistencias (a) en paralelo, (b) en serie [13].	16
Figura X. Defectos en la curva I - V obtenida con el método de la carga resistiva. (a) Curva sin uniformidad. (b) Puntos faltantes. Mod. de [11], [13].	17
Figura XI. Método de carga capacitiva. (a) Esquema general del método. (b) Curva de corriente y voltaje del capacitor durante la carga [48].	18
Figura XII. Esquema del método de carga capacitiva (a) considerando una resistencia de descarga, y (b) añadiendo una fuente para precarga negativa [14], [48], [49].	18
Figura XIII. Formación de la curva I-V considerando la carga del capacitor [53].	19
Figura XIV. Circuito básico del método de la carga electrónica.	20

Figura XV.	Comparación de la curva I-V con las curvas de operación de un MOSFET [11].	21
Figura XVI.	Esquema del método DC-DC. Resistencia equivalente vista desde el generador FV [63].	22
Figura XVII.	Esquema del método de cuatro cuadrantes [11].	23
Figura XVIII.	Trazador de curva I - V portátil I-V400W.	24
Figura XIX.	Resistencia shunt 60 mV 10 A.	29
Figura XX.	Multímetros Agilent 34411A utilizado para la medida de corriente y voltaje.	30
Figura XXI.	Sensor de temperatura Pt100 de 4 hilos tipo parche de silicona.	31
Figura XXII.	Celda FV para medir irradiancia.	31
Figura XXIII.	Registrador de datos Agilent 34970A.	32
Figura XXIV.	Circuito de potencia.	32
Figura XXV.	Resistencia de descarga para disipar la energía almacenada en el capacitor luego de la medida.	33
Figura XXVI.	Esquema general del circuito de potencia para el trazado de la curva I-V.	34
Figura XXVII.	Esquema general del trazador I - V del CER-UNI.	35
Figura XXVIII.	Panel frontal del software para el trazador I - V del CER - UNI.	36
Figura XXIX.	Relés cambiados, circuito de potencia con los cambios realizados.	37
Figura XXX.	Piranómetro utilizado para optimizar el trazador de curva I-V.	38
Figura XXXI.	Pestaña de configuración en la que se muestra el ingreso de datos.	39
Figura XXXII.	Selección del módulo para importar sus datos guardados y utilizarlos en la medida.	40

Figura XXXIII.	Pestaña principal del panel frontal del software para el traslado de la curva I - V.	40
Figura XXXIV.	Cálculo manual a través de la Ecuación 9 para hallar la resistencia en serie.	42
Figura XXXV.	Diagrama de flujo del traslado de la curva I - V.	43
Figura XXXVI.	Captura de la gráfica de la recta generada con la Ecuación 9, para calcular resistencia en serie, con un subprograma del software.	44
Figura XXXVII.	Curvas I - V que se muestran en el panel frontal del software después de realizar la medida y la traslación a condiciones estándar.	45
Figura XXXVIII.	Gráfica curvas I-V y de potencia de la medida hecha con el trazador comercial IV400w.	46
Figura XXXIX.	Módulo FV Trina Solar siendo evaluado con el trazador optimizado. El parche blanco muestra que se está haciendo la prueba de puntos calientes al módulo.	48

Prefacio

El presente trabajo de tesis surge como una continuación al trabajo realizado en el proyecto “Emergiendo con el Sol” desarrollado en el año 2014 en el Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER-UNI) con la colaboración de la Universidad de Jaén de España (UJA). En dicho proyecto se implementó y se puso en marcha un sistema automático de monitoreo para la evaluación de módulos fotovoltaicos, el cual traza la curva I-V de los módulos a condiciones reales de operación.

En el CER-UNI se vienen desarrollando diversos proyectos de investigación con energías renovables, que han tenido como resultado la publicación de artículos indexados y trabajos de tesis. Así mismo, proyectos como ETRÉLA han potenciado los recursos humanos del CER-UNI y han permitido adquirir equipos para la capacitación en energía solar fotovoltaica y térmica, logrando así tener un laboratorio especializado que contribuye a la investigación y difusión de las energías renovables en el Perú.

En ese contexto, la presente tesis busca contribuir al desarrollo del CER-UNI como centro de investigación y promoción de las energías renovables, brindando una herramienta para la evaluación de la calidad de módulos fotovoltaicos en el Perú y lograr así un precedente para la normativa en la evaluación de los sistemas fotovoltaicos en nuestro país.

I. Introducción

A. Generalidades

Las energías renovables como alternativa a los combustibles fósiles están tomando cada año más importancia en el desarrollo energético y económico de nuestra sociedad, esto, debido al impacto negativo de las fuentes tradicionales de energía. Las Naciones Unidas (NU) indica que los combustibles fósiles, que incluyen el carbón, el petróleo y el gas, tienen el mayor impacto en el cambio climático, ya que el 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero se deben a estos, y representan el 90% de todas las emisiones de CO₂ a la atmósfera [1]. Frente a esta problemática, lo que se busca es impulsar la transición energética hacia las energías renovables. Por su parte, la Secretaría de las Naciones Unidas sugiere que los pasos claves para esta transición deben ser: hacer que la energía renovable sea accesible para todos, mejorar la cadena de suministro de los materiales para desarrollar estas tecnologías, establecer las condiciones políticas que permitan e incentiven las inversiones para proyectos de energías renovables, cambiar los subsidios de combustibles fósiles a energías renovables y triplicar la inversión en estas tecnologías [2].

Y es así que este compromiso por la transición hacia las energías renovables también se ve reflejado en el objetivo 7 de la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, el cual señala la necesidad de garantizar el acceso a una energía sostenible, segura y moderna [3]. En ese sentido, las inversiones en energía limpia han ido aumentando cada año, de tal manera que para el año 2024 se estima que se habrán invertido más de 3 trillones de dólares en energía, de los cuales 2 trillones serán para energía limpia, el restante es la inversión en combustibles fósiles. Es decir que, por cada dólar invertido en combustibles fósiles, se invierten 2 dólares en energía limpia, lo cual representa un aumento importante considerando que hace 5 años la proporción era de uno a uno [4].

Según el último reporte de la Agencia Internacional de Energía, IEA (por sus siglas en inglés), el consumo global eléctrico proveniente de energías renovables aumentó en

más del 7% en el año 2020, mientras que el consumo eléctrico global de fuentes no renovables disminuyó en 2,8 %, esto conllevó a que la fracción de generación eléctrica proveniente de energías renovables en el mundo alcance el 28,2% en ese mismo año [5].

Año tras año, las energías renovables tienen más presencia en el mundo. La Agencia Internacional de Energía Renovable, IRENA (por sus siglas en inglés) muestra una tendencia creciente desde los años 2010 al 2021 en la capacidad instalada para producir energía eléctrica mediante los distintos tipos de energías renovables, tal como se observa en la Figura I. Particularmente, la capacidad instalada con energía solar creció 144 GW en ese mismo periodo [6]. Y también se estima que bajo el escenario propuesto de cero emisiones para el año 2050, se dé un crecimiento promedio anual de 460 GW de capacidad instalada durante los años 2021 al 2030 según la IEA [5].

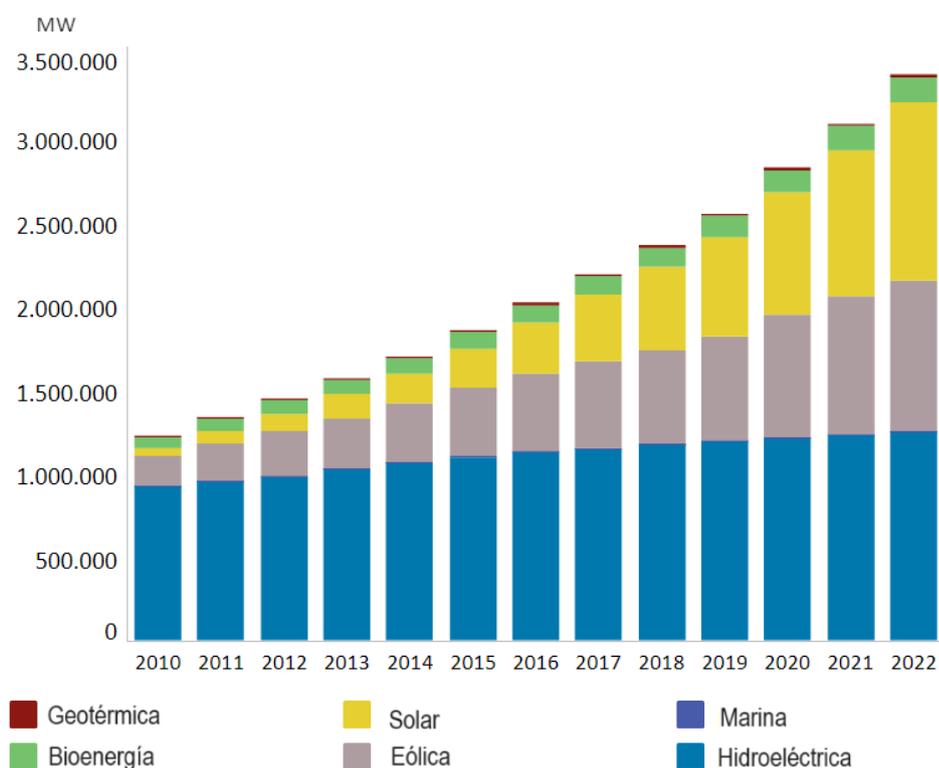


Figura I. Capacidad mundial instalada para producir energía de fuentes renovables [7].

Por su parte, el Perú también ha crecido en el uso de energías renovables, pasando de 10 MW de capacidad instalada en el 2008 a 1030.2 MW en 2018 [8]. Así mismo, al cuarto trimestre del 2022, la producción de energía eléctrica proveniente de fuente

renovable (solar, eólica y biomasa) representó el 5.43% de toda la producción en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional SEIN [9]. En particular, los sistemas fotovoltaicos alcanzaron los 332 MW en el 2022 [6], y en el año 2023 el COES aprobó 32 proyectos de centrales de generación fotovoltaica con los cuales serán 6 425 MW que entrarán en operación comercial en los siguientes 3 años [10].

B. Descripción del problema de investigación

La potencia instalada de sistemas fotovoltaicos aumenta cada año, y esto trae consigo la introducción al mercado de muchos fabricantes de módulos fotovoltaicos, de los cuales se espera que duren por décadas [11]. Debido a que los módulos se degradan a causa de la exposición a la intemperie y la radiación solar, produciendo que los materiales se desgasten y su potencia disminuya [12], es importante conocer el rendimiento de un módulo FV mediante una evaluación que consiste en medir su curva característica corriente versus voltaje, I-V, en condiciones reales de clima y compararla con los datos proporcionados por el fabricante del módulo, los cuales corresponden a condiciones estándar de medida STC (Standard Test Conditions) [13]. La curva I-V de un módulo se obtiene con un dispositivo llamado trazador I-V, lo que permite conocer los parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico, relevantes para el diseño, instalación y mantenimiento de los sistemas FV [14]. En todo ese contexto, el Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER-UNI) viene desarrollando proyectos de investigación y capacitación en energías renovables, que han tenido como resultado la publicación de artículos e implementación de diversos equipos de laboratorio. Uno de estos proyectos, con aportes importantes no solo para el CER-UNI sino en general para la transferencia tecnológica en el Perú, fue el proyecto “Emergiendo con el Sol”, que se desarrolló en colaboración con la Universidad de Jaén de España que buscaba fomentar el desarrollo tecnológico y científico mediante la instalación de sistemas fotovoltaicos y laboratorios de evaluación de calidad en el CER-UNI [15]. Así se implementó un sistema de monitoreo de módulos FV que traza la curva I-V, con el cual se hicieron varios estudios y trabajos que derivaron en artículos y tesis de grado [16],[17]. Sin embargo,

el trazador de curva I-V puede medir módulos fotovoltaicos con una corriente en cortocircuito máxima de 10 A, lo que en la actualidad es una limitante ya que los módulos comerciales alcanzan corrientes mayores a 18 A. Adicionalmente, el traslado de la curva I-V a STC se tiene que hacer en base a varias mediciones, lo cual requiere de más tiempo y el uso de un software adicional y externo al software del trazador.

Es por eso que surge la necesidad y resulta conveniente que se tenga implementado un software en LabVIEW que complemente el sistema de monitoreo del CER UNI mencionado anteriormente y que realice la traslación de una única curva I-V obtenida en condiciones reales de clima hacia STC, en base a un método estandarizado como lo es el de la norma IEC 60891. Así mismo, es importante actualizar los componentes del sistema de monitoreo para permitir que pueda medir módulos de más amperaje. Esto permitiría la evaluación de módulos fotovoltaicos para el desarrollo de estudios y servicios ya que utiliza un método normado internacionalmente y sirve como precedente para la estandarización y comparación de nuevos métodos de traslación propuestos.

C. Objetivos

1) Objetivo general

Diseñar y construir un trazador de la curva I-V de módulos fotovoltaicos hasta 30 A bajo condiciones reales y desarrollar un software para un mejor uso de los datos obtenidos.

2) Objetivos específicos

- Modificar y optimizar la instrumentación del trazador CER-UNI de curvas I-V de módulos fotovoltaicos con nuevos componentes de tal manera que se puedan evaluar módulos de hasta 30A.
- Desarrollar un software para el traslado una curva I-V experimental a condiciones estándar (según IEC 60891).
- Desarrollar un software complementario de visualización y tratamiento de los datos experimentales que permite un mejor uso de los datos.

D. Antecedentes investigativos

En esta sección se describirán una variedad de estudios referidos a trazadores de curva I-V desarrollados para distintas aplicaciones en sistemas fotovoltaicos, además se mencionará brevemente los métodos que dichos trazadores utilizan para el trazado de la curva I-V. Así mismo, se dará a conocer los diferentes estudios existentes y trabajos desarrollados para la traslación de la curva I-V.

1) A nivel mundial

Existen una gran variedad de trabajos relacionados al desarrollo de trazadores de curva I-V, así como también su respectivo software para la adquisición de datos. De acuerdo con las necesidades y el presupuesto, se tienen trazadores con distintos componentes y orientados a distintas aplicaciones. Se han desarrollado trazadores que utilizan una pantalla donde se puede mostrar la curva I-V medida en tiempo real [18], [19]. Otros trazadores no tienen interfaz gráfica donde mostrar la curva, sin embargo utilizan una memoria que permite visualizar los datos posteriormente en una computadora [20]. Además, también se han desarrollado trazadores que utilizan una computadora como interfaz gráfica en tiempo real, lo cual puede ser ventajoso ya que se puede analizar la data y modificar en la misma computadora, sin embargo, estos trazadores no pueden ser portátiles como sí pueden serlo los otros [21].

Por otro lado, se han desarrollado trazadores que pueden obtener la curva I-V de una cadena de módulos fotovoltaicos, es decir que tienen la capacidad de medir voltajes en el rango de 100 a 600 V, ya que en una cadena los módulos se colocan en serie [22],[23], para lo cual se necesita de componentes adecuados. Esta elección de componentes forma parte del dimensionamiento del trazador, es decir, de acuerdo con el tamaño del arreglo se busca los componentes más adecuados para lograr la cantidad de puntos de la curva I-V requerida y no tener curvas incompletas [24].

Los trazadores comerciales, los cuales tienen capacidad para medir arreglos fotovoltaicos en el rango de 1000 V y 20 A, usualmente tienen un costo de miles de euros, por ese motivo, muchas investigaciones se centran en desarrollar trazadores de bajo costo

y portátiles, estos se basan en microcontroladores muy accesibles para la construcción del trazador [25], [26], [27], [28]. Cada trazador de curva IV desarrollado varía en su precisión, costo, componentes y método utilizado, cada uno adecuado a cierta necesidad y asociado a un nivel de complejidad.

2) En Perú

En Perú se tienen dos antecedentes importantes en el desarrollo de trazadores de curva I-V, uno de los cuales es el del Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería [29], en el cual se cuenta desde el año 2014 con un trazador de curva I-V utilizado para estudio y monitoreo de módulos fotovoltaicos. Este se desarrolló en el marco del proyecto “Emergiendo con el Sol” junto con la Universidad de Jaén de España y sirvió para la caracterización de sistemas fotovoltaicos ubicados en el campus de la UNI [15]. Utilizando este trazador Nakama [16] implementó un software que comparaba distintos métodos de traslación tomando como base varias curvas I-V a condiciones reales, y posteriormente propuso un método original para el traslado de la curva I-V de condiciones reales de operación a diversas condiciones de funcionamiento [30].

Así mismo, en la Universidad Pontificia Católica del Perú se puso en marcha un laboratorio para evaluar más de un módulo a la vez, con el cual se puede obtener la curva I-V a condiciones reales de clima y el espectro solar para dicha medida [31]. Así mismo, se utilizó este laboratorio para hacer la caracterización de distintas tecnologías fotovoltaicas, en donde se obtuvieron más de 5000 curvas I-V para dicha evaluación [32].

