



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

**Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos
Naturales no Renovables**

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

**Diseño y construcción de un graficador de curvas I-V para
paneles fotovoltaicos.**

Trabajo de Titulación previo, a
obtención del Título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

AUTOR:

Luis Bryan Collaguazo Valle

DIRECTOR:

Ing. Juan Carlos Solano Jiménez, PhD.

Loja – Ecuador

2024

Certificación

Loja, 24 de octubre del 2023.

Ing. Juan Carlos Solano Jiménez PhD

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un graficador de curvas I-V para paneles fotovoltaicos.**; previo a la obtención del título de **Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**, de la autoría del estudiante **Luis Bryan Collaguazo Valle**, con **cédula de identidad Nro.1718519612**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Juan Carlos Solano Jiménez, PhD.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Luis Bryan Collaguazo Valle**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1718519612

Fecha: 2 de enero del 2024

Correo electrónico: luis.b.collaguazo@unl.edu.ec

Teléfono: 0939971483

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total, y/o publicación electrónica de texto completo del del Trabajo de Titulación.

Yo, **Luis Bryan Collaguazo Valle**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Diseño y construcción de un graficador de curvas I-V para paneles fotovoltaicos.**, como requisito para optar al grado de: **Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones** autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los dos días del mes de enero de dos mil veinticuatro.

Firma:

Autor: Luis Bryan Collaguazo Valle

Cédula: 1718419612

Dirección: Loja-Barrio “Ciudadela 8 de diciembre”; calles Francisco Valdiviezo 213-18 Y José María Riofrio

Correo electrónico: luis.b.collaguazo@unl.edu.ec

Teléfono: 0939971483

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Juan Carlos Solano Jiménez, PhD.

Dedicatoria

A Dios por haber permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Jesús del Cisne Valle Córdova por poner en mi toda su fe y su confianza de ver este sueño hecho realidad.

A mi padre Luis German Collaguazo Chango por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me han influenciado siempre por el valor mostrado para salir adelante.

A la **Universidad Nacional de Loja**, por permitirme lograr dar un paso más hacia el éxito. Por convertirme en un profesional competitivo, lleno de conocimientos y expectativas.

Luis Bryan Collaguazo Valle.

Agradecimiento

En primer lugar, doy gracias a Dios por haberme dado la fuerza y el valor para culminar esta etapa de mi vida.

Agradezco también la confianza y el apoyo brindado por parte de mi padre Luis German Collaguazo Chango y mi madre Jesús del Cisne Valle Córdova, que sin duda alguna en el trayecto me han demostrado su amor incondicional, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos.

La bendición de tener una pareja implica que en el transcurso de tu vida no estarás solo, esto también implica que habrá una ayuda siempre a tu lado, por eso y mucho más agradezco a mi querida esposa Verónica Tibán.

Mis hijos son el mejor regalo que he recibido por parte de Dios, son mi mayor tesoro y también la fuente más pura de mi inspiración para culminar esta investigación, los amo mi príncipe Mathias Gael y mi princesa Sarita Rubí. Que este logro sea un ejemplo para ustedes de que todo en la vida con esfuerzo se puede lograr.

A mi familia y a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron en la realización de este Trabajo de Titulación.

Finalmente, al Ing. Juan Carlos Solano por toda la colaboración brindada, durante la elaboración de esta investigación y por la calidad humana demostrada hacia mi persona.

Luis Bryan Collaguazo Valle.

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas:	x
Índice de figuras:	xi
Índice de anexos:	xiii
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción	4
4. Marco Teórico	7
4.1. Energía Solar	7
4.2. Sistemas Fotovoltaicos	10
4.3. Curva I-V.....	13
4.3.1. Interpretación de las curvas I-V	15
4.3.2. Condiciones Estándar de Medida (STC)	16
4.4. Curva P-V.....	17
4.4.1. Relación entre curva I-V y P-V	18
4.5. Graficador de Curvas I-V	18
4.5.1. Partes Básicas de un Graficador de Curvas I-V	19
4.5.2. Métodos de Construcción	20

5.	Metodología.....	31
5.1.	Justificación del método elegido (Carga Capacitiva).....	31
5.2.	Descripción de método propuesto	31
5.3.	Materiales de la Etapa de Fuerza.....	32
5.3.1.	Fusible.....	32
5.3.2.	Transistores IGBT.....	33
5.3.3.	Capacitores.....	34
5.3.4	Resistencia de descarga	36
5.4.	Materiales de etapa de control y adquisición de datos	37
5.4.1.	Raspberry PI 3 B +.....	37
5.4.2.	Transductor de voltaje	38
5.4.3.	Transductor de corriente	40
5.4.4.	ADC ADS1115	42
5.4.5.	Fuente de 5V	44
5.4.6.	Fuente de 12V	44
5.5.	Circuitos empleados en el diseño del graficador de curvas I-V	46
5.5.1.	Circuito de disparo de los IGBT.	46
5.5.2.	Circuito de carga y descarga de los capacitores.	47
5.5.3.	Circuito lector de sensores	48
5.5.4.	Circuito de alimentación	50
5.6.	Construcción del graficador de curvas I-V	51
5.7.	Proceso de obtención de la curva I-V y descripción de la aplicación desarrollada en Python.....	53
5.7.1.	Diagrama de flujo para la obtención de la curva I-V.....	53
5.7.2.	Aplicación desarrollada en Python	55
5.8.	Tamaño y costo del graficador de curvas I-V	60
6.	Resultados.....	62

6.1.	Detalle del proceso	62
6.2.	Características de los paneles analizados	62
6.3.	Curvas I-V y P-V obtenidas	65
6.3.1.	Curvas obtenidas en panel solar 1	65
6.3.2	Curvas obtenidas del panel solar 1 con sombra.....	68
6.3.2.	Curvas obtenidas del panel solar 2	70
7.	Discusión.....	74
8.	Conclusiones	76
9.	Recomendaciones	77
10.	Bibliografía.....	78
11.	Anexos	81

Índice de Tablas:

Tabla 1. Parámetros Característicos de los Módulos Fotovoltaicos	17
Tabla 2. Resumen de los Métodos	30
Tabla 3. Especificaciones Técnicas del IGBT GT40RR22	34
Tabla 4. Valores de corriente y voltaje de panel 1	35
Tabla 5. Valores de corriente y voltaje de panel 2	35
Tabla 6. Especificaciones Técnicas del Capacitor NIPPON CHEMI-CON.....	36
Tabla 7. Especificaciones técnicas del transductor voltaje LV25-P.....	39
Tabla 8. Valores de resistencia secundaria según el voltaje de alimentación	40
Tabla 9. Especificaciones técnicas del transductor de corriente LAH-25-NP.....	40
Tabla 10. Configuraciones del circuito primario.....	41
Tabla 11. Valores de resistencia secundaria según voltaje de alimentación	42
Tabla 12. Frecuencias de muestreo y tiempo de muestra del ADS1115	43
Tabla 13. Voltajes de referencia y tamaño LSB del ADS1115	43
Tabla 14. Resumen de componentes empleados en el diseño del graficador de curvas I-V	45
Tabla 15. Dimensiones del graficador de curvas I-V construido	60
Tabla 16. Costo de los materiales empleados en el graficador.....	60
Tabla 17. Especificaciones técnicas del panel JINKO SOLAR JKM405M-54HL4-V.63	
Tabla 18. Valores de voltaje y corriente con el multímetro y el graficador de curvas I-V	63
Tabla 19. Valores obtenidos con el graficador de curvas I-V construido	66
Tabla 20. Valores obtenidos con el graficador de curvas I-V construido	66
Tabla 21. Valores obtenidos con el graficador de curvas I-V construido	69
Tabla 22. Valores obtenidos con el graficador de curvas I-V construido	72

Índice de figuras:

Figura 1. Espectro solar que llega fuera de la atmosfera.....	8
Figura 2. Radiación Solar	9
Figura 3. Sistema Fotovoltaico.....	10
Figura 4. Celda Solar Monocristalina.....	11
Figura 5. Celdas Policristalinas	12
Figura 6. Diodos de Bloqueo y Derivación	13
Figura 7. Curva I-V	14
Figura 8. Variaciones de la curva I-V	15
Figura 9. Representación gráfica de la curva P-V	18
Figura 10. Esquema de resistencia variable	20
Figura 11. Esquema Binario	21
Figura 12. Esquema de Trazador de Curvas I-V con MOSFET.....	22
Figura 13. Características I-V de un módulo fotovoltaico y de un transistor MOSFET	22
Figura 14. Curva I-V con el Método Suministro de Energía de Cuatro Cuadrantes....	23
Figura 15. Circuito del método de suministro de cuatro cuadrantes	24
Figura 16. Esquema de Trazador de Curvas I-V	24
Figura 17. Configuraciones de los Convertidores DC-DC.....	25
Figura 18. Esquema del Circuito del Método de Carga Capacitiva	26
Figura 19. Carga y Descarga de un Capacitor	29
Figura 20. Fusible cerámico F30AL250V	32
Figura 21. Transistor IGBT GT40RR22	33
Figura 22. Capacitor NIPPON CHEMI-CON	36
Figura 23. Resistencia de descarga L100J500.....	37
Figura 24. Raspberry PI3 B+.....	38
Figura 25. Transductor de voltaje LV25-P.....	38
Figura 26. Circuito esquemático del transductor LV25-P.....	39
Figura 27. Transductor de voltaje LAH 25-NP	40
Figura 28. Circuito esquemático del transductor LAH-25-NP.....	41
Figura 29. ADC ADS 1115	42
Figura 30. Fuente de alimentación SR-25-5.....	44
Figura 31. Fuente Hi-Link HLK-PM12.....	45