II. Marco teórico y conceptual

A. Marco teórico

En esta sección se describirán los conceptos relacionados a los módulos fotovoltaicos como dispositivos que convierten la energía radiante del sol a energía eléctrica. Estos conceptos sirven como marco teórico para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

1) Radiación solar

La energía que llega a la tierra proveniente del sol es denominada radiación solar, esta es la que sustenta a la mayoría de la vida en el planeta mediante la fotosíntesis, así mismo, la radiación solar es la que impulsa el clima y el tiempo atmosférico [33].

a) Constante solar

La tasa de energía que emite el sol es del orden de $3,7 \times 10^{26}$ Watts, de la cual una parte es interceptada por la tierra. Esta energía solar disponible fuera de la atmósfera es denominada radiación solar extraterrestre, que varía +/- 3,4 % durante el año (debido a la variación de la distancia sol - tierra). El promedio anual de esta radiación se denomina "constante solar" y tiene un valor aproximado de 1367 W/m^2 [34], [35], [36]

b) Influencia de la atmósfera en la radiación solar

Cuando la radiación solar llega a la superficie terrestre se ve afectada por la atmósfera a su paso, produciéndose así procesos de atenuación, reflexión y difusión que modifican sus características [37]. Se pueden distinguir las componentes de la radiación solar, cada una con una contribución diferente de acuerdo con las condiciones específicas de cada lugar [38].

- Radiación directa: es la que procede en línea recta del sol.
- Radiación difusa: es la proveniente del resultado de la interacción de la radiación con la atmósfera, es decir, la radiación que proviene del cielo que no es del sol.

- Radiación de albedo: es la proveniente de la reflexión de la radiación en el suelo.

Así mismo, se utiliza el término de radiación global horizontal como la suma de la radiación directa y difusa sobre una superficie horizontal.

c) Instrumentos de medición

Los instrumentos para medir la radiación solar, usualmente denominados radiómetros, son importantes para conocer el recurso solar que llega a la tierra. Las mediciones se utilizan para posteriormente desarrollar modelos empíricos para predecir la radiación solar en otros lugares y con estos datos estimar la producción de los sistemas que utilizan la radiación solar como fuente de energía. Estos instrumentos se clasifican a continuación [34], [35].

- Pirheliómetro: es un instrumento que mide la radiación solar directa y de una pequeña porción del cielo alrededor del sol.
- Piranómetro: es un instrumento que mide la radiación difusa y directa procedente de todo el hemisferio.

Además, el estándar ISO 9060 [39] especifica los requerimientos mínimos de rendimiento para los piranómetros y pirheliómetros, clasificándolos según tiempo de respuesta, linealidad, inestabilidad, respuesta direccional en el caso de piranómetros, respuesta espectral, respuesta de temperatura, entre otros. Esto es importante ya que para cada tipo de aplicación se requerirán cierto tipo de características más que otras.

Idealmente se requiere que los radiómetros tengan una respuesta plana en un rango espectral para medir toda la energía solar, independientemente del tipo de panel solar utilizado. La respuesta dependerá del principio físico de medición, los piranómetros por ejemplo, utilizan un sensor termoelectrónico para medir la radiación solar. También existen sensores fotoeléctricos como las celdas solares y fotodiodos que se utilizan para medir la radiación, sin embargo, estos tienen una respuesta espectral desigual, y no cumplen los requerimientos establecidos en la ISO 9060 [39], [40].

2) Curva I - V de una celda solar fotovoltaica

Los dispositivos eléctricos bipolares, llamados “diodos”, con uniones de semiconductores tipo p y tipo n, así como también con uniones metal - semiconductor, tienen un comportamiento eléctrico que se ve reflejado en la Figura II en su representación de corriente voltaje I - V [41]. Cuando estos dispositivos se encuentran bajo iluminación, la curva I-V se desplaza paralelamente al eje de la corriente, tal como se muestra en la Figura III [36]. Esto resulta en que la curva I-V cubra el cuarto cuadrante donde la potencia eléctrica $P = I \cdot V$ es negativa, lo que significa que se puede extraer energía del dispositivo [42]. Este fenómeno es llamado “efecto fotovoltaico” y los diodos construidos con este objetivo se llaman “celdas fotovoltaicas”, o “celdas solares”.

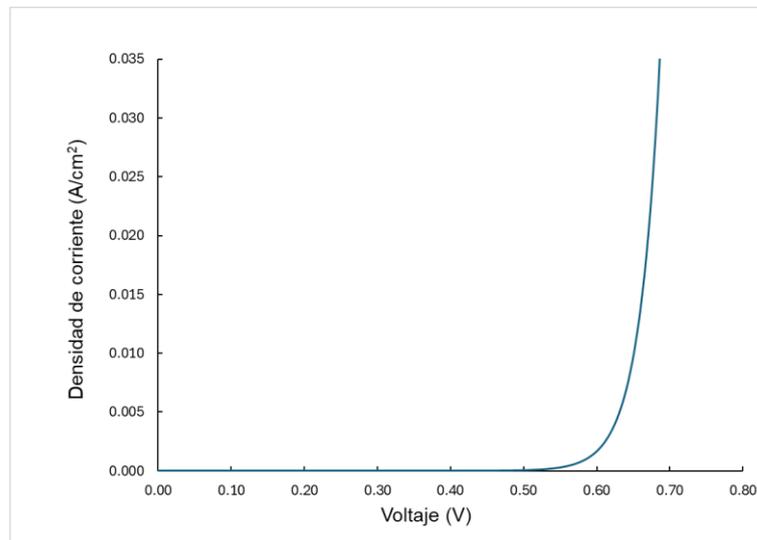


Figura II. Curva de voltaje - corriente de un diodo.

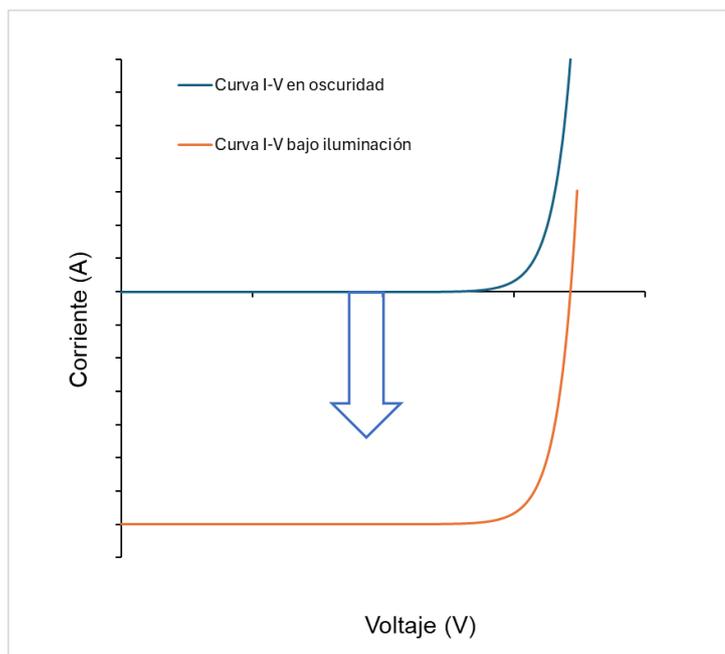


Figura III. Desplazamiento de la curva I-V cuando está en iluminación.

Las celdas solares, gracias al efecto fotovoltaico, pueden ser utilizadas para convertir la radiación solar en energía eléctrica [36]. Este comportamiento eléctrico se ve representado en su denominada curva I - V. La Figura IV representa la curva I - V típica de una celda solar, así como también la curva de potencia, $P = I \cdot V$, versus voltaje V, en la cual se señala el punto de la curva donde se da la máxima potencia. Este valor es importante ya que indica que se debe operar al dispositivo a tales condiciones de operación para obtener el máximo rendimiento posible.

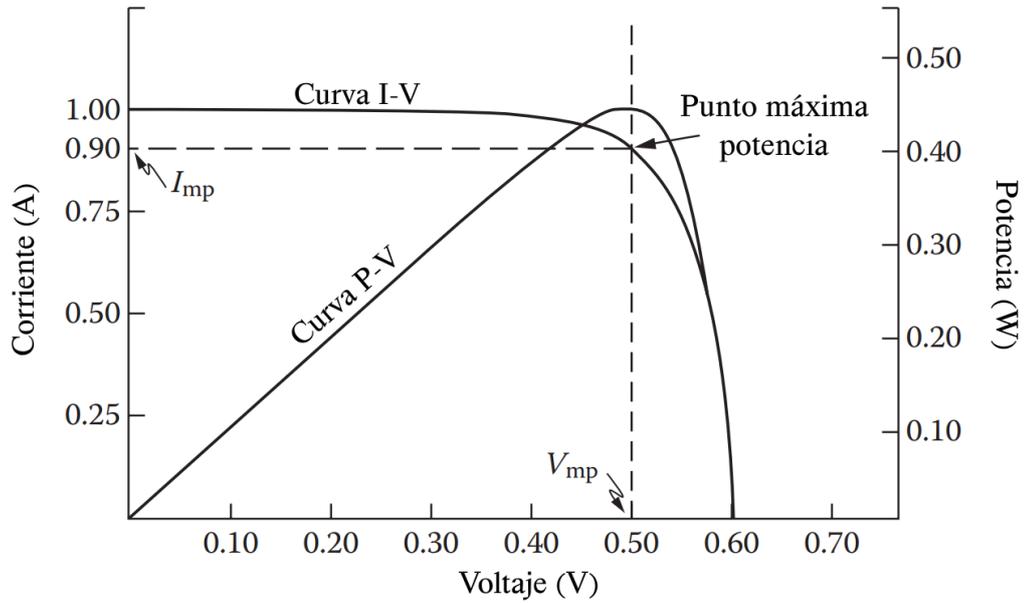


Figura IV. Curva I - V y P - V típicas de una celda solar irradiada [43].

3) Circuito equivalente de una celda solar fotovoltaica

En el análisis del comportamiento de una celda solar es conveniente modelar la celda como un conjunto de componentes que tendrían una respuesta equivalente. Una celda solar real puede considerarse como una fuente de corriente constante puesta en paralelo con un diodo y una resistencia, y puesta en serie con otra resistencia [42], tal como se muestra en la Figura V.

De esta representación y considerando la ecuación ideal del diodo se obtiene la Ecuación 1.

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

En esta ecuación I_L representa la corriente fotogenerada por la celda, I_0 es la corriente de saturación en oscuridad del diodo, V_T representa el factor kT/q donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura de la celda y q es la carga del electrón, n es el factor de idealidad del diodo, R_s y R_p son las resistencias en serie y paralelo respectivamente, y finalmente I representa la corriente y V el voltaje de la celda solar.

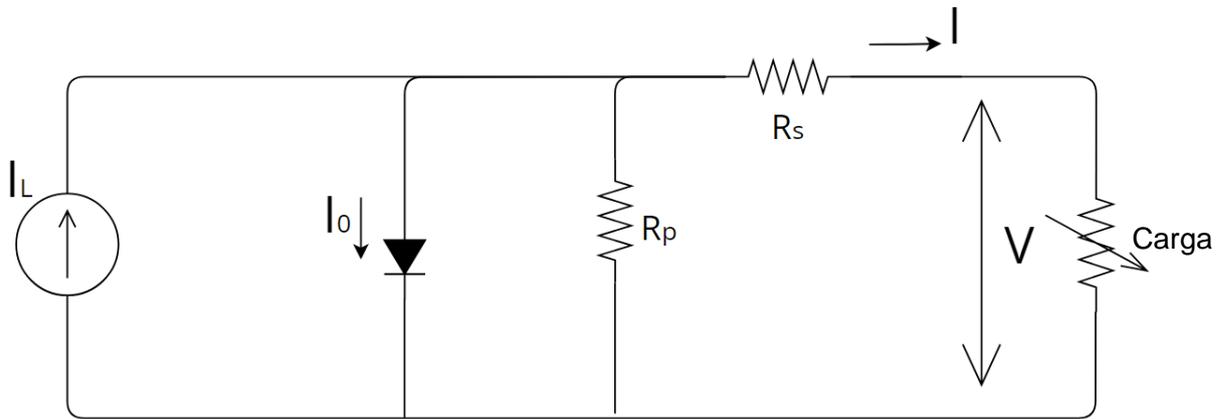


Figura V. Circuito equivalente de una celda solar.

Este circuito equivalente muestra que la juntura en la celda está representada por el diodo, R_s y R_p , donde R_s es la agrupación de todas las resistencias internas en serie, y R_p , la resistencia en paralelo, es el resultado de fuga de corrientes en los bordes de la celda solar [37].

4) **Parámetros característicos del módulo fotovoltaico**

El módulo fotovoltaico es la asociación de varias celdas solares iguales conectadas en serie y paralelo, de conductores, protecciones eléctricas y de una estructura de soporte. Eléctricamente tiene un comportamiento equivalente a la ecuación y el circuito descritos anteriormente [33]. El voltaje del módulo será en principio la suma de los voltajes de cada una de las celdas conectadas en serie, y la corriente será el número de celdas en paralelo multiplicado por la corriente de cada una. Sin embargo, en su mayoría, los módulos están conformados solo por celdas en serie. La potencia es teóricamente la suma de las potencias de cada una de las celdas, sin embargo, siempre existen pérdidas, en este caso óhmicas, ópticas, entre otras, las cuales reducen la potencia del módulo [44].

Según la IEC 61215-1 [45], los fabricantes deben brindar los parámetros eléctricos representativos de la curva I-V del módulo fotovoltaico a condiciones estándar de medida

STC (Standard Test Conditions). Estas condiciones son de una irradiancia de 1000 W/m^2 , temperatura de la celda de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y una masa de aire de 1.5 [46].

Estos parámetros requeridos por la IEC son el voltaje de circuito abierto (V_{OC}), la corriente de cortocircuito (I_{SC}), la potencia máxima (P_{MAX}), la corriente de máxima potencia (I_{MPP}), el voltaje de máxima potencia (V_{MPP}), así mismo también se requieren los coeficientes de temperatura para el voltaje de circuito abierto, corriente de cortocircuito y potencia máxima. El Anexo 1 muestra una ficha técnica típica de un módulo fotovoltaico.

Es importante señalar que las condiciones reales de clima diferirán en la mayoría de las veces de las condiciones STC, haciendo que la producción del módulo fotovoltaico sea diferente a lo indicado por el fabricante, ya que existe una influencia de la irradiancia y la temperatura sobre los parámetros eléctricos del módulo. Sin embargo, los valores dados a STC se consideran referenciales para a partir de ellos estimar la producción real del módulo. En la Figura VI se muestra la influencia de la irradiancia y temperatura sobre la curva I-V del módulo fotovoltaico.

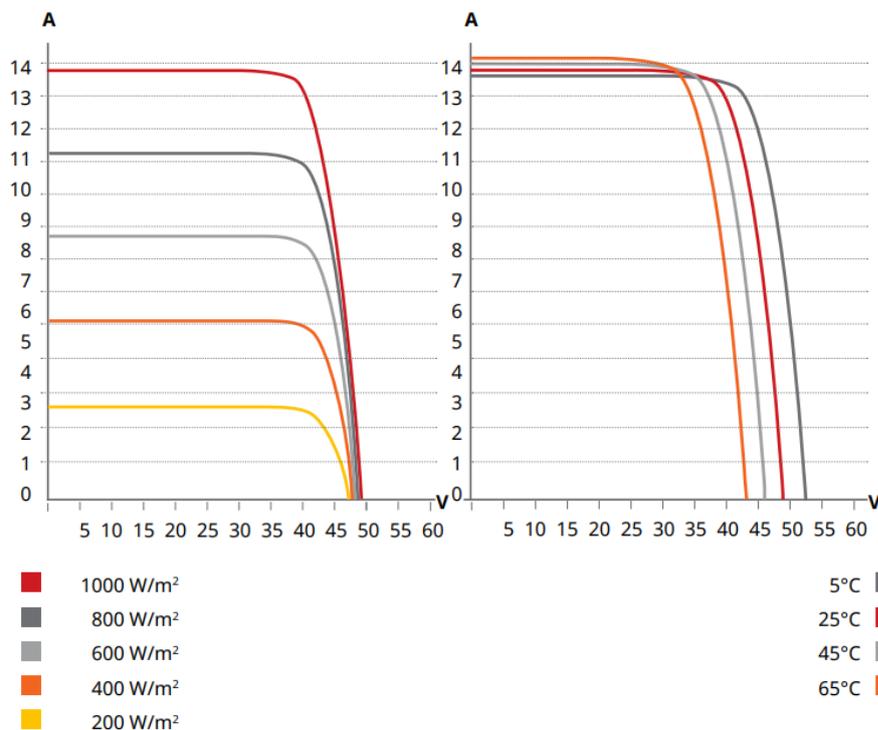


Figura VI. Variación de la curva I-V de un módulo fotovoltaico dependiendo de la temperatura e irradiancia. A la izquierda, las curvas a temperatura constante. A la derecha, las curvas a irradiancia constante [47].

B. Marco conceptual

1) Métodos de obtención de la curva I-V

La obtención de la curva I - V es importante ya que provee información acerca de las deficiencias en un módulo fotovoltaico, tales como daños en el material, corto circuitos en los diodos de derivación del módulo, sombreados parciales, aumento en las resistencias en serie y paralelo. En esta sección se detallarán las condiciones a tener en cuenta en la obtención de la curva I-V de una celda y/o módulo FV. Asimismo, se describirán los métodos más comunes que se utilizan para la obtención de la curva I - V, mostrando sus diferencias y ventajas entre sí. Finalmente, se realizará una síntesis de los equipos comerciales que se utilizan en la actualidad para el trazado de la curva I - V.

El equipamiento general para la obtención de la curva I - V se puede representar en distintos bloques de componentes, los cuales se muestran en la Figura VII. El bloque de adquisición de datos de corriente voltaje, en el que también se puede incluir la adquisición de datos ambientales de ser necesario. El bloque de control es el responsable de la variación de la carga y sincronización de las medidas. La carga variable o también llamada impedancia variable es la que permite hacer el barrido por toda la curva I-V [48], [49]. Los métodos posibles para la carga variable son: resistores variables, fuentes de voltaje, convertidores DC/DC, cargas electrónicas y cargas capacitivas [11], [13], [14], [48]. Estos métodos se describirán con más detalle a continuación.

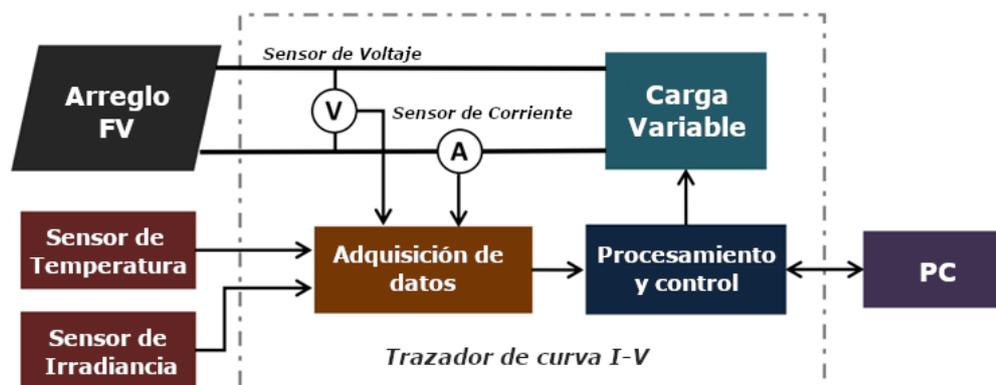


Figura VII. Diagrama general de un trazador de curva I-V [48].

a) Método de la carga resistiva variable

El método más sencillo de medir la curva I - V es utilizar una resistencia variable. La Figura VIII muestra el esquema general de este método. La resistencia puede ser un reóstato en el cual se varía su resistencia manualmente tal como se utiliza en [50] o un arreglo de resistencias [51], [52] de tal manera que se pueda modificar el valor de la resistencia desde cero hasta infinito. En cada salto del valor de la resistencia se obtiene un punto de la curva I - V. Cuando la resistencia es cero, el módulo fotovoltaico se encuentra en corto circuito, mientras que cuando la resistencia se hace infinito, se logra el circuito abierto [14].

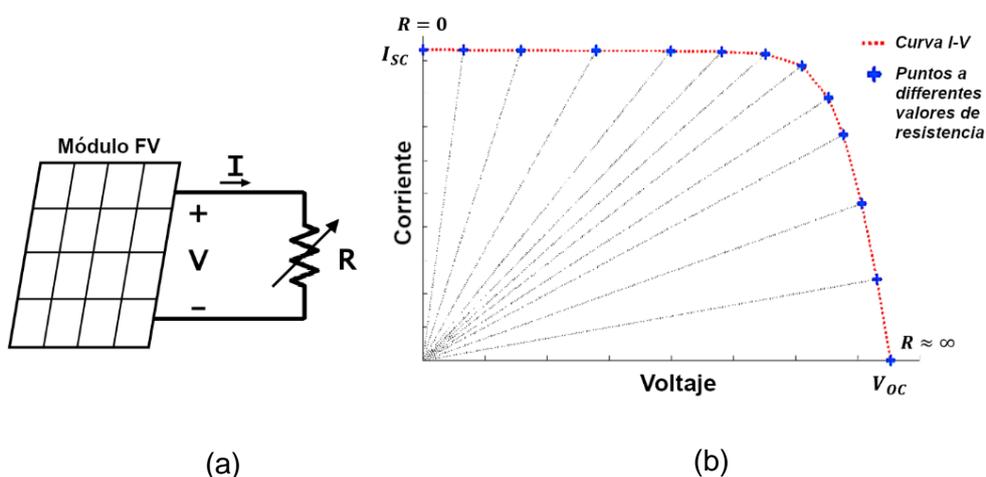


Figura VIII. Método de carga resistiva. (a) Esquema general del método. (b) Obtención de los puntos de la curva I - V con el método [48].

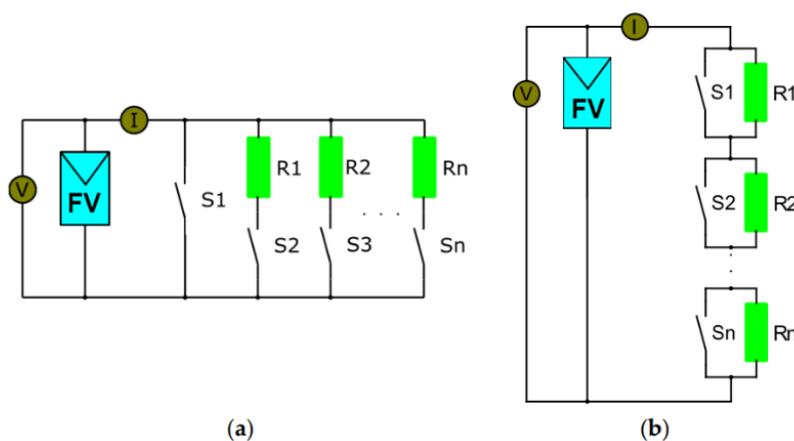
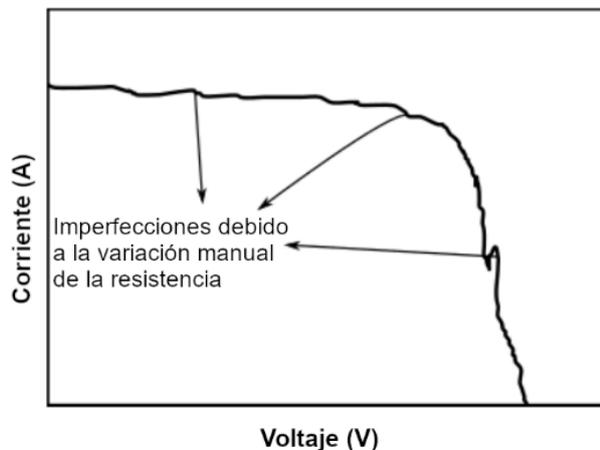
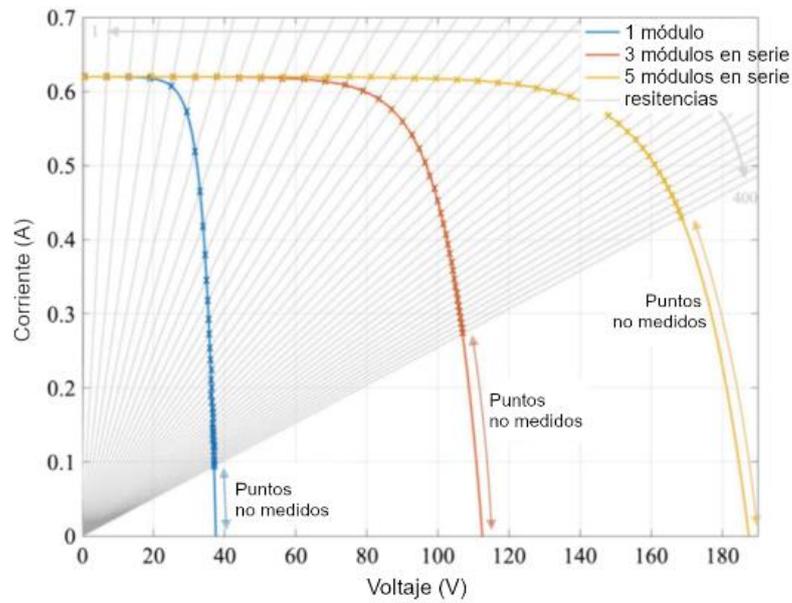


Figura IX. Esquema del método de la carga resistiva variable utilizando varias resistencias (a) en paralelo, (b) en serie [13].

El principal inconveniente con este método es que su uso en general solo es para bajas potencias, es decir, en el orden de módulos fotovoltaicos individuales, esto debido a que las resistencias para potencias más altas no son tan comunes, y esto es importante ya que la resistencia debe disipar la energía generada por el arreglo FV. Así mismo, no es recomendable su uso debido a que no se puede obtener como tal la corriente de cortocircuito [13], [14] y es complicado distribuir los puntos de medida por toda la curva cuando se varía el tamaño del arreglo FV, tal como se muestra en la Figura Xb [11]. Otra desventaja de utilizar cargas resistivas es la calidad de la curva obtenida debido cuando la variación de la carga resistiva se hace manualmente [13], [50]. La Figura Xa muestra un ejemplo de esto. Y esto es debido a que la precisión se ve afectada por la variación de la irradiancia y temperatura durante la medida, en consecuencia, no hay uniformidad en la curva [14]. Sin embargo, cuando se implementan múltiples resistencias junto con interruptores (ver Figura IX) de tal manera que conectándolos y desconectándolos controladamente se tenga un amplio margen de resistencias equivalentes, se puede mejorar la calidad y reducir el tiempo del trazado de la curva I - V [51], [52].



(a)



(b)

Figura X. Defectos en la curva I - V obtenida con el método de la carga resistiva. (a) Curva sin uniformidad. (b) Puntos faltantes. Mod. de [11], [13].

Como se ha mencionado, el uso de este método tiene varias desventajas en el trazado de la curva I - V, sin embargo, a pesar de ello, debido a su simpleza, su bajo costo y facilidad de implementación, lo hace un método muy interesante y viable para aplicaciones académicas y en las que se desee obtener un rango específico de la curva.

b) Método de la carga capacitiva

Este método consiste en utilizar una carga capacitiva como dispositivo que varía su impedancia al cargarse. Cuando el capacitor está inicialmente descargado y se le aplica voltaje en sus terminales, su carga empieza a aumentar proporcionalmente al voltaje, empezando en un estado de corto circuito hasta llegar al circuito abierto al final de la carga, es decir que la corriente disminuye mientras el voltaje aumenta [53], como lo muestra la Figura XI y la Figura XIII. El proceso de carga del condensador permite hacer el barrido de la curva automáticamente, es decir que se hace el trazado pasivamente a diferencia de los otros métodos en los cuales se tiene que generar el barrido de la curva punto por punto [18].

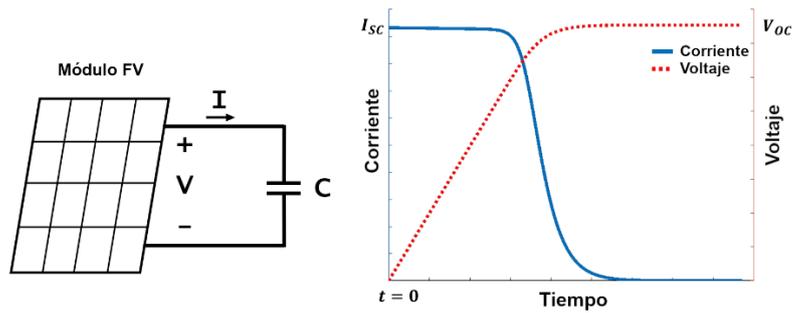


Figura XI. Método de carga capacitiva. (a) Esquema general del método. (b) Curva de corriente y voltaje del capacitor durante la carga [48].

El arreglo utilizado usualmente para este método es el que se muestra en la Figura XII en el cual se considera una resistencia de descarga que es necesaria para que el capacitor se descargue y permite realizar la siguiente medida [54], el proceso de carga y descarga es controlado por interruptores. La Figura XII se presenta un esquema también utilizado, en el cual se añade una fuente de voltaje DC con el objetivo de precargar negativamente el capacitor, de tal manera que al conectarlo al arreglo FV la curva I-V pueda cruzar por el punto en el que se da la corriente de cortocircuito [13], [14], [48].

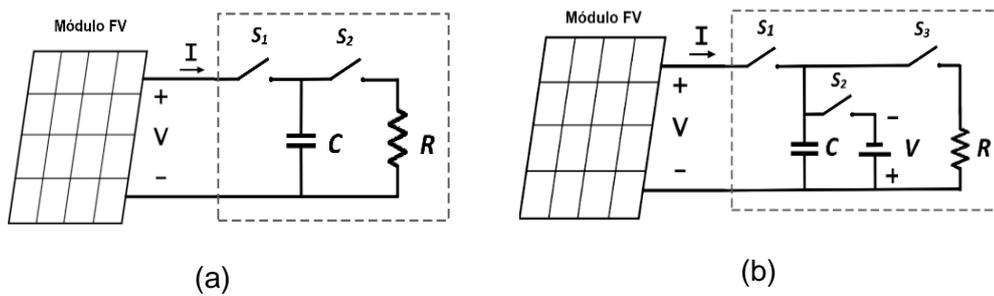


Figura XII. Esquema del método de carga capacitiva (a) considerando una resistencia de descarga, y (b) añadiendo una fuente para precarga negativa [14], [48], [49].

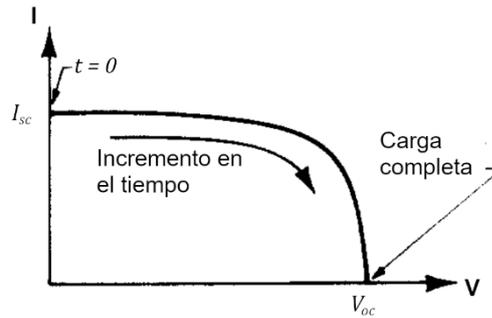


Figura XIII. Formación de la curva I-V considerando la carga del capacitor [53].

Una de las ventajas de este método es que se puede trazar la curva I-V en un tiempo muy corto (en el orden de unos cientos de milisegundos) lo que conlleva a obtener una curva uniforme. El tiempo de trazado (t_s) será prácticamente el tiempo de carga del capacitor. Haciendo un análisis matemático, se ha determinado que el tiempo de trazado es directamente proporcional al V_{oc} e inversamente proporcional a I_{sc} . Según [54], [55] el tiempo de trazado puede estimarse de la Ecuación 2 en donde C es la capacitancia. Así mismo en [56] el tiempo de trazado está dado en la Ecuación 3, mientras que en [57] se da según la Ecuación 4 en donde se incluyen el número de celdas en serie (N_s) y el número de celdas en paralelo (N_p). Estas diferencias en las ecuaciones se deben al modelo matemático utilizado y a las condiciones de cada caso, sin embargo, cualquiera de estas ecuaciones son una referencia válida para calcular la capacitancia requerida para cada aplicación, ya que el banco de capacitores se dimensiona para ajustar el tiempo de medida con la resolución de los instrumentos [11].

$$C = \frac{t_s}{2} \frac{I_{sc}}{V_{oc}} \quad (2)$$

$$t_s = 1.261 \cdot \frac{V_{oc} \cdot C}{I_{sc}} \quad (3)$$

$$C = 0.55 \cdot t_f \cdot \frac{I_{sc} \cdot N_p}{V_{oc} \cdot N_s} \quad (4)$$

Debido al costo de implementación, este es uno de los métodos más utilizados en los trazadores comerciales ya que son escalables desde módulos FV hasta un nivel de arreglos FV [55], [57], incluso es usado para los trazadores que se instalan directamente en las cajas de combinación de los arreglos fotovoltaicos de las plantas solares, de tal manera que se pueda medir la curva I-V regularmente [13], [58]. Así mismo, no hay disipación de energía en el momento del trazado ya que la energía se almacena en el capacitor, el cual luego se descargará de manera controlada en una resistencia [49], y esto conlleva a que este método sea bastante robusto [59].

c) Método de la carga electrónica

El método de la carga electrónica utiliza un transistor como dispositivo de carga variable. Entre los más comunes está el transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor, más conocidos como MOSFET, el transistor de unión bipolar BJT o un transistor bipolar de puerta aislada, IGBT [11], [48]. Para este método se aprovecha la variación de la resistencia entre los terminales de Drenaje-Fuente del transistor al variar el voltaje en los terminales Puerta-Fuente del transistor, esto en el caso del MOSFET y IGBT, mientras que en el caso del BJT se variará la corriente [11]. El esquema básico de este método se muestra en la Figura XIV.