Figura 32. Esquema del circuito de disparo de los IGBT.....	47
Figura 33. Esquema de circuito de carga y descarga de los capacitores	48
Figura 34. Esquema de circuito de lector de sensores.....	50
Figura 35. Esquema de circuito de alimentación.....	50
Figura 36. Caja metálica para los componentes del graficador.....	52
Figura 37. Caja metálica con los componentes ensamblados.....	52
Figura 38. Diagrama de flujo para la obtención de la curva I-V	53
Figura 39. Diagrama de bloques del programa realizado en Python.....	55
Figura 40. Interfaz gráfica realizada.....	57
Figura 41. Diagrama de flujo de la interfaz grafica.....	58
Figura 42. Paneles solares analizados	62
Figura 43. Análisis de las medidas de voltaje	64
Figura 44. Análisis de las medidas de corriente	64
Figura 45. Medidas con multímetro de panel solar 1 (16:30)	65
Figura 46. Medidas con multímetro de panel solar 1 (17:20)	66
Figura 47. Curvas I-V y P-V del panel solar 1 (16:30)	67
Figura 48. Curva I-V y P-V de panel solar 1 (17:20).....	68
Figura 49. Panel solar 1 con sombra y medidas tomadas con el multímetro (17:00)...	69
Figura 50. Curva I-V y P-V del panel solar 1 con sombra (17:00)	70
Figura 52. Valores medidos con el multímetro (16:00)	71
Figura 51. Panel solar 2 con fallos	71
Figura 53. Curva I-V y P-V del panel solar 2 (16:00).....	72

Índice de anexos:

Anexo 1. Esquema de la placa PCB realizada en Proteus	81
Anexo 2. PCB construida parte frontal	82
Anexo 3. PCB construida parte posterior	83
Anexo 4. Placa PCB con los componentes ensamblados	84
Anexo 5. Caja metálica	85
Anexo 6. Código realizado en Python	86
Anexo 7. Hoja de datos del módulo solar JINKO	93
Anexo 8. Obtención de las curvas I-V de los paneles solares	95
Anexo 9. Manual de usuario.....	96
Anexo 10. Certificado de traducción del resumen	999

1. Título

Diseño y construcción de un graficador de curvas I-V para paneles fotovoltaicos.

2. Resumen

En este documento se expuso el diseño y construcción de un graficador para las curvas I-V, cuya base radica en el método de carga capacitiva. Dicho método se aplica para adquirir los valores de corriente-voltaje de sistemas o módulos fotovoltaicos, con el propósito de analizar su rendimiento. La manipulación del graficador fue llevada a cabo por una pequeña computadora conocida como *Raspberry Pi*, lo cual posibilita la evaluación del estado de los paneles fotovoltaicos. Esta evaluación provee información precisa acerca de posibles deficiencias o decadencias que puedan estar afectando el funcionamiento de la instalación.

De manera general, el presente trabajo se realizó en cuatro fases que son la fase de estudio, diseño, construcción y evaluación. Por lo tanto, inicialmente, se hizo el estudio de la información sobre los métodos existentes para la construcción del graficador y se eligió el método más apropiado el cual fue el de carga capacitiva, una vez teniendo claro el método a utilizar se procedió con el diseño del circuito con la ayuda del *Software* llamado *Proteus* y a su vez poder seleccionar los materiales adecuados para la construcción del graficador, el cual consta de sensores de voltaje y corriente, fuentes de alimentación y la *raspberry* para el control de todo el equipo y visualización de las gráficas en una pantalla que se conecta al mismo. Además, nos permite almacenar estas representaciones gráficas para un posterior análisis.

Para concluir, se llevaron a cabo pruebas experimentales en los paneles solares situados en la Facultad de Energía de la Universidad Nacional de Loja. Con estas pruebas se pudo evaluar la condición de dichos paneles y confirmar la efectividad del graficador de curvas I-V que ha sido desarrollado.

Palabras claves: *curvas I-V, graficador de curvas I-V, carga capacitiva, Raspberry Pi, sistemas fotovoltaicos, Proteus.*

Abstract

This paper presented the design and construction of a plotter for I-V curves, based on the capacitive load method. This method was applied to acquire the current-voltage values of photovoltaic systems or modules, with the purpose of analyzing their performance. The manipulation of the plotter was carried out by a small computer known as Raspberry Pi, which makes it possible to evaluate the state of the photovoltaic panels. This evaluation provides accurate information about possible deficiencies or decays that may be affecting the performance of the installation.

In general, the present work was carried out in four phases, which are the study, design, construction and evaluation phase. Therefore, initially, the study of the information on the existing methods for the construction of the plotter was made and the most appropriate method was chosen which was the capacitive load, once having clear the method to use we proceeded with the design of the circuit with the help of the software called Proteus and in turn to select the appropriate materials for the construction of the plotter, which consists of voltage and current sensors, power supplies and the raspberry to control all the equipment and display of the graphs on a screen that is connected to it. In addition, it allowed us to store these graphical representations for later analysis.

To conclude, experimental tests were carried out on the solar panels located at the Faculty of Energy of the National University of Loja. With these tests it was possible to evaluate the condition of these panels and to confirm the effectiveness of the I-V curve plotter that has been developed.

Keywords: I-V curves, I-V curve plotter, capacitive load, Raspberry Pi, photovoltaic systems, Proteus.