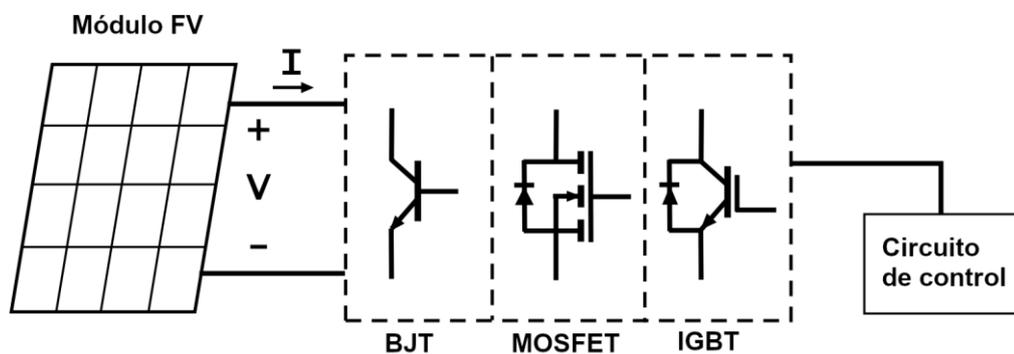


Figura XIV. Circuito básico del método de la carga electrónica.

La carga electrónica que usualmente se emplea es el MOSFET, cuando se empieza a incrementar el voltaje en la puerta del transistor, se genera una corriente que aumenta

hasta la corriente de corto circuito I_{sc} [60], la Figura XV muestra la intersección de los puntos de operación del transistor con los del dispositivo FV. El trazado de la curva I-V se puede hacer en un tiempo muy corto del orden de decenas de milisegundos [61], lo que mejora las condiciones de trazado y así mismo previene el sobrecalentamiento del transistor, sin embargo, una de las desventajas del método de la carga electrónica es que el transistor que se use debe disipar la potencia generada durante el trazado de la curva I-V, lo que puede causar que se supere la temperatura máxima de trabajo del transistor, y esto significa que para aplicaciones a mayores potencias se tienen que usar componentes adicionales para operar en su rango adecuado [62].

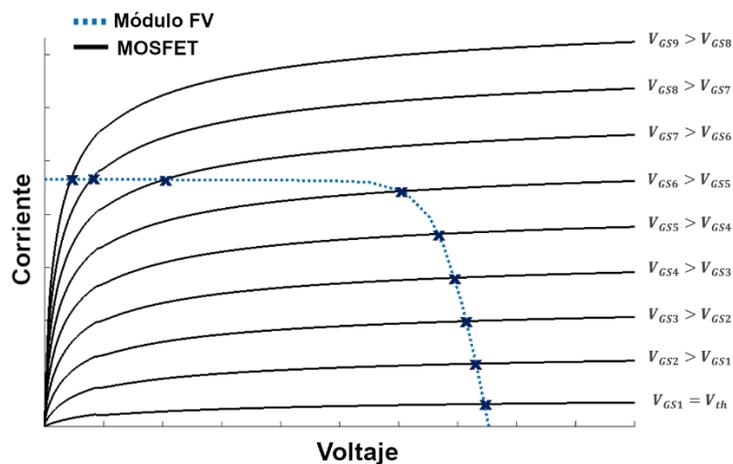


Figura XV. Comparación de la curva I-V con las curvas de operación de un MOSFET [11].

d) Método del convertidor DC-DC

Un convertidor DC-DC es un circuito electrónico que puede modificar el voltaje DC de su entrada a otro valor de voltaje DC en su salida, esto se logra a través de una modulación por ancho de pulso (PWM) [48]. El método DC-DC consiste en variar el voltaje del generador FV, desde cero hasta el voltaje de circuito abierto V_{OC} , mediante el control del ciclo de trabajo aplicado al convertidor DC-DC [63]. De esta manera el convertidor DC-DC puede emular una resistencia variable para poder realizar el trazado de la curva I-V [64]. El esquema básico de este método se muestra en la Figura XVI.

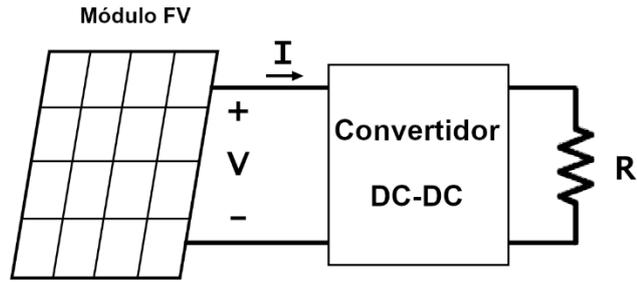


Figura XVI. Esquema del método DC-DC. Resistencia equivalente vista desde el generador FV [63].

e) Método de suministro de energía de cuatro cuadrantes

Una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes es un dispositivo que puede entregar y consumir energía eléctrica, es decir que puede operar en voltajes positivos y negativos. Usualmente se utilizan para simular cargas en CC, arreglos fotovoltaicos y baterías [11], [13], [14]. Este dispositivo puede ajustar su punto de operación a un determinado voltaje en cualquiera de los cuatro cuadrantes, de modo que se configura para estar polarizado negativamente de tal manera que la curva I-V cruce el eje y se pueda medir la corriente de cortocircuito, y luego se aumenta el voltaje hasta que consiga el punto del voltaje en circuito abierto V_{oc} [49]. La Figura XVII muestra el esquema básico de este método.

Este método es el más rápido en hacer el trazado de la curva I-V y el más preciso de los métodos anteriores, además todo el control se puede programar, sin embargo, su principal desventaja es que es muy costoso y pesado, lo cual lo hace inviable para aplicaciones portátiles, es por ello que este método se ha limitado a aplicaciones de laboratorio [11].

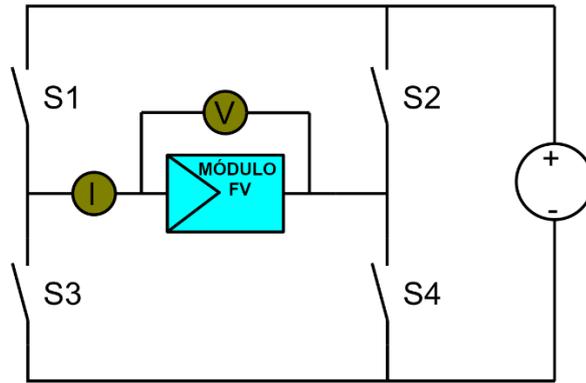


Figura XVII. Esquema del método de cuatro cuadrantes [11].

f) Trazadores I - V comerciales

Dentro de la gran variedad de productos comerciales utilizados para trazar la curva I - V de un dispositivo fotovoltaicos hay los que tienen una alta resolución debido a que su aplicación está orientada a la investigación para el desarrollo de celdas fotovoltaicas y con propósito de inspección de calidad, tal como lo es el trazador de EKO modelo MP-180 [65].

Por otro lado, los trazadores para sistemas fotovoltaicos comerciales se utilizan para medir la curva I-V de todo un arreglo fotovoltaico durante un mantenimiento, es decir, que tienen que medir en un rango de voltaje hasta alrededor de 1000V. Este tipo de trazadores deben ser portátiles para hacer mediciones módulo por módulo en caso de que se requiera hacer una detección de fallas, tal es el caso del trazador I-V500W de la marca HT Italia [66], el analizador FV SMFT-1000 de Fluke [67], o el trazador PVA-1500 de la misma marca Fluke [68].



Figura XVIII. Trazador de curva I - V portátil I-V400W.

2) Normativas de referencia

En esta sección se describirán las normativas relacionadas a la medición de la curva I - V de los dispositivos FV, así como también la normativa para el traslado de la curva I - V a condiciones STC. Las normas que se describirán forman parte de todo un conjunto de normas elaboradas por el Comité Técnico 82 de la Comisión Electrotécnica Internacional, IEC (por sus siglas en inglés). Este comité fue el encargado de elaborar los estándares internacionales para los sistemas de conversión fotovoltaica de energía solar a energía eléctrica y para todos los equipos relacionados a los sistemas de energía fotovoltaica.

a) IEC 60904-1

El estándar IEC 60904 en general describe lo referente a los dispositivos FV, en específico el estándar IEC 60904-1:2020 [69] describe los procedimientos para la medición de la curva característica de Corriente-Voltaje (I - V) de los dispositivos FV bajo luz natural o simulada, así mismo estos procedimientos son aplicables para celdas FV, módulos FV, y también para arreglos FV. Es importante señalar que este estándar aplica para dispositivos FV single-junction y monofaciales.

El estándar empieza con las generalidades para luego describir las condiciones que se deben tener en cuenta para la medición. En este punto se menciona que cuando se hace la medida con la intención de hacer un reporte a STC, la irradiancia durante la medición debe estar entre 800 W/m^2 y 1200 W/m^2 para minimizar errores en la traslación a STC. Más adelante se mencionan los equipos a utilizar para la medición, entre estos están el sensor de irradiancia, el sensor para medir la temperatura de la celda el cual debe tener una incertidumbre de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ como máximo, los sensores de corriente y voltaje que deben tener una incertidumbre máximo de $0,2\%$ de la corriente de corto circuito y el voltaje en circuito abierto respectivamente, y para mediciones con simuladores solares se describe que clase deben tener estos. Finalmente se describe el procedimiento detallado de la medición tanto para luz natural como con luz simulada (simulador solar).

b) IEC 61829:2015

Este estándar internacional especifica los procedimientos para la obtención in-situ de la curva I - V de un arreglo FV, junto con mediciones meteorológicas que luego se usarán para el traslado hacia las condiciones STC u otra condición requerida [70].

La justificación de este estándar es que la medición in-situ junto con la traslación a las condiciones deseadas puede proveer datos para verificación de la potencia instalada, detección de diferencias entre las características del módulo in-situ y sus características según las mediciones del fabricante en laboratorio, detección de posible degradación de los módulos FV con respecto a cuando recién se instalaron, detección de fallas en los módulos o disminución en su rendimiento.

c) IEC 60891:2021

La norma IEC 60891:2021 [71] tiene como propósito definir procedimientos para trasladar la curva I-V de un módulo fotovoltaico, medida bajo ciertas condiciones de irradiancia y temperatura, a otras condiciones de irradiancia y temperatura. En la norma se detallan 4 procedimientos para esta traslación. Los tres primeros procedimientos requieren de más de una curva para obtener la curva a las condiciones de irradiancia y temperatura deseadas, ya que para hacer esta traslación se necesitan conocer otros parámetros que

se tienen que hallar utilizando más de una curva I-V. Sin embargo, en el año 2021 la IEC 60891 incorporó un cuarto método el cual permite el traslado de la curva utilizando una única curva I-V medida. Este método, que originalmente fue propuesto por [72], calcula la resistencia en serie (R_s) del módulo utilizando los puntos medidos de corriente (I_1) y voltaje (V_1) según la Ecuación 9, así como la irradiancia (G_1) y temperatura (T_1), que luego se usarán en las ecuaciones para trasladar la curva primero por irradiancia y posteriormente por temperatura del módulo. Las ecuaciones para el traslado se muestran a continuación:

$$I'_1 = I_1 + I_{sc1} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) \quad (5)$$

$$V'_1 = V_1 + R_s \cdot (I'_1 - I_1) \quad (6)$$

$$I_2 = I'_1 + \alpha \cdot I'_{sc1} \cdot (T_2 - T_1) \quad (7)$$

$$V_2 = V'_1 + \frac{T_2 - T_1}{T_1} \cdot (V'_1 - N_c \times \varepsilon) \quad (8)$$

Con la Ecuaciones 5 y 6 se hace un primer traslado por irradiancia, obteniendo los puntos de corriente (I'_1) y voltaje (V'_1), posteriormente con las Ecuaciones 7 y 8 se traslada la curva por temperatura, obteniendo los puntos de corriente (I_2) y voltaje (V_2), los cuales corresponden a una curva con condiciones de irradiancia (G_2) y temperatura (T_2).

Nótese que para el traslado de la curva se utiliza el coeficiente de temperatura α de la corriente de cortocircuito I_{sc} , el número de celdas en serie del módulo N_c , y ε que se define como $n \cdot E_g / q$ donde n es la constante de idealidad, E_g el *band gap* del material y q la carga del electrón.

Para el cálculo de la resistencia en serie se utiliza la Ecuación 9, donde (V_a , I_a) y (V_b , I_b) son los pares de voltaje y corriente de dos puntos A y B respectivamente de la curva medida. Se debe graficar $-(V_a - V_b) / (I_a - I_b)$ versus $\{ \ln(I_{sc} - I_a) - \ln(I_{sc} - I_b) \} / (I_a - I_b)$, los

puntos A y B se eligen de las zonas de voltaje más alto, ya que la región de bajo voltaje de la curva no se ve influenciada con la resistencia en serie de manera significativa. Con la recta formada, el intercepto con el eje y representa la resistencia en serie.

$$-\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = -\frac{N_c n k T}{q} \left[\frac{\ln(I_{sc} - I_a) - \ln(I_{sc} - I_b)}{I_a - I_b} \right] + R_s \quad (9)$$

Y con esto se obtiene la curva I-V trasladada a partir de una sola curva.

III. Desarrollo del trabajo de investigación

A. Trazador de curva I - V del CER - UNI

El trazador de curva I - V del CER - UNI que fue desarrollado como parte del proyecto “Emergiendo con el Sol”, tal como se mencionó en el primer capítulo de la presente tesis, utiliza el método de la carga capacitiva para obtener la curva característica del módulo FV. Este trazador está compuesto por el bloque de adquisición de datos, el circuito de potencia en donde se encuentra el capacitor y el bloque de control para el procesamiento de datos y control del proceso. A continuación, se detallan los componentes incluidos en cada parte del trazador y su función.

1) Bloque de adquisición de datos

Este bloque es el encargado de la medición de los parámetros importantes para la curva I - V, es decir la corriente y el voltaje, así mismo, también se han incluido sensores de irradiancia y de temperatura para monitorear las condiciones ambientales a las que se ha hecho la medida. La medición de corriente y voltaje se hace con dos multímetros.

a) Resistencia Shunt

La resistencia Shunt, una resistencia de precisión y de bajo ohmios, servirá para medir la corriente de manera indirecta: lo que se mide es la caída de voltaje en los terminales de la resistencia y de esta manera se obtiene el valor de la corriente ya que se conoce el valor de la resistencia. La resistencia utilizada para el trazador es una resistencia de $6\text{ m}\Omega$, esto quiere decir que al pasar una corriente de 10 A la tensión en la resistencia caerá 60 mV . La Figura XIX muestra la resistencia shunt utilizada.



Figura XIX. Resistencia shunt 60 mV 10 A.

b) Multímetro digital Agilent 34411A

Para la medición de la corriente y voltaje se tienen dos multímetros digitales Agilent 34411A debido a que son programables a través de lenguaje SCPI al conectarse a la computadora, así mismo el uso de estos multímetros obedece a que se debe tener una alta resolución para medir la caída de tensión en la resistencia shunt. Este multímetro además es capaz de hacer mediciones a altas velocidades, que es lo que se tiene al utilizar el método de la carga capacitiva, llegando a medir hasta 50000 muestras por segundo, y esta característica es importante, ya que debido a que el tiempo de trazado para el método de carga capacitiva varía de acuerdo al voltaje en circuito abierto y corriente de corto circuito, entonces cada medida puede tener un tiempo de trazado distinto, y con el bloque de control se configura el número de muestras por segundo de acuerdo al tiempo de trazado de tal manera que se obtenga la curva I - V completa. La Figura XX muestra el multímetro utilizado para el trazador del CER - UNI.



Figura XX. Multímetros Agilent 34411A utilizado para la medida de corriente y voltaje.

c) *Sensores de temperatura Pt100*

Aunque para la medida de la curva I - V no es necesario una medida de temperatura, siempre es recomendable tener los datos de temperatura del módulo y la temperatura ambiente, esto debido a que la curva I - V varía con la temperatura y el resultado de la curva I - V debe ser presentado en sus respectivas condiciones ambientales. Para este caso se han utilizado 3 sensores de temperatura Pt100 de 4 hilos, dos para los módulos FV y uno para la temperatura ambiente. Este tipo de sensor puede medir la temperatura debido a que su resistencia cambia linealmente con la temperatura, su denominación es debido al material ya que están hechos de platino, y el número 100 indica el valor de la resistencia del sensor a 0 °C, esto es 100 Ω . Al circular una corriente constante y conocida por el sensor, la caída de tensión sobre la resistencia es proporcional a la resistencia. Los sensores de 4 hilos, que tienen dos hilos para suministrar la corriente y dos hilos para medir la caída de tensión, tienen mayor precisión ya que la medición de la tensión sobre la resistencia es independiente de la resistencia del cable que suministra la corriente. La Figura XXI muestra el sensor Pt100, que en este caso está encapsulado en un material tipo parche de silicona, lo cual facilita la medida en la parte trasera del módulo FV.



Figura XXI. Sensor de temperatura Pt100 de 4 hilos tipo parche de silicona.

d) Sensores de irradiancia

La medida de irradiancia es importante ya que la curva I - V también depende de las condiciones de irradiancia. En este caso se tiene un sensor para medir la irradiancia coplanar al módulo en evaluación, y otro sensor para la irradiancia horizontal. Los sensores utilizados son celdas fotovoltaicas, a las cuales se les ha puesto en corto circuito y colocándole una resistencia shunt se mide la caída de voltaje en la resistencia, la cual es proporcional a la irradiancia. Estas celdas deben ser previamente calibradas para obtener la relación entre voltaje e irradiancia. La Figura XXII muestra el modelo de la celda FV utilizada como sensor de irradiancia.