3. Introducción

En la actualidad, es frecuente hallar diversas tecnologías y dispositivos que requieren del poder solar. Por esta razón, en diversas regiones y entidades del país, se está empleando esta fuente energética a través de paneles solares. Ahora los observamos en la iluminación de calles y también en la cúspide de edificios, desempeñando un propósito unificado: la generación de energía limpia y no perjudicial para el entorno.

A lo largo de la vida útil de los paneles FV, es esencial llevar a cabo evaluaciones regulares. De ahí nace la necesidad de desarrollar una herramienta denominada "**graficador de curvas I-V**". Esta herramienta permitirá estimar posibles inconvenientes en estos sistemas, así como verificar la operación adecuada de los paneles FV, asegurando su conformidad con los estándares definidos por el proveedor.

La curva I-V, abreviatura de corriente-voltaje, es una representación gráfica que ilustra la relación entre la corriente eléctrica y la tensión de salida de un panel fotovoltaico en diversas condiciones de operación. La corriente y la tensión son dos parámetros cruciales que determinan el comportamiento y la eficiencia de un panel solar.

El graficador de curvas I-V es una herramienta esencial para los investigadores, ingenieros y técnicos que trabajan en el campo de la energía solar. Este dispositivo permite adquirir datos de corriente y voltaje en tiempo real a medida que se varían las condiciones de operación del panel, como la irradiancia y la temperatura ambiente. A través de estos datos, se puede construir una curva I-V precisa que revela el punto de máxima potencia, el punto de cortocircuito, el punto de circuito abierto y otros parámetros críticos.

Por este motivo, la inclusión del graficador de curvas I-V en el marco de este proyecto representa una contribución valiosa a la investigación enfocada en el "**Desarrollo de un sistema de soporte de decisiones para el autoconsumo fotovoltaico en el Ecuador: caso práctico en la Región Sur**". Dicha investigación se centra en analizar la viabilidad y el desempeño de un sistema de paneles solares instalado en la Facultad de Energía de la Universidad Nacional de Loja. En este contexto, resulta esencial llevar a cabo evaluaciones periódicas del estado de los paneles FV, permitiendo así un análisis detallado de su comportamiento en diversas condiciones ambientales. El graficador de curvas I-V desplegará gradualmente una representación visual del rendimiento individual de cada panel solar, posibilitando un seguimiento continuo de su funcionamiento.

El graficador de curvas I-V es una herramienta importante donde se puede evaluar el funcionamiento de los sistemas de generación fotovoltaicos y diagnosticar la presencia de algún tipo de fallas tales como sombreado parcial o total, depósito de polvo, celdas agrietadas, un cortocircuito en el diodo de bypass, degradación normal del módulo, la presencia de un punto caliente, entre otros. En definitiva, el graficador de curvas I-V, permite verificar el estado en que se encuentra un panel solar, tomando en cuenta los factores que pueden afectar al panel FV (radiación y los cambios climáticos) y las variaciones de las curvas debido a estos factores (Vargas & Abrahamse, 2014).

El principio del diseño del graficador de curvas I-V es la carga y descarga de un capacitor, esto permite al panel solar simular una carga variable y medir puntos de corriente y voltaje de diferentes niveles (Vargas & Abrahamse, 2014). Estos puntos se miden en cortocircuito la corriente y en circuito abierto el voltaje.

El graficador de curvas I-V consta de varios métodos de construcción, dichos métodos pueden emplear una carga resistiva, una carga capacitiva, una carga electrónica, un suministro de alimentación de cuatro cuadrantes o usar convertidores DC-DC, en el cual el método a utilizar será el método de carga capacitiva en donde Barrera, (2018) explica que el método de carga capacitiva se basa en la propiedad que presenta un capacitor de comportarse como un cortocircuito cuando se encuentra descargado y como un circuito abierto cuando está plenamente cargado. De esta forma, mientras el capacitor se va cargando se van tomando medidas que permiten pasar del estado de corto circuito donde se obtiene I_{SC} hasta un punto de circuito abierto donde esta V_{OC} .

La parte de construcción del graficador consta de tres aspectos fundamentales a tomar en cuenta para su operación, estos son el sistema de adquisición de datos en donde se encuentran los sensores para la toma de los valores de los paneles FV, acondicionador de energía el cual se encarga de la alimentación todo el equipo y la estrategia de control en donde mediante el uso de la *raspberry* se controla todo el equipo para un mejor rendimiento a la hora de tomar los datos de los paneles.

En resumen, el graficador de curvas I-V para paneles FV desempeña un papel importante en la comprensión, evaluación y mejora del rendimiento de los sistemas solares. Proporciona información valiosa para la optimización de la generación de energía solar y contribuye al avance continuo de la tecnología fotovoltaica en la búsqueda de soluciones energéticas más sostenibles y limpias. Por esta razón, el graficador de curvas I-V es una

herramienta esencial para la Universidad Nacional de Loja, con el propósito exclusivo de contribuir tanto a la investigación previamente mencionada como a posibles investigaciones futuras que impliquen la utilización de paneles FV.