Figura XXII. Celda FV para medir irradiancia.

e) Registrador de datos Agilent 34970A

Este dispositivo es un sistema de adquisición de datos programable en el cual se conectan los sensores de temperatura e irradiancia. Además, este forma parte del sistema

de control ya que se conecta a la computadora y se programa para ejecutar las señales para iniciar el proceso de medición. En la Figura XXIII se muestra este dispositivo.



Figura XXIII. Registrador de datos Agilent 34970A.

2) Circuito de potencia

Esta parte del trazador contiene los componentes eléctricos para realizar el trazado de la curva I-V, es decir, el proceso de carga del condensador, así como la descarga de este. Además, se incluye una precarga negativa para el capacitor con el objetivo de obtener el valor de la corriente de cortocircuito. En la Figura XXIV se muestra una foto del circuito de potencia, este consta del capacitor, relés, una resistencia de descarga y la resistencia shunt.

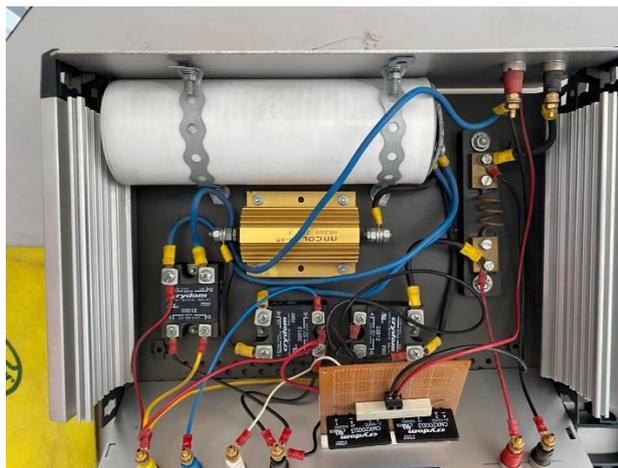


Figura XXIV. Circuito de potencia.

a) Capacitor

Se tiene un capacitor de 15 mF, con un voltaje máximo de 250 V en DC. Este tamaño del capacitor hace que se puedan evaluar la mayoría de módulos FV debido a que el tiempo de trazado es menor que un segundo, sin embargo, para evaluar arreglos de módulos FV hay que tener en cuenta que el tiempo de trazado no es constante, sino que depende los parámetros eléctricos del módulo en evaluación y en consecuencia se pueden tener tiempo de trazado muy grandes que no garanticen condiciones ambientales constantes.

b) Relés

Se utilizaron relés de estado sólido los cuales actúan como interruptores para conectar y desconectar el capacitor de los demás componentes durante el proceso de medición. Se han utilizado 3 relés de capacidad de hasta 200 V y 12 A, y con entrada para el control del relé desde los 3 V hasta los 32 V. También se han utilizado 2 relés de hasta 200 V y 3 A, y de valor de entrada de 3 a 10 V.

c) Resistencia de descarga

Para la descarga del capacitor se ha utilizado una resistencia de descarga de 22 Ohmios, la cual se utiliza al finalizar cada medida hecha para disipar la carga del capacitor.



Figura XXV. Resistencia de descarga para disipar la energía almacenada en el capacitor luego de la medida.

d) Funcionamiento del circuito de potencia

La Figura XXVI muestra el esquema eléctrico del circuito de potencia. Se observa que el capacitor se conecta al módulo fotovoltaico a través de dos de los relés de 12 A (S1

y S2), así mismo el capacitor está conectado a la resistencia de descarga R_d mediante un relé de 12 A (S3), y finalmente también está conectado a la fuente DC para precarga negativa a través de los relés de 3 A (S4 y S5). Al inicio todos los relés están abiertos, para hacer la medición primero se cierra el relé S3 para descargar el capacitor, esto se hace por seguridad para que la medida inicie con el capacitor completamente descargado, luego se abre S3 e inicia la precarga negativa al cerrar los relés S4 y S5, al estar un poco cargado negativamente, el capacitor va desde un voltaje negativo a un voltaje positivo, pasando así por voltaje cero, obteniéndose la corriente de cortocircuito. Luego de la precarga negativa, se abren los relés S4 y S5, para luego cerrar los relés S1 y S5 los cuales conectarán el capacitor con el módulo FV, con lo cual empezará la carga del capacitor y finalizando la carga cuando se llegue al voltaje de circuito abierto, momento en el que la corriente cae a cero. Finalmente se abren estos relés y se cierra el relé S3 para descargar el capacitor de tal manera que quede listo para la siguiente medida.

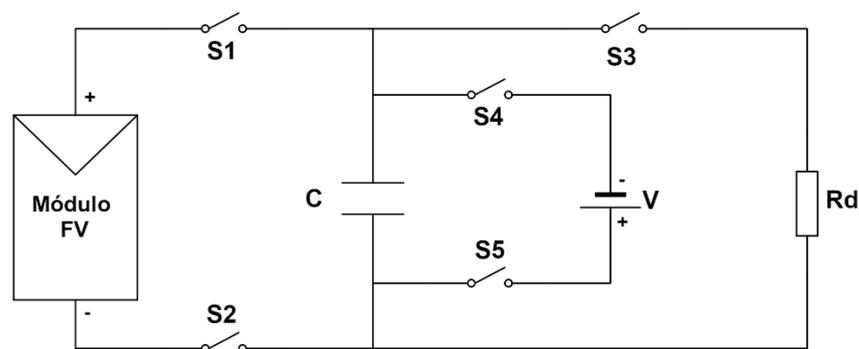


Figura XXVI. Esquema general del circuito de potencia para el trazado de la curva I-V.

3) *Bloque de control*

El bloque de control está conformado por el registrador de datos que tiene la función de ejecutar las señales que se envían a los multímetros para iniciar la captura de los datos de corriente y voltaje, y además da las señales de voltaje para abrir y cerrar los relés. Así mismo, en este bloque se incluye la computadora con la cual se programa el registrador de datos para mandar estas señales y se configuran los multímetros. La Figura XXVII muestra

el diagrama general de conexión del trazador, en el cual se observa este flujo de señales y todo esto se hace en el entorno del software de LabVIEW.

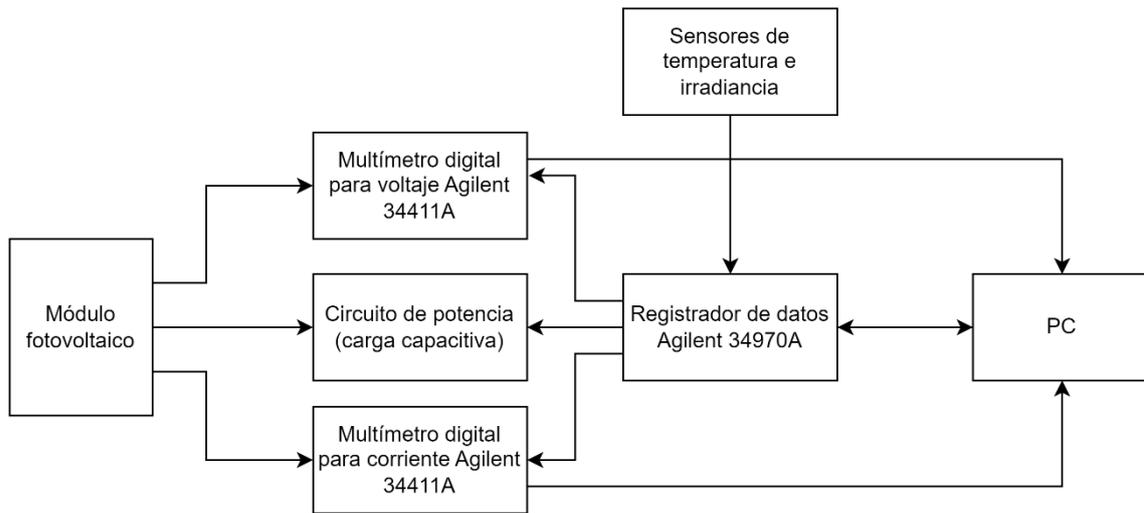


Figura XXVII. Esquema general del trazador I - V del CER-UNI.

En la Figura XXVIII se muestra el panel frontal del software en LabVIEW en el cual se ve la interfaz gráfica del trazador I - V. A través de esta interfaz se puede configurar el monitoreo automático del módulo a evaluar, es decir, el intervalo de tiempo para que el sistema haga las mediciones de la curva I - V, así mismo se pueden ver los datos de irradiancia y temperatura junto con la hora y fecha. Se puede apreciar también que tiene un filtro de irradiancia para configurar el rango de irradiancia en el que se desea que se realice los trazados. En el diagrama de bloque del LabVIEW está programada la configuración de los multímetros y el control de los relés por parte del registrador de datos, estos dispositivos se comunican con LabVIEW mediante comandos estándares para instrumentos o más conocidos como SCPI (por sus siglas en inglés).

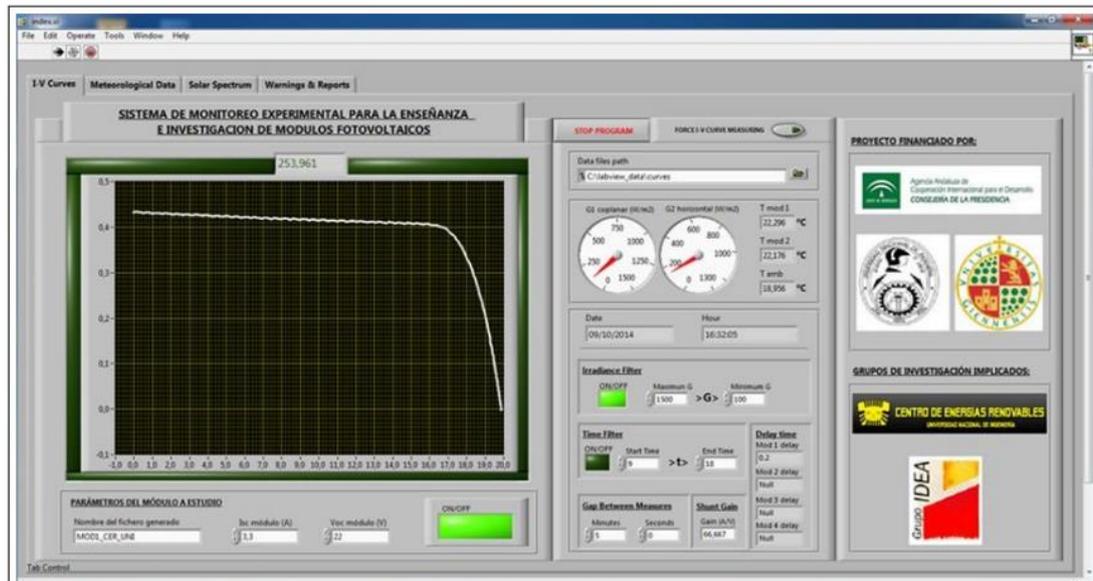


Figura XXVIII. Panel frontal del software para el trazador I - V del CER - UNI.

B. Optimización del trazador del CER-UNI

En el presente capítulo se describen todas las modificaciones realizadas al trazador mencionado en el capítulo anterior, tanto en el hardware como en el software, es decir se describen el cambio de algunos componentes para aumentar el rango de medida del trazador, así mismo, se presentará un software para trasladar la curva I - V medida hacia las condiciones estándar (STC), esto según el cuarto método indicado por la IEC 60891:2021, el cual permite obtener la curva I - V medida y la curva I - V trasladada a condiciones STC.

1) Instrumentación

En el capítulo anterior se describieron las características de los componentes del trazador I - V, el cual está limitado a módulos FV de hasta 10 A debido a que la resistencia shunt tiene ese límite de medida y los relés tienen un límite de 12 A. Se cambiaron estos componentes para poder medir módulos fotovoltaicos del orden de los 20 A, los cuales ya existen en el mercado.

La Figura XXIX muestra los nuevos relés de estado sólido que pueden soportar una corriente máxima de 40 A y que conectan el capacitor con el módulo FV. Así mismo se muestra la nueva resistencia shunt de 30 A / 60 mV.



Figura XXIX. Relés cambiados, circuito de potencia con los cambios realizados.

Añadido a esto, se consideró importante la instalación de un piranómetro coplanar al módulo FV, ya que este hace posible que, con los datos obtenidos del trazador, se pueda medir el rendimiento del módulo FV, ya que además de medir la irradiancia con la celda solar descrita en la sección anterior, también es importante tener el dato de la radiación global incidente para encontrar el rendimiento real del sistema FV. Para este caso se agregó el piranómetro de la marca Hukseflux SR-30 de clase A. Este se comunica con el software y se incluye dentro de la programación para los cálculos correspondientes. La Figura XXX muestra el piranómetro utilizado.



Figura XXX. Piranómetro utilizado para optimizar el trazador de curva I-V.

2) Software de traslación

El software de traslación se desarrolló en el entorno de LabVIEW, este software complementario se añadió junto con el software del trazador para que sea más práctico su uso, ya que es un complemento al trazador I-V al tener nuevas funcionalidades. Es así que se introdujeron dos pestañas en el panel frontal de LabVIEW: una pestaña para configuración de módulos y otra para el traslado de la curva I-V.

El proceso de traslación del software se ha programado utilizando subprogramas (ver Anexo 2), ya que estos permiten tener un mejor manejo de todo el programa para futuras mejoras. Además, los subprogramas se utilizan para que la programación sea más ordenada. A continuación se describe cómo se da la ejecución del traslado de la curva I-V con este nuevo software a través de las siguientes etapas del proceso.

a) Ingreso de datos

Tomando en cuenta que los trazadores comerciales guardan los datos de los módulos a evaluar, ya que serán útiles para posteriores cálculos y comparaciones, en esta primera etapa del proceso se solicita el ingreso de datos del módulo FV proporcionados por el fabricante en la ficha técnica. Esto se da a través de la primera pestaña añadida tal como se observa en la Figura XXXI, en donde los datos que se solicitan son la potencia pico P , corriente del punto de máxima potencia I_{mpp} , voltaje del punto de máxima potencia V_{mpp} , corriente de corto circuito I_{sc} , voltaje de circuito abierto V_{oc} , tolerancia positiva y negativa de la potencia en porcentaje, la temperatura nominal de operación NMOT, los coeficientes de temperatura de P , I_{sc} , V_{oc} , y el número de celdas en serie del módulo N_s . Entre paréntesis se ha colocado las unidades a tener en cuenta para evitar datos erróneos. Una vez colocados estos datos se coloca el nombre del módulo y se procede a seleccionar el botón de guardar.

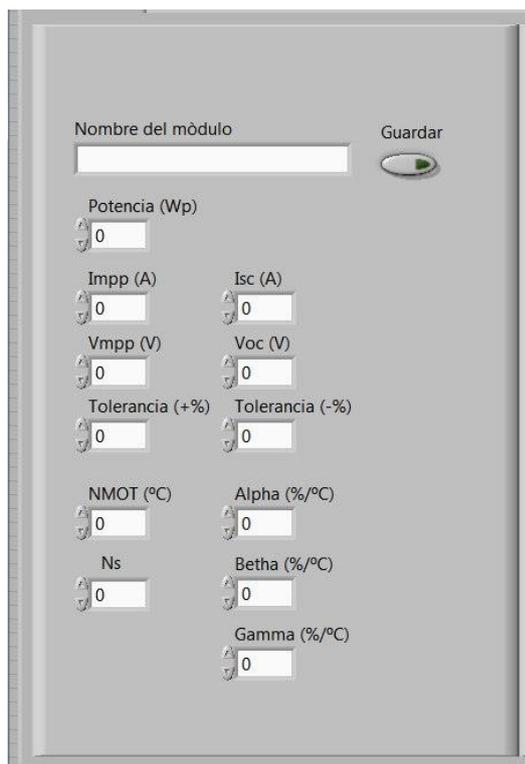


Figura XXXI. Pestaña de configuración en la que se muestra el ingreso de datos.

b) Verificación de parámetros para la medida y traslado de la curva I -V

En la pestaña de traslado de curva se ha colocado la opción de seleccionar el módulo a evaluar. Esta opción abrirá la carpeta con la base de datos de los módulos guardados en la etapa anterior. La Figura XXXII muestra este proceso. Es importante la selección del módulo correcto ya que sus datos servirán en el cálculo para el traslado de la curva a las condiciones STC. Seleccionar un módulo equivocado no afecta la curva medida, pero sí conducirá a datos erróneos en el traslado de la curva I - V. Por ese motivo se ha colocado una tabla que muestra el módulo seleccionado de tal manera que se tenga en cuenta el módulo que se ha seleccionado para la evaluación y tener la referencia de que se ha elegido el módulo correcto. En la Figura XXXIII se muestra la pestaña del panel frontal del software que hace el traslado, y en la parte superior se encuentra la tabla con los datos del módulo en evaluación. De la misma forma, es necesario hacer una verificación de los parámetros de irradiancia y temperatura, ya que, a pesar de que el trazado será posible, es recomendable que las irradiancias sean mayores a 800 W/m^2 cuando se desea

reportar los resultados a STC. Además, la verificación de la temperatura es necesaria sobre todo para asegurarse que los sensores estén bien colocados. La Figura XXXIII muestra el botón para verificación de temperatura e irradiancia.