4. Marco Teórico

4.1. Energía Solar

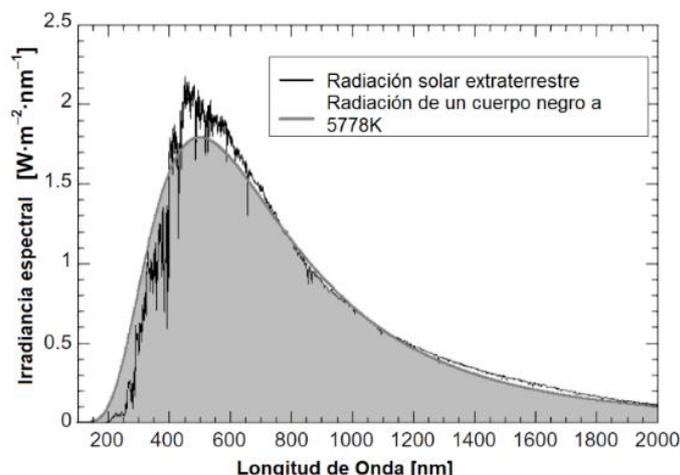
La energía solar es una energía renovable que en la actualidad se considera una de las más importantes dentro del desarrollo de un país, el saber aprovechar este tipo de energía para beneficio de la sociedad es algo sumamente significativo, debido a que de esta forma se evita la contaminación ambiental reduciendo así, el uso de combustibles fósiles y las emisiones de CO₂ en la atmosfera (Santiago, 2022).

Según Hilcu (2021) la energía solar es aquella generada por el Sol y que viaja a través de radiaciones para llegar a la Tierra y a su vez una energía renovable que el ser humano tiene intención de obtenerla de manera eficiente para su uso y aprovechamiento mediante diferentes tecnologías que han ido evolucionando con el paso del tiempo.

La energía proveniente de las reacciones de fusión en el núcleo del sol es dispersada al espacio en forma de ondas electromagnéticas, siendo la potencia irradiada total de $3.86 \times 10^{26} W$. Del total de dicha potencia, a la Tierra llega únicamente un pequeño porcentaje ($1.75 \times 10^{17} W$ o 0.000000045% del total); esto debido a la distancia que existe entre la Tierra y el sol, y al tamaño de la Tierra. La luz visible y la radiación infrarroja conforman la mayor parte de la radiación que llega a la Tierra proveniente del Sol, siendo la radiación ultravioleta la que está presente en menor proporción (Crawley & Gerard M, 2016).

Con estos datos podemos observar en la Figura 1 la radiación electromagnética del sol se aproxima a la de un cuerpo con una temperatura alrededor de 5778 K (Crawley & Gerard M, 2016).

Figura 1
Espectro solar que llega fuera de la atmósfera.



Nota. El gráfico representa una comparación entre el espectro de radiación solar con la radiación de un cuerpo negro. Tomado de *World Scientific Series in Current Energy Issues Volumen 2* (p.32) por Crawley & Gerard M, 2016.

En lo previamente expuesto, se pueden contemplar los elementos clave de la energía solar, tales como la potencia de radiación y la temperatura. Sin embargo, es pertinente indagar en cómo la energía solar logra penetrar en nuestro planeta, [Schallenberg Rodríguez \(2008\)](#) señala que la energía del Sol se desplaza a través del espacio en forma de radiación electromagnética, llegando una parte de esta energía a la atmósfera. De esta energía que llega a la atmósfera, una parte es absorbida por la atmósfera y por el suelo, y otra parte es reflejada directamente al espacio desde el suelo. Es por esto por lo que menos de la mitad de la radiación solar llega efectivamente a la superficie terrestre, siendo esta parte la que podemos utilizar con fines energéticos en nuestro planeta.

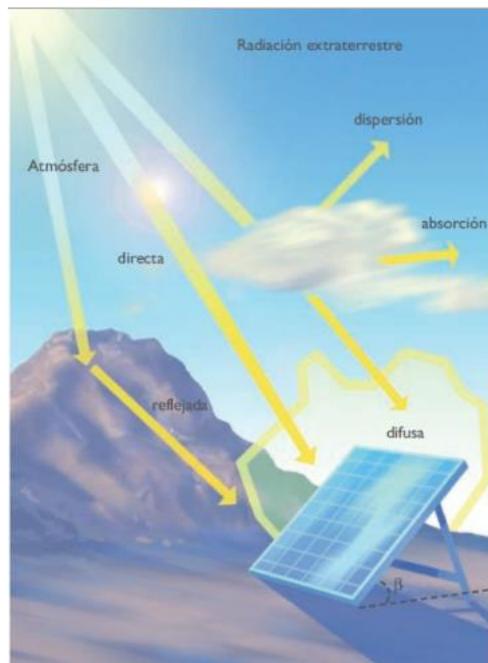
Existen tres formas en las que puede llegar la radiación solar a nuestro planeta las cuales son:

- **Radiación Directa-** Este tipo de radiación llega a nuestro planeta de forma directa sin haber cambiado su dirección, ni haber interrumpido con nada su camino.
- **Radiación Difusa-** Esta radiación llega luego de haber pasado por cualquier elemento de la atmósfera sea este polvo o nubes, lo que provoca que se cambie la dirección de la radiación.

- **Radiación Reflejada-**. Es aquella radiación que se refleja por cualquier obstáculo presente en la superficie de la tierra.

Todos los tipos de radiación mencionados se los puede observar a continuación en la [Figura 2](#).

Figura 2.
Radiación Solar



Nota. El gráfico explica los tipos de radiación que llegan al planeta. Tomado Energías renovables y eficiencia energética (p.50) por Schallenberg Rodríguez, 2008.

La energía solar puede ser de dos tipos los cuales se los indicara a continuación:

1. **Energía solar térmica.** - Este sistema aprovecha la capacidad calorífica del sol para retener el calor captado durante el día. Esto permite que la energía térmica se utilice incluso cuando no hay sol directo, como durante la noche o en días nublados. ([Planas, 2019](#)).
2. **Energía solar fotovoltaica.** - Este tipo de energía permite la obtención directa de electricidad a partir de la radiación solar. Se trata de un tipo de energía renovable no contaminante, que puede producirse en instalaciones con paneles FV ([Santiago, 2022](#)).

4.2. Sistemas Fotovoltaicos

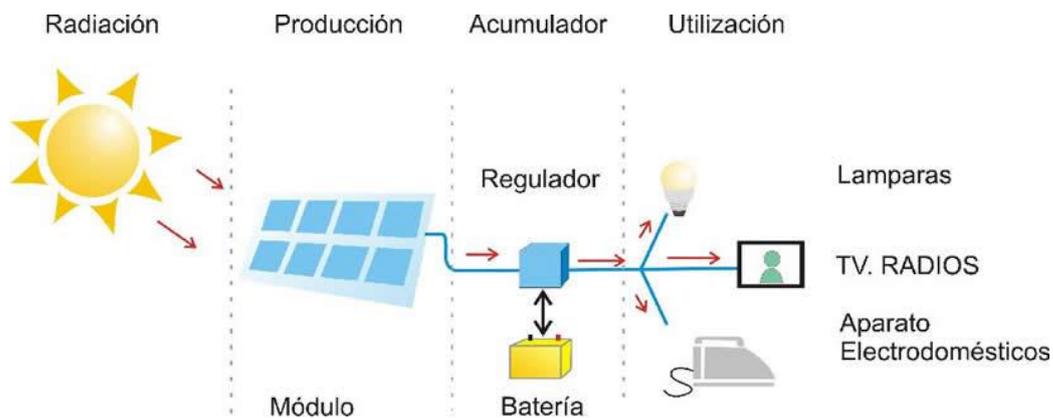
Un Sistema Fotovoltaico (SFV) es un conjunto de dispositivos o componentes, que permiten aprovechar y utilizar la energía solar para la producción de energía eléctrica.

Un SFV está compuesto de tres elementos esenciales los cuales son:

- 1) Generación que pueden ser las celdas o módulos solares.
- 2) Control que son los reguladores de voltaje o controladores.
- 3) Almacenamiento en este caso se hace referencia las baterías.

Los elementos acabados de mencionar se los puede observar a continuación en la [Figura 3](#).

Figura 3.
Sistema Fotovoltaico



Nota. Elementos que componen un SFV. Tomado Energía solar fotovoltaica para todos por García, 2021.

En este caso se tomará en cuenta en el primer elemento que es quien nos brindara los datos de corriente y voltaje para poder graficar las curvas I-V.

El panel FV, es el elemento captador de energía, que recoge la radiación solar y la transforma en energía eléctrica. Está formado por un conjunto de paneles o módulos fotovoltaicos conectados en serie o en paralelo, que deben proporcionar la energía necesaria para el consumo ([García & Arribas, 2001](#)).

Cada panel FV está compuesto por una serie de células o celdas fotovoltaicas, en donde [Pareja \(2010\)](#) explica que, las células solares más utilizadas son construidas con silicio

monocristalino. Estas células se crean a través del proceso de cristalización del silicio, siendo los tipos más comunes los siguientes:

Monocristalino. - Está constituido por un único cristal de silicio con estructura muy uniforme. Garantiza una eficiencia superior al resto 20% y el 22% de tecnologías debido a que los átomos de silicio están perfectamente alineados facilitando así la conductividad (Planas, 2016).

Las células solares monocristalinas suelen ser cuadradas con esquinas redondeadas, así se lo puede apreciar en la [Figura 4](#). Anteriormente eran circulares. Esto se debe al proceso de crecimiento del cristal de silicio monocristalino que tiene forma cilíndrica (Planas, 2016).

Figura 4
Celda Solar Monocristalina



Nota. Forma de una célula solar monocristalina

Algunas de las características de este tipo de celda son:

- El proceso de calentamiento es más lento.
- Es más eficiente con respecto a los otros tipos de células solares.
- El proceso de fabricación es más largo.