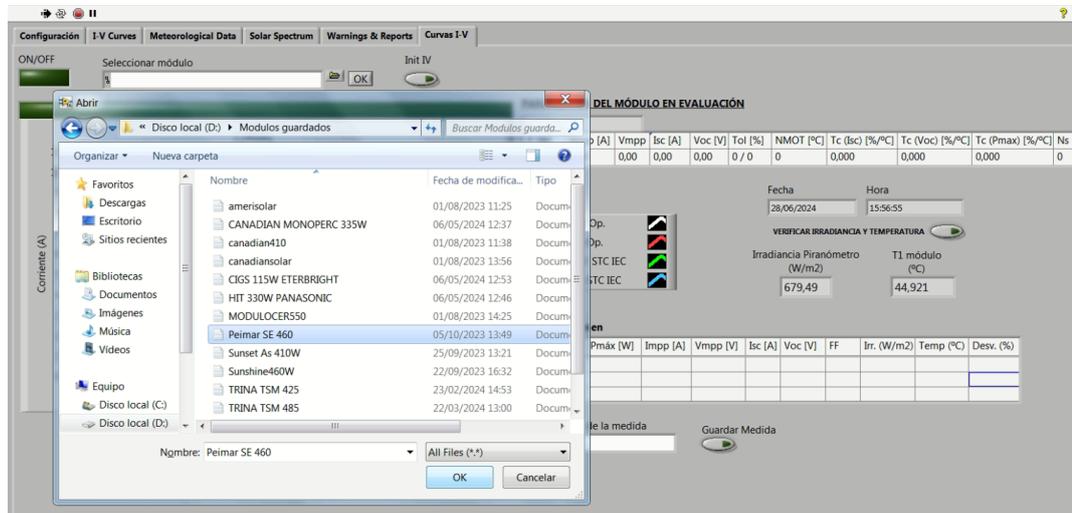


Figura XXXII. Selección del módulo para importar sus datos guardados y utilizarlos en la medida.

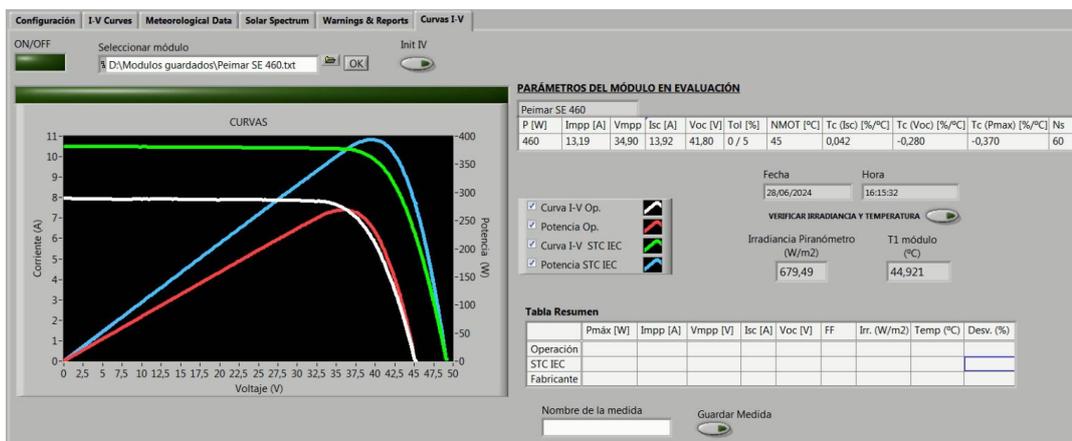


Figura XXXIII. Pestaña principal del panel frontal del software para el traslado de la curva I - V.

c) Medida y traslado de la curva I - V

En la pestaña principal se han colocado todos los elementos para la realización de la medida y su visualización. Se ha agregado una sección de gráficas en la cual se podrán visualizar las gráficas de la curva I - V y de la potencia vs voltaje, tanto para las condiciones de medición como las gráficas trasladadas a STC. Al lado se ubica el cuadro de leyenda que sirve también para seleccionar qué curva visualizar. Para empezar a utilizar el software

de traslación se activa el botón de encendido ubicado en la parte superior izquierda, tal como se muestra en la Figura XXXIII, y luego de haber seleccionado el módulo y verificado las condiciones ambientales se procede a iniciar la medición mediante el botón "Init IV". Cuando la medida ha finalizado, se mostrarán las gráficas respectivas, y adicionalmente se tiene un cuadro resumen en el cual se muestran los parámetros extraídos de la curva medida y la curva trasladada a STC, junto con los datos brindados por el fabricante a condiciones STC. En el cuadro resumen se incluye el factor de forma y una desviación porcentual que indica la relación entre la potencia media y trasladada con la potencia pico indicada por el fabricante para que se haga una mejor evaluación del módulo al comparar los datos brindados por el software y los datos del fabricante. Finalmente, se añadió la opción de almacenar los datos de la curva medida y trasladada, así como también los parámetros de irradiancia y temperatura, todo esto en formato delimitado por comas (CSV) para su uso posterior, como resulte oportuno.

En la Figura XXXV se ha elaborado un diagrama de flujo que muestra el funcionamiento del software y los pasos que sigue para hacer el traslado de la curva I - V medida. Al inicio el software toma los pares corriente - voltaje de la curva y con estos calculará la resistencia en serie según la Ecuación 9 descrita en el capítulo IV. El software va barriendo todos los sectores de la curva I - V calculando la resistencia en serie y hallando el coeficiente de determinación R^2 para cada caso hasta que este coeficiente sea el máximo posible y mayor a 0,995, tal como lo indica el método. De esta recta se extrae el valor de la resistencia en serie y también se calcula el índice de idealidad del diodo n , ya que este método está fundamentalmente basado en el modelo del diodo simple, y estos valores hallados se utilizarán posteriormente para completar la curva I - V trasladada en caso sea necesario. La Figura XXXIV muestra el cálculo manual de la resistencia en serie de una curva I - V medida, Se observa que el coeficiente de determinación R^2 es 0,9997 y que la resistencia en serie es 0,132 ohm.

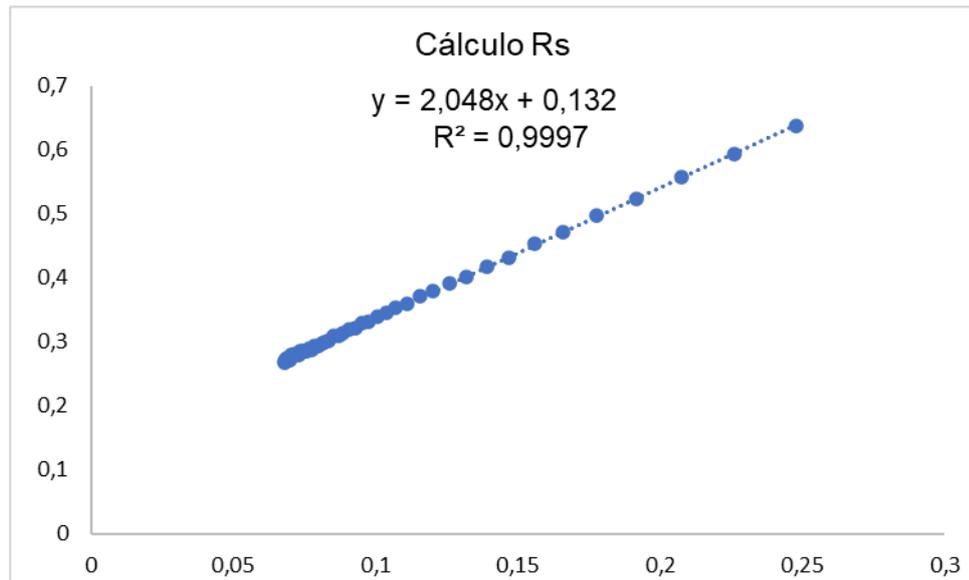


Figura XXXIV. Cálculo manual a través de la Ecuación 9 para hallar la resistencia en serie.

Posteriormente el software hace todo este cálculo de manera automática y se tienen los valores de la resistencia en serie R_s y el índice de idealidad n . Con estos datos se ejecutan las ecuaciones de traslado, haciendo primero el traslado por irradiancia, tal como lo muestra el diagrama de flujo, y luego se hace el traslado por temperatura con las ecuaciones mostradas.

Posteriormente, se completa la curva con la Ecuación 1, y se extraen los parámetros característicos para mostrarlos en la tabla resumen.

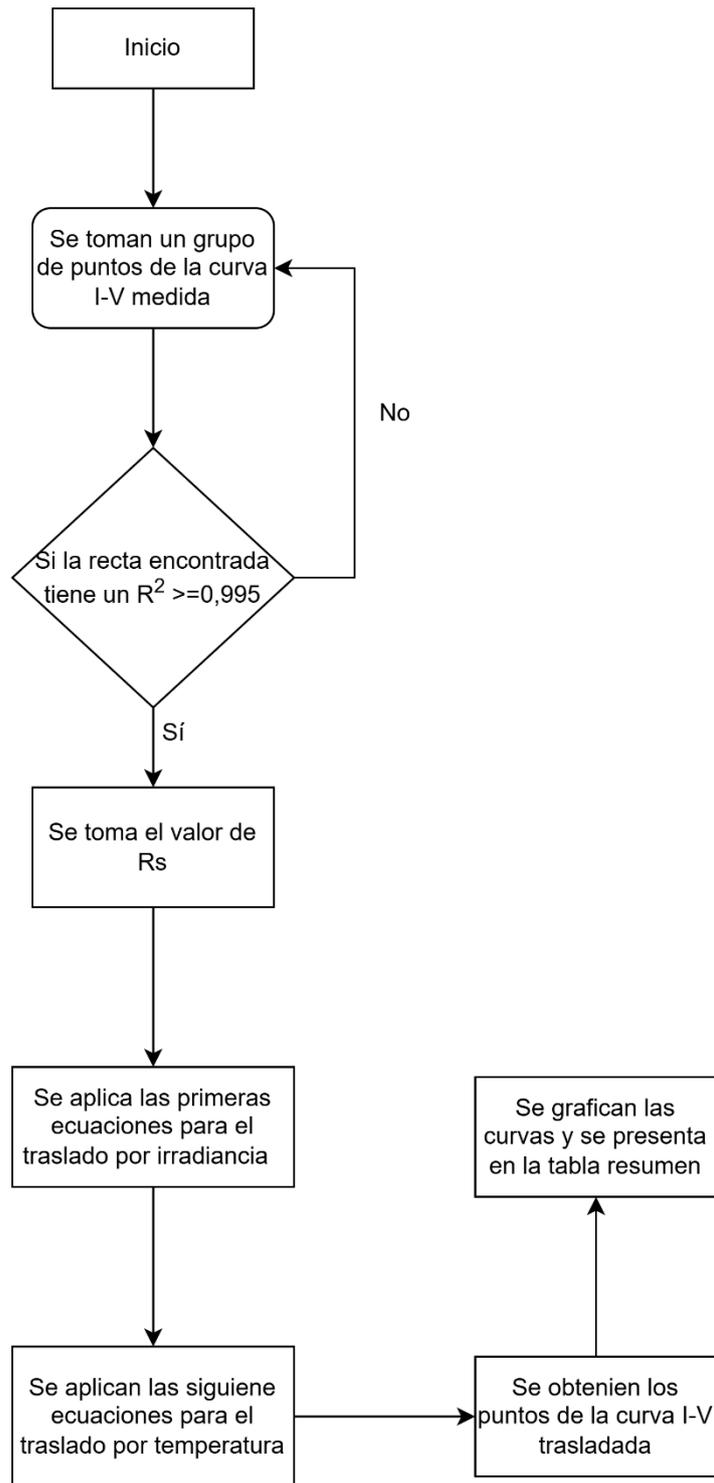


Figura XXXV. Diagrama de flujo del traslado de la curva I - V.

IV. Análisis y discusión de los resultados

Se midieron las características eléctricas de un módulo monocristalino a partir de su curva I - V trazada bajo condiciones climáticas reales. La Figura XXXVI muestra el gráfico obtenido del cálculo previo realizado en uno de los subprogramas del software para calcular la resistencia en serie según indica la IEC 60891:2021. Se observa la recta formada, tal como se explicó anteriormente con la Ecuación 9, con la cual se obtiene la resistencia en serie. La formación de una línea recta indica que el módulo se puede ajustar al modelo equivalente de un solo diodo y en consecuencia muestra la aplicabilidad del método de traslación.

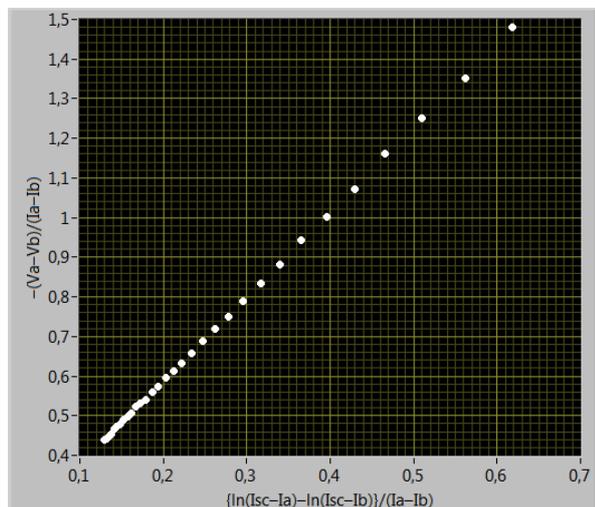


Figura XXXVI. Captura de la gráfica de la recta generada con la Ecuación 9, para calcular resistencia en serie, con un subprograma del software.

La Figura XXXVII muestra las gráficas del panel frontal principal del software desarrollado donde se puede hacer la comparación entre las curvas medidas, I - V y potencia - V (blanco y rojo), y las curvas trasladadas a STC (verde y azul). Así mismo, en la tabla resumen del software, la cual se ha representado en la Tabla I, se observa las condiciones de irradiancia y temperatura a las cuales se hizo la medida de la curva I - V. También se muestran los parámetros de la curva trasladada a STC y los datos proporcionados por el fabricante. La última columna de la tabla muestra la desviación de la potencia de cada curva con respecto a la potencia indicada por el fabricante a STC. Como

se puede observar, a las condiciones de $874,14 \text{ W/m}^2$ y $49,88 \text{ }^\circ\text{C}$ de operación, se tiene una potencia $24,48 \%$ por debajo de la potencia pico de 460 W_p indicada en la ficha técnica. Luego, los datos de la curva trasladada a STC indican una potencia pico de $447,70 \text{ W}_p$, que corresponde a una desviación del $-2,67 \%$ del valor indicado por la ficha técnica.

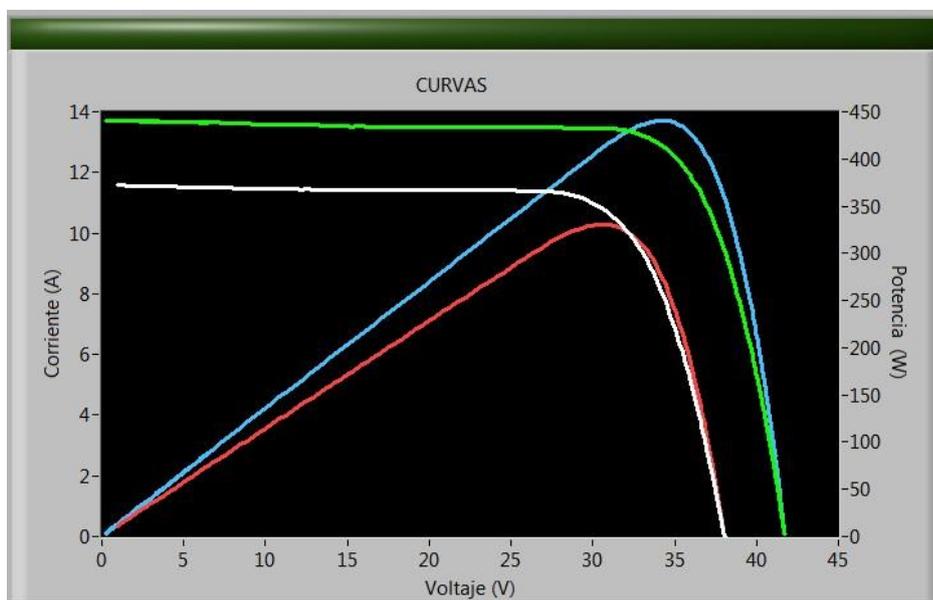


Figura XXXVII. Curvas I - V que se muestran en el panel frontal del software después de realizar la medida y la traslación a condiciones estándar.

TABLA I

Valores obtenidos de la medida de la curva I-V de un módulo FV comercial utilizando el software.