Policristalino. - Está formado por muchos cristales de silicio. Son más económicos, pero tienen una eficiencia inferior con un 17%. En el proceso de fabricación del silicio policristalino, el silicio se deja solidificar lentamente en un molde rectangular y se obtiene un sólido rectangular con muchos cristales, lo que da lugar a las células policristalinas (Planas, 2016). Así se puede observar en la [Figura 5](#).

Figura 5
Celdas Policristalinas



Nota. Forma de una celda policristalina.

Este tipo de celdas tiene un rendimiento menor que las celdas monocristalinas, pero actualmente tienen una fuerte presencia por su menor costo económico que las celdas monocristalinas.

Acabando de definir lo que es una celda solar y los tipos más usados ahora podremos entrar a explicar lo que es un panel FV, donde [Ramón Guerrero Pérez, \(2017\)](#) explica que un panel FV está formado por varias células idénticas conectadas entre sí y alojadas en un mismo marco. Las células fotovoltaicas se conectan en serie y/o en paralelo, de forma que la tensión y corriente que pueda suministrar el panel se ajuste al valor deseado.

Un panel FV produce electricidad en corriente continua y sus parámetros característicos como la intensidad y tensión varían con la radiación solar que incide sobre las células y con la temperatura ambiente ([Schallenberg Rodríguez, 2008](#)).

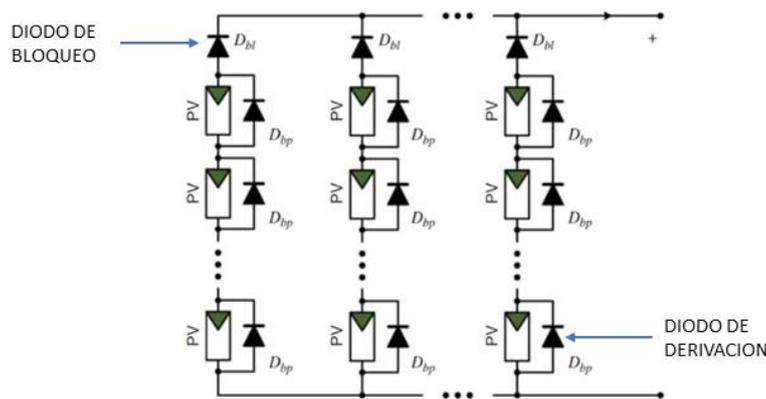
Los módulos fotovoltaicos pueden formarse por conexiones en serie o en paralelo de las celdas fotovoltaicas, al conectarse en serie es decir una celda seguida de otra la corriente se mantiene constante mientras que el voltaje se duplica, por otro lado, en paralelo la corriente se duplica y el voltaje se mantiene constante.

Para proteger a los componentes fotovoltaicos de flujos de corriente inversa del circuito a la fuente se puede usar los denominados diodos de bloqueo, los cuales se instalan en serie con cada cadena, de tal manera que no se produzcan corrientes inversas. La implementación de estos diodos es opcional, puesto que se los deberá utilizar cuando sean necesarios, esto debido a las pérdidas que se producen por su utilización, como pueden ser la pérdida de corriente del SFV ([Xiao, 2017](#)).

Los diodos de derivación se conectan externamente y en paralelo inverso con una celda fotovoltaica para proporcionar una ruta eléctrica alternativa para que fluya la corriente generada, ya que no puede fluir a través de la celda cuando está sombreada. Esto ayuda a preservar el rendimiento de la cadena en serie al restringir el voltaje de polarización inversa generado a través de cualquier celda parcialmente sombreada y, por lo tanto, reduce la energía eléctrica que puede disipar la celda (Alternative Energy Tutorials, 2018).

En la Figura 6 se podrá apreciar tanto los diodos de bloqueo como los diodos de derivación conectados entre las celdas fotovoltaicas.

Figura 6
Diodos de Bloqueo y Derivación



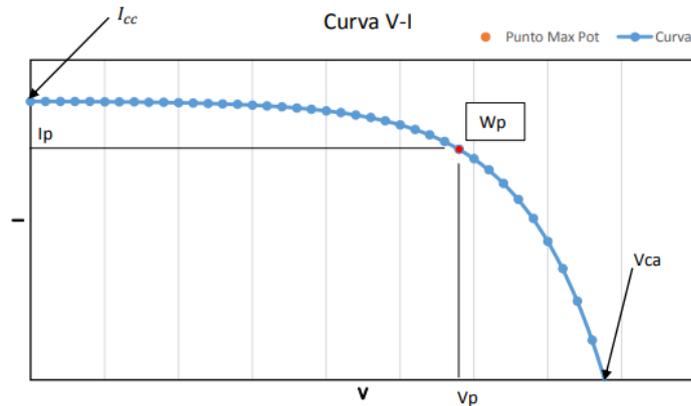
Nota. Diodos de derivación y de bloqueo en un circuito fotovoltaico. Tomado de *Photovoltaic Power System: Modeling, Design, and Control* (p.6) por Xiao, 2017.