	P_{máx} (W)	I_{mpp} (A)	V_{mpp} (V)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	FF	I_{rr} (W/m²)	Temp (°C)	Desv (%)
Operación	347,37	11,38	30,53	12,25	37,99	0,75	874,14	47,88	-24,48
STC IEC	447,7	13,11	34,16	13,92	41,77	0,77	1000	25	-2,67
Fabricante	460	13,19	34,90	13,92	41,80	0,79	1000	25	0

Nota: Datos extraídos de la tabla resumen del panel frontal del software de traslación.

Asimismo, se midieron las características eléctricas del mismo módulo utilizando el trazador comercial IV400w de la marca HT Instruments. Este trazador tiene la funcionalidad de hacer el traslado de la curva I - V a STC con un método que no especifica. Los datos obtenidos se representan en la Tabla II, en la cual se puede observar que las medidas se hicieron a unas condiciones de 789 W/m^2 y $48,4 \text{ }^\circ\text{C}$, obteniéndose una potencia $347,37 \text{ W}$

lo cual representa 27,97% por debajo de la potencia pico de 460 Wp. Al trasladar la curva a STC los datos indican una potencia pico de 455,27 Wp, es decir 1,03% por debajo de la indicada por el fabricante. La Figura XXXVIII es una captura de la gráfica obtenida por el trazador IV400w, se puede observar la curva I - V y potencia-voltaje medidas (azul y rojo), y las curvas trasladadas a STC (verde y celeste).

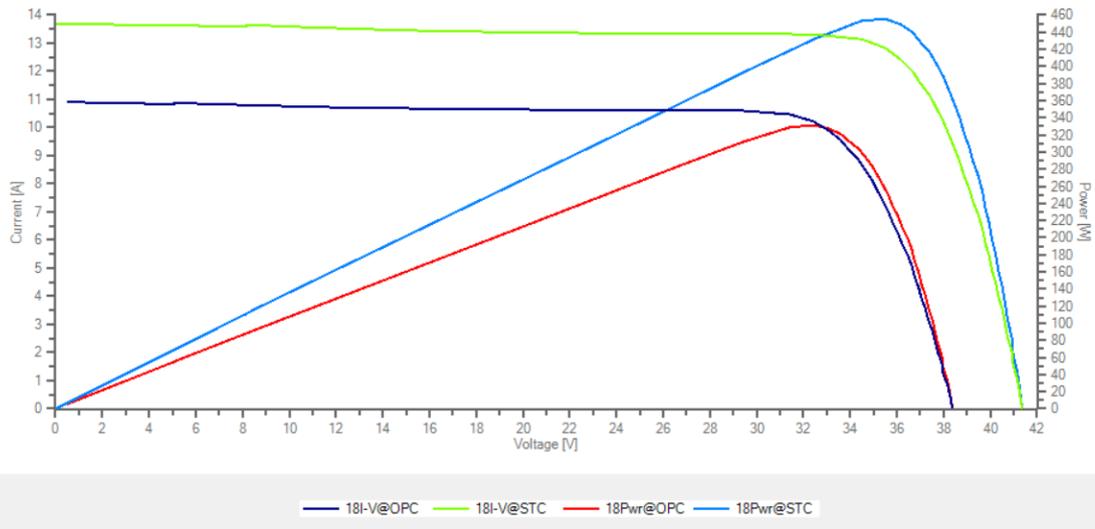


Figura XXXVIII. Gráfica curvas I-V y de potencia de la medida hecha con el trazador comercial IV400w.

TABLA II

Valores obtenidos de la medida del trazador comercial a un módulo FV.

	P_{máx} (W)	I_{mpp} (A)	V_{mpp} (V)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	FF	I_{rr} (W/m²)	Temp (°C)	Desv (%)
Operación	331,33	10,22	32,41	10,91	38,39	0,79	789	48,4	-27,97
STC IEC	455,27	12,83	35,49	13,61	41,36	0,81	1000	25	-1,03
Fabricante	460	13,19	34,90	13,92	41,80	0,79	1000	25	0

Nota: Datos extraídos del software Topview del trazador comercial IV400w de HT Instruments.

Se puede observar que ambas medidas, con los diferentes trazadores, se obtienen resultados muy cercanos. La pequeña discrepancia en la desviación porcentual para ambos casos es justificada por los diferentes métodos que se han utilizado para el traslado de la curva I - V a STC. Además, las medidas fueron hechas a distintas condiciones de irradiancia, sin embargo, la desviación porcentual obtenida con el software desarrollado para el trazador (-2,67%) y la obtenida con el trazador comercial (-1,03%) están dentro de

la tolerancia que manejan los fabricantes que es de +/- 5% de tolerancia. Es decir, que la evaluación para este módulo resulta ser positiva en este caso, y el hecho de que tanto el trazador del CER UNI con el software desarrollado y el trazador comercial obtengan resultados similares corrobora la correcta aplicación del método de la IEC en el software.

Por otro lado, en la Tabla III, se presentan los resultados obtenidos de la medición a un módulo FV de la marca Trina Solar, de diferentes características al módulo de la Tabla I, que ayuda a validar el software, en la cual se observa una desviación de -3,94 % en comparación con lo indicado por el fabricante. Este módulo tiene una corriente de cortocircuito de 18,52 A, por sus características eléctricas, solo podría ser medido con el trazador optimizado, ya que como se vio en capítulos anteriores, se ampliaron sus capacidades para medir módulos de hasta 30 A. Además, el trazador comercial solo alcanza a medir módulos con un máximo de 15 A. Es decir, se consiguió trazar la curva I - V de este módulo y trasladarla a STC. Esto es importante, ya que los trazadores comerciales hasta hace unos años no tenían la posibilidad de trazar este tamaño de módulos y los que sí pueden hacerlo ahora cuestan el doble. Y es la versatilidad del trazador I - V del CER UNI lo que permitió ampliar su capacidad de medida, y añadir el software complementario para el traslado de las curvas medidas. En la Figura XXXIX se muestra el módulo en evaluación en el laboratorio del CER UNI.

Con relación al software implementado, es importante señalar que se deben seguir haciendo mediciones de diferentes módulos y a distintas condiciones de irradiancia y temperatura para seguir validando el software. También se recomienda que se hagan comparaciones con otros métodos de traslación, así como con otros dispositivos trazadores de curva I - V que también hacen el traslado a STC. De la misma forma, es necesario que no solo se midan módulos comerciales y compararlos con los datos del fabricante, sino también medir módulos calibrados para asegurar los resultados del software, ya que, aunque sea un método establecido en la IEC 60891, es importante corroborarlo con módulos debidamente calibrados para garantizar el uso del software.

TABLA III

Valores obtenidos en la medición de la curva I-V de un módulo FV Trina Solar.

	P_{máx} (W)	I_{mpp} (A)	V_{mpp} (V)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	FF	I_{rr} (W/m²)	Temp (°C)	Desv (%)
Operación	388,67	14,33	27,13	15,28	34,47	0,74	849,80	56,13	-29,33
STC IEC	528,31	16,80	31,45	17,80	38,61	0,77	1000	25	-3,94
Fabricante	550	17,40	31,60	18,52	37,90	0,78	1000	25	0

Nota: Datos extraídos de la tabla resumen del panel frontal del software de traslación.



Figura XXXIX. Módulo FV Trina Solar siendo evaluado con el trazador optimizado. El parche blanco muestra que se está haciendo la prueba de puntos calientes al módulo.

Conclusiones

Se logró implementar un software en LabVIEW que traslada una curva I - V de un módulo FV obtenido a condiciones reales de clima a STC, según el estándar IEC 60891:2021. Asimismo, se ha incrementado el rango de medida del trazador hasta módulos FV de 30 A. Esto ha permitido potenciar las capacidades del trazador del CER-UNI para el estudio y evaluación de módulos fotovoltaicos. Y esto, a su vez, brinda la posibilidad de llevar a cabo estudios estandarizados, además de fomentar la investigación de nuevos métodos de traslación de curvas I - V y compararlas con las normas establecidas.

El software se adapta a la necesidad de disponer de un método estandarizado que solo utiliza una curva para trasladar a condiciones estándar, lo cual permite evaluar el módulo en el instante y obtener una buena referencia de su estado en comparación con lo que el fabricante indica en su ficha técnica. También, se reconoce la necesidad de continuar validando el software mediante mediciones con diversos módulos y además con módulos calibrados.

El trazador I - V se potenció en sus características técnicas, lo que lo convierte en un equipo versátil para futuras mejoras y modificaciones que puedan surgir de necesidades debido al desarrollo de la tecnología de los módulos fotovoltaicos.

Se consiguió evaluar un módulo comercial y trasladar su curva I - V a STC y, además, se compararon los resultados con un trazador comercial. Asimismo, se consiguió medir la curva I - V de un módulo con una corriente de cortocircuito de 18,52 A con el trazador optimizado.

Recomendaciones

A pesar de la existencia de los trazadores comerciales, es importante continuar desarrollando las nuevas alternativas para la medición de la curva I - V con trazadores más versátiles que los comerciales tanto para aplicaciones de investigación como para aplicaciones comerciales, ya que como se ha descrito anteriormente, el costo de estos equipos es bastante elevado.

La mayoría de las normas usadas en este trabajo limitan su aplicación hasta cierto punto a los módulos más tradicionales (cristalinos), dejando de lado las otras tecnologías u otros tipos de módulos como los bifaciales. En ese contexto, resultaría conveniente contar con las técnicas y métodos de medición para este tipo de tecnologías.

La IEC ya está publicando estándares para medición de módulos fotovoltaicos flexibles, en los cuales la medición tiene características diferentes debido a la naturaleza de este tipo de módulos. En consecuencia, se recomienda empezar con el análisis de estos métodos e investigación de estos módulos con el fin de plantear nuevas metodologías de medición.

Es recomendable tener capacitores de distintos tamaños para las posibles configuraciones de arreglos FV, de tal manera que el tiempo de trazado se mantenga dentro de los límites para tener una buena medición de la curva I – V (ver Anexo 3).

Es recomendable implementar un seguidor solar y un sistema de monitoreo más sofisticado, de tal manera que el trazador sea capaz de detectar las condiciones ambientales óptimas para llevar a cabo la medición. La adopción de esta medida mejoraría la eficacia de las medidas tomadas y la automatización de las mismas.

A pesar de que el método de traslación es un método estandarizado y validado por la IEC, es importante continuar la validación de este método con el software desarrollado junto con el trazador optimizado. En ese sentido, se recomienda utilizar módulos FV calibrados para este procedimiento.

Referencias bibliográficas

- [1] United Nations, “Causes and Effects of Climate Change | United Nations”. Consultado: el 26 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- [2] United Nations, “Five ways to jump-start the renewable energy transition now | United Nations”. Consultado: el 5 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy-transition>
- [3] Naciones Unidas, “Energía - Desarrollo Sostenible”. Consultado: el 5 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [4] IEA, “World Energy Investment 2023”, 2023. Consultado: el 26 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: www.iea.org
- [5] IEA, “The Energy Progress Report 2023”, 2023.
- [6] IRENA, “Renewable Energy Statistics 2023”, 2023. Consultado: el 26 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: www.irena.org
- [7] IRENA, “Statistics time series”. Consultado: el 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
- [8] OSINERGMIN, “Energías Renovables Experiencia y Perspectivas en la Ruta del Perú Hacia la Transición Energética”, 2019. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf
- [9] OSINERGMIN, “El Informativo”, 2023. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www2.osinergmin.gob.pe/publicacionesgrt/pdf/Informativo/EI%20Informativo%20-%20Enero%202023%20v2.1.pdf>

- [10] OSINERGMIN, “Información técnica de proyectos de centrales de generación de energía eléctrica no convencional con estudios de pre operatividad aprobados por el COES.”, 2023. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://issuu.com/osinergmin/docs/compendio-proyectos-cgenc-epo-aprobados-coes>
- [11] Y. Zhu y W. Xiao, “A comprehensive review of topologies for photovoltaic I – V curve tracer”, *Solar Energy*, vol. 196, núm. December 2019, pp. 346–357, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.12.020.
- [12] T. Rahman *et al.*, “Investigation of Degradation of Solar Photovoltaics: A Review of Aging Factors, Impacts, and Future Directions toward Sustainable Energy Management”, *Energies (Basel)*, vol. 16, núm. 9, may 2023, doi: 10.3390/en16093706.
- [13] J. I. Morales-Aragón, M. Dávila-Sacoto, L. G. González, V. Alonso-Gómez, S. Gallardo-Saavedra, y L. Hernández-Callejo, “A review of I–V tracers for photovoltaic modules: Topologies and challenges”, *Electronics (Switzerland)*, vol. 10, núm. 11, 2021, doi: 10.3390/electronics10111283.
- [14] E. Duran, M. Piliouline, M. Sidrach-de-Cardona, J. A. Gómez-Galán, y J. Andujar Marquez, “Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: A review”, en *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, oct. 2008, pp. 1–6. doi: 10.1109/PVSC.2008.4922578.
- [15] R. E. Espinoza, E. Muñoz-Cerón, E. R. Ramos, y J. De La Casa, “Characterization in power and energy of two photovoltaic grid connected systems of different technologies (crystal silicon and thin film), operating in Lima”, en *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, mar. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1173/1/012011.
- [16] V. Nakama, “Implementación de un software para la traslación de la curva I-V de un módulo fotovoltaico a partir de condiciones reales de operación a condiciones

- estándar de medida”, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, 2016.
- [17] R. Espinoza, C. Luque, E. Muñoz-Cerón, y J. De la Casa, “Barreras a superar en el intento de una intervención masiva de sistemas FV conectados a la red en el Perú”, *TECNIA*, vol. 27, pp. 7–13, 2017.
- [18] K. S. Javed y S. N. Paresh, “Capacitor Load Based I–V Curve Tracer for Performance Characterisation of the Solar Photovoltaic System”, *Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika)*, vol. 56, núm. 3, pp. 168–177, 2020, doi: 10.3103/S0003701X2003010X.
- [19] W. Sirichote, C. Wuttikornkanarak, S. Srathongkao, S. Suttiyan, N. Somdock, y B. Klongratog, “IV Tracer for Photovoltaic Panel”, *2021 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, ICEAST 2021 - Proceedings*, núm. 2, pp. 54–57, 2021, doi: 10.1109/ICEAST52143.2021.9426264.
- [20] I. F. Silva, P. S. Vicente, F. L. Tofoli, y E. M. Vicente, “Portable and low cost photovoltaic curve tracer”, *14th Brazilian Power Electronics Conference, COBEP 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/COBEP.2017.8257413.
- [21] R. García-Valverde *et al.*, “Portable and wireless IV-curve tracer for >5 kV organic photovoltaic modules”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 151, pp. 60–65, 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.02.012.
- [22] Y. Erkaya, I. Flory, y S. X. Marsillac, “Development of a string level I-V curve tracer”, *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014*, pp. 3104–3107, 2014, doi: 10.1109/PVSC.2014.6925594.
- [23] Y. Erkaya, P. Moses, y S. Marsillac, “On-site characterization of PV modules using a portable, MOSFET-based capacitive load”, *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017*, núm. 2, pp. 2941–2946, 2017, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366738.

- [24] C. D. Londoño, J. B. Cano, y E. Velilla, "Capacitive tracer design to mitigate incomplete I-V curves in outdoor tests", *Solar Energy*, vol. 243, núm. July, pp. 361–369, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.08.021.
- [25] E. A. Bastos Junior, C. Meira Amaral Da Luz, T. M. Oliveira, L. Ana Rodarte Rios, E. M. Vicente, y F. Lessa Tofoli, "A Curve Tracer for Photovoltaic Modules Based on the Capacitive Load Method", *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference, COBEP/SPEC 2019*, 2019, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065553.
- [26] P. Casado, J. M. Blanes, C. Torres, C. Orts, D. Marroquí, y A. Garrigós, "Raspberry Pi based photovoltaic I-V curve tracer", *HardwareX*, vol. 11, p. e00262, 2022, doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00262.
- [27] S. Basu Pal, A. Das, K. Das, y D. Mukherjee, "Design of a low-cost measuring and plotting device for photovoltaic modules", *Measurement and Control (United Kingdom)*, vol. 52, núm. 9–10, pp. 1308–1318, 2019, doi: 10.1177/0020294019865752.
- [28] J. Montes Romero, "Evaluación y desarrollo de técnicas para la caracterización de sistemas fotovoltaicos a sol real", Universidad de Jaén, 2020. Consultado: el 24 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10953/1047>
- [29] Universidad Nacional de Ingeniería, "Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía". Consultado: el 13 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cer.uni.edu.pe/>
- [30] V. Nakama, "Método propuesto para la traslación de la curva I-V de un módulo fotovoltaico medida bajo condiciones reales de operación a diversas condiciones de funcionamiento", Tesis M.S. , Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.
- [31] L. A. Conde Mendoza *et al.*, "Puesta en marcha de un laboratorio para la caracterización de tecnologías fotovoltaicas a sol real bajo las condiciones climáticas de Lima", *TECNIA*, vol. 30, núm. 1, pp. 80–89, may 2020, doi: 10.21754/tecnia.v30i1.835.

- [32] L. A. Conde *et al.*, “Performance evaluation and characterization of different photovoltaic technologies under the coastal, desertic climate conditions of Lima, Peru”, en *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019*, International Solar Energy Society, 2020, pp. 773–783. doi: 10.18086/swc.2019.16.01.
- [33] S. A. Kalogirou, “Solar Energy Engineering Processes and Systems”, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://store.elsevier.com/>
- [34] J. A. Duffie y W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [35] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*. Academic Press, 1983.
- [36] C. Hu y R. M. White, *Solar cells from basics to advanced systems*. McGraw-Hill, 1983.
- [37] O. P. Lamigueiro, “Energía Solar Fotovoltaica”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/oscarperpinan/esf>
- [38] J. Twidell y T. Weir, *Renewable energy resources*. E. & F.N. Spon, 2006.
- [39] ISO, “Solar energy-Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation”, 2018. Consultado: el 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: www.iso.org
- [40] kipp & Zonen, “Solar Energy International Standards”, 2022. Consultado: el 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.kippzonen.com/News/995/Whitepaper-on-the-International-Standards-for-Solar-Energy>
- [41] A. Malvino y D. J. Bates, *Principios de Electrónica*. 2007. [En línea]. Disponible en: www.mhe.es/malvino7
- [42] N. D. Kaushika, A. Mishra, y A. K. Rai, *Solar Photovoltaics Technology, System Design, Reliability and Viability*. 2018.

- [43] D. Y. Goswami, *Principles of Solar Engineering*. CRC Press, 2022. [En línea]. Disponible en: https://books.google.com.pe/books?id=Pg1_EAAQBAJ
- [44] A. (Antonio) Luque y Steven. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley, 2011.
- [45] International Electrotechnical Commission., “IEC 61215-1 Terrestrial photovoltaic (PV) modules-Design qualification and type approval-Part 1: Test requirements”, 2016. [En línea]. Disponible en: www.iec.ch
- [46] International Electrotechnical Commission., *IEC/TS 61836 Solar photovoltaic energy systems - Terms, definitions and symbols*. International Electrotechnical Commission, 2007.
- [47] Canadian Solar, “Preliminary Technical Information Sheet 520 W ~ 550 W CS6W-520|525|530|535|540|545|550MB-AG (IEC1000 V)”, 2021. [En línea]. Disponible en: www.csisolar.com/au
- [48] R. Espino Campos, E. Yoiti Sako, M. V. Gomes dos Reis, y M. Gradella Villalva, “A Review of the Main Methods to trace the I-V Characteristic Curve of PV Sources”, en *13th IEEE International Conference on Industry Applications*, 2018.
- [49] E. F. Fernández, J. Montes-Romero, J. De La Casa, A. Firman, M. Cáceres, y L. H. Vera, “Contributions to the design and construction of characteristic curve tracers for photovoltaic devices”, *XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAE)*, 2018.
- [50] A. El Hammoumi, S. Motahhir, A. Chalh, A. El Ghzizal, y A. Derouich, “Low-cost virtual instrumentation of PV panel characteristics using Excel and Arduino in comparison with traditional instrumentation”, *Renew Wind Water Sol*, vol. 5, núm. 1, dic. 2018, doi: 10.1186/s40807-018-0049-0.
- [51] A. Rivai y N. A. Rahim, “Binary-based tracer of photovoltaic array characteristics”, *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, núm. 6, pp. 621–628, 2014, doi: 10.1049/iet-rpg.2013.0111.

- [52] H. Amiry *et al.*, “Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions”, *Energy Convers Manag*, vol. 169, pp. 206–216, ago. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.046.
- [53] T. H. Warner y C. H. Cox, “A high power current-voltage curve tracer employing a capacitive load”, vol. 7, pp. 175–181, 1983.
- [54] Z. Chen, Y. Lin, L. Wu, S. Cheng, y P. Lin, “Development of a capacitor charging based quick I-V curve tracer with automatic parameter extraction for photovoltaic arrays”, *Energy Convers Manag*, vol. 226, núm. September, p. 113521, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113521.
- [55] M. M. Mahmoud, “Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I-V characteristics”, *Renew Energy*, vol. 31, núm. 13, pp. 2198–2206, 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.09.019.
- [56] S. Bifaretti, V. Iacovone, L. Cina, y E. Buffone, “Global MPPT Method for Partially Shaded Photovoltaic Modules”, en *Energy Conversion Congress Exposition ECCE*, 2012.
- [57] F. Spertino, J. Ahmad, A. Ciocia, P. Di, A. F. Murtaza, y M. Chiaberge, “Capacitor charging method for I – V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems”, *SOLAR ENERGY*, vol. 119, pp. 461–473, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.06.032.
- [58] A. Joglekar y Hegde Balachandra, “Online I-V Tracer for per string monitoring and maintenance of PV panels”, en *IEEE Industrial Electronics Society. Conference (44th : 2018 : Washington, D.C.)*, 2018.
- [59] Z. Chen, W. Lin, L. Wu, C. Long, P. Lin, y S. Cheng, “A capacitor based fast I-V characteristics tester for photovoltaic arrays”, en *Energy Procedia*, Elsevier B.V., 2018, pp. 381–387. doi: 10.1016/j.egypro.2018.04.032.
- [60] A. A. Willoughby y M. O. Osinowo, “Development of an electronic load I-V curve tracer to investigate the impact of Harmattan aerosol loading on PV module performance in southwest Nigeria”, *Solar Energy*, vol. 166, pp. 171–180, may 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.03.047.

- [61] P. Papageorgas, D. Piromalis, T. Valavanis, S. Kambasis, T. Iliopoulou, y G. Vokas, “A low-cost and fast PV I-V curve tracer based on an open source platform with M2M communication capabilities for preventive monitoring”, en *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 423–438. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.641.
- [62] J. Sayyad y P. Nasikkar, “Design and Development of Low Cost, Portable, On-Field I-V Curve Tracer Based on Capacitor Loading for High Power Rated Solar Photovoltaic Modules”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 70715–70731, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078532.
- [63] T. A. Pereira, L. Schmitz, W. M. Dos Santos, D. C. Martins, y R. F. Coelho, “Design of a Portable Photovoltaic I-V Curve Tracer Based on the DC-DC Converter Method”, *IEEE J Photovolt*, vol. 11, núm. 2, pp. 552–560, mar. 2021, doi: 10.1109/JPHOTOV.2021.3049903.
- [64] E. Durán, J. M. Andújar, J. M. Enrique, y J. M. Pérez-Oria, “Determination of PV generator I-V/P-V characteristic curves using a DC-DC converter controlled by a virtual instrument”, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/843185.
- [65] “MP-180 I-V Tracer”. Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eko-instruments.com/eu/categories/products/i-v-measurement-instruments/mp-180-i-v-tracer>
- [66] “I-V500w Trazador de curvas I-V en paneles fotovoltaicos hasta 1500V | HT Instruments”. Consultado: el 21 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ht-instruments.com/es-es/productos/instrumentacion-fotovoltaica/medidores-curva-i-v/i-v500w/>
- [67] “Fluke SMFT-1000 Multifunction PV Tester Performance Analyzer + I-V Curve Tracer | Fluke”. Consultado: el 21 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fluke.com/en-us/product/electrical-testing/best-solar-energy-industry-tools/smft-1000-pv-tester>

- [68] “Trazador de curvas I-V serie PVA-1500 | Fluke | Fluke”. Consultado: el 21 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fluke.com/es-es/producto/comprobacion-electrica/herramientas-de-energia-solar/pva-1500-iv-trazador-curvas-serie>
- [69] International Electrotechnical Commission y International Electrotechnical Commission. Technical Committee 82, “Photovoltaic devices. Part 1, Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics”, IEC 60904-1, 2020
- [70] IEC, “Photovoltaic (PV) array-On-site measurement of current-voltage characteristics”, IEC 61829:2015, 2015 [En línea]. Disponible en: www.cenelec.eu
- [71] IEC, “IEC 60891:2021 Photovoltaic devices-Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics”, 2021. [En línea]. Disponible en: www.iec.ch
- [72] Y. Hishikawa, T. Takenouchi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, y M. Yoshita, “Translation of Solar Cell Performance for Irradiance and Temperature from a Single I-V Curve Without Advance Information of Translation Parameters”, *IEEE J Photovolt*, vol. 9, núm. 5, pp. 1195–1201, sep. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2924388.

Anexos

Anexo 1: Ficha técnica típica de un módulo FV comercial	1
Anexo 2: Diagrama de bloques del software de traslación implementado	3
Anexo 3: Gráficos para dimensionar el capacitor en función del tiempo de carga, el voltaje en circuito abierto y la corriente de cortocircuito	4

Anexo 1: Ficha técnica típica de un módulo FV comercial

PEIMAR
ITALIAN PHOTOVOLTAIC MODULES



OR10H460M SE460M

HALF CELL LINE

● MÓDULO "HALF-CELL"

El módulo de 120 células ha sido diseñado para garantizar un alto rendimiento de producción que no se puede alcanzar con la tecnología estándar.

La configuración semicelular de alta calidad optimiza la distribución eléctrica dentro del panel para promover el rendimiento del producto. Por estas razones, la gama Half Cell es adecuada no sólo para instalaciones industriales, sino también para instalaciones residenciales y comerciales.

30 AÑOS GARANTÍA LINEAL PRODUCCIÓN

25 AÑOS GARANTÍA PRODUCTO



TECNOLOGÍA PERC



PID FREE



REACCIÓN AL FUEGO: CLASE I



VIDRIO ANTIRREFLEJO



SEGURO QBE
Seguro de Responsabilidad del Producto QBE

Células



120 CÉLULAS
MONO gBB / 10BB M10 HALF | PERC

182 x 91 mm / 7,16 x 3,58"

Marco



COMPACTO Y SÓLIDO | 30 mm

PUEDA SER ANCLADO EN EL LADO CORTO ¹⁰

www.peimar.com



HALF CELL LINE

Características Eléctricas (STC) ⁽¹⁾

OR10H460M - SE460M	
Potencia pico (P _{max}) ⁽²⁾	460 W
Tolerancia de clasificación	0/+5 W
Tensión a P _{max} (V _{mp})	34.89 V
Corriente a P _{max} (I _{mp})	13.19 A
Tensión de circuito abierto (V _{oc}) ⁽²⁾	41.78 V
Corriente de corto circuito (I _{sc}) ⁽²⁾	13.63 A
Tensión máxima de sistema	1500 V
Máximo valor nominal del fusible	25 A
Eficiencia Módulo	21.32%
Clase de protección contra descarga eléctrica	Clase II

Características Mecánicas

Células	120 M10 HALF monocristalinas PERC
Tamaño Células	182 x 91 mm / 7.16 x 3.58"
Cubierta Frontal	3.2 mm / 0.13" grosor, vidrio templado
Cápsula	TPT (Tedlar-PET-Tedlar)
Cubierta Posterior	EVA (Etileno Vinil Acetato)
Marco	Aleación de aluminio anodizado doble grosor
Acabados Marco	Plata
Acabados Lámina posterior	Blanco
Diodos	3 Diodos de Bypass
Caja de conexiones	Certificado IP67
Conectores	MC4 o conectores compatibles
Longitud Cables	1300 mm / 51.18"
Sección Cables	4.0 mm ² / 0.006 in ²
Tamaño	1903 x 1134 x 30 mm / 74.92 x 44.64 x 1.18"
Peso	24 Kg / 52.91 lbs
Carga máxima (test de carga) - SF	5400 Pa - 1.5" ⁽³⁾

Características Temperatura

NMOT ⁽³⁾	45±2 °C
Coefficiente temperatura de la potencia máxima	-0.37 %/°C
Coefficiente temperatura de la tensión de circuito abierto	-0.28 %/°C
Coefficiente temperatura de la corriente de corto circuito	0.042 %/°C
Temperatura de funcionamiento	-40 °C - +85°C

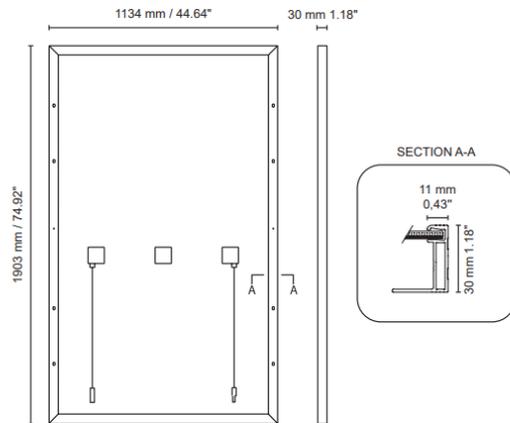
Embalaje ⁽⁴⁾

Medidas Palé	1935 x 1120 x 1260 mm / 76.18 x 44.09 x 49.61"
Paneles por Palé	36
Peso	880 kg / 1940.07 lbs

Certificaciones

Resistencia al fuego	Class of reaction to fire 1 (UNI 9177)
PID free	IEC TS 62804-1:2015
Niebla sal	IEC 61701:2011
Amoniaco	IEC 62716:2013
Certificados de producto	IEC 61215-1, IEC 61215-1-1, IEC 61215-2, IEC 61730-1, IEC 61730-2

Medidas

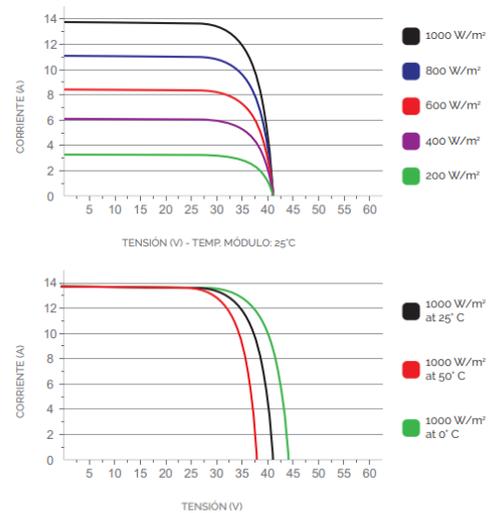


1. STC (Standard Test Condition): Irradiación 1000W/m², Temperatura del módulo 25°C, Aire 1.5

2. P_{max}, V_{oc}, I_{sc}: tolerancia de medición: ±3%

3. NMOT: (Nominal Module Operating Temperature): Irradiación 800W/m², Aire 20°C, Velocidad viento 3m/s

Características Corriente/Voltaje



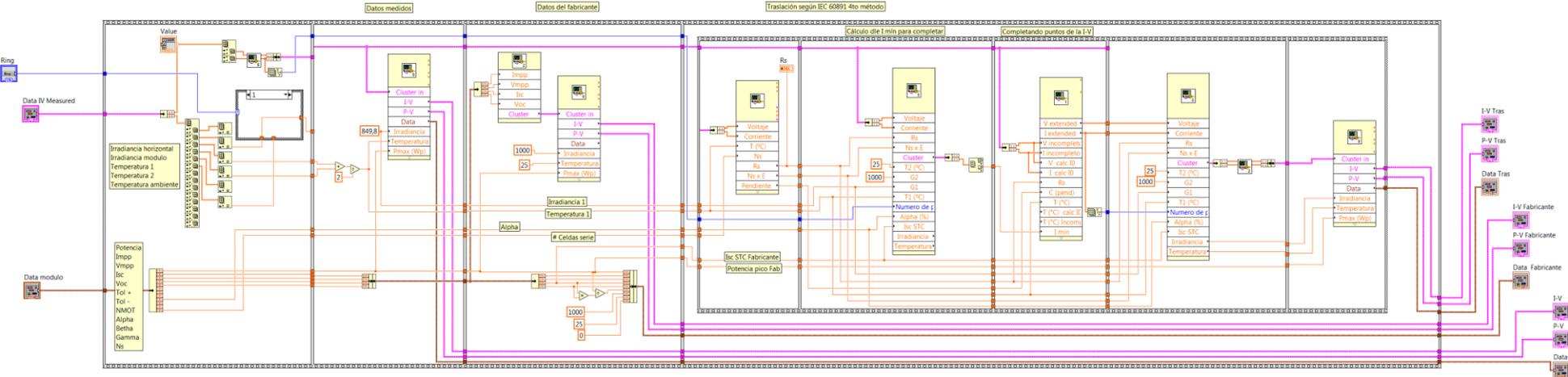
4. Los palés pueden ser sobrepuestos máximo por dos

5. Consultar el manual de instalación por la configuración del relativo montaje

Se especifica que los datos técnicos, las informaciones y representaciones consignadas en el presente documento mantienen un valor meramente indicativo. Peimar se reserva la facultad de modificar en cualquier momento y sin preaviso, los datos, los diseños y las informaciones consignadas en el presente documento. ES_2023_06_00

PEIMAR
ITALIAN PHOTOVOLTAIC MODULES

Anexo 2: Diagrama de bloques del software de traslación implementado.



Anexo 3: Gráficos para dimensionar el capacitor en función del tiempo de carga, el voltaje en circuito abierto y la corriente de cortocircuito.

Según la ecuación que relaciona el tiempo de trazado con el tamaño del capacitor, se tienen las siguientes gráficas que sirven para dimensionar el capacitor eligiendo un rango de tiempo de trazado de acuerdo a voltaje en circuito abierto y la corriente de cortocircuito.