4.3. Curva I-V

En este punto se explicará la curva característica I-V que generan los paneles fotovoltaicos lo cual son datos de suma importancia debido a que con ello podremos ver en qué estado se encuentra un panel.

La curva I-V representa todos los posibles puntos de operación (corriente y tensión) de un módulo solar o conjunto de ellos en las condiciones existentes de irradiancia y temperatura. La curva empieza en el punto de corto circuito y acaba a circuito abierto, el máximo punto de potencia lo da en este caso W_p que equivale al punto de funcionamiento óptimo en las condiciones de la curva (García, 2015). La curva I-V que define el comportamiento de una célula fotovoltaica está representada en la Figura 7.

Figura 7
Curva I-V



Nota. Curva I-V Tomado de energía fotovoltaica trazador de curvas I-V para seguimiento de módulos solares (p.31) por P. García, 2015

Donde:

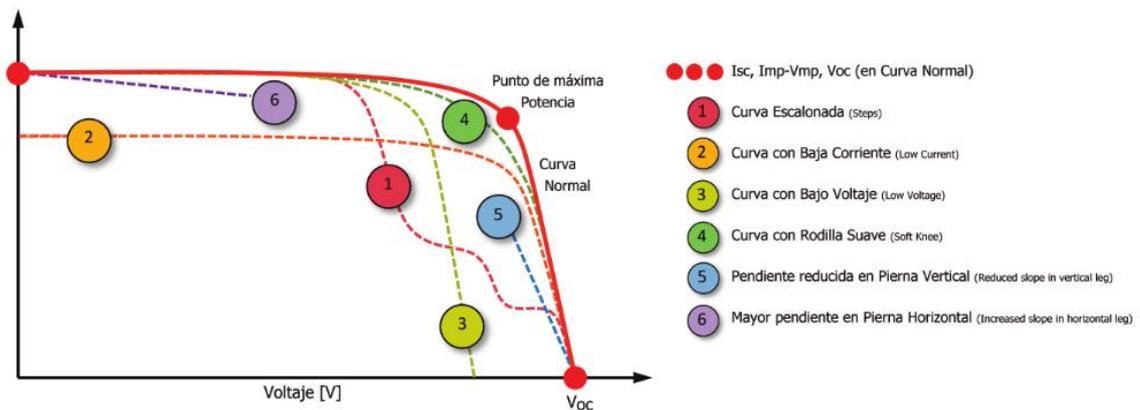
- **I_{cc}** es la intensidad de cortocircuito que se produce cuando la tensión es cero.
- **V_{ca}** es la tensión de circuito abierto se puede medir al no existir una carga conectada y representa la tensión máxima que puede dar una celda.
- **W_p** es la potencia pico que puede suministrar una celda y se determinada por el punto de la curva I-V donde el producto de la intensidad producida y la tensión es máximo.
- **Factor de forma (FF)** Es el área rectangular bajo la curva en el punto de máxima potencia este valor expresa cuán eficiente es un panel, si el factor de forma es más eficiente que cuando está alejado de los valores de V_{co} e I_{sc} (Vargas & Abrahamse, 2014). El factor de forma se calcula aplicando la siguiente formula:

$$\frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{co} \times I_{sc}}$$

4.3.1. Interpretación de las curvas I-V

Existen algunos factores importantes que provocan desviaciones en la curva I-V al momento de graficarla y tiene su respectiva explicación de cada uno de los tipos de curva que se pueden presentar, dichas curvas se las detalla a continuación y se muestran en la [Figura 8](#):

Figura 8
Variaciones de la curva I-V



Nota. La siguiente figura explica como inciden diferentes factores en la gráfica de la curva I-V. Tomado de interpretaciones de las formas de la Curva I-V (p.2). PHOLTAIC, n.d.

1. **Curva Escalonada.** - Esta curva indica una falta de coincidencia entre módulos o arreglos. Esto ocurre con mayor frecuencia cuando parte de los módulos solares recibe sombra, lo que hace que la radiación solar se distribuya de manera desigual entre los módulos ([Santiago, 2022](#)).
2. **Curva con Baja Corriente.** - La corriente baja es afectada por el efecto de la intensidad de iluminación mientras esta disminuya también disminuirá la intensidad de corriente. Otros aspectos que pueden afectar la corriente es la suciedad, sombreado o degradación de los paneles FV.
3. **Curva con bajo Voltaje.** - Este fenómeno ocurre cuando existe un cambio de temperatura hará que aumente o disminuya el voltaje.
4. **Curva con Rodilla Suave.** - Este efecto se puede manifestar debido al envejecimiento del módulo fotovoltaico.
5. **Pendiente Reducida en Pierna Vertical.** - Es causada por una alta resistencia en serie del panel medido, debido a que reduce la inclinación de la pendiente de la

curva, otras causas pueden ser daños en el cableado y fallos en las interconexiones de módulos.

6. **Mayor Pendiente en Pierna Horizontal.** - Una pendiente más pronunciada en la región de la fuente de corriente indica caminos de derivación en celdas fotovoltaicas o desajustes de módulos (Zhu & Xiao, 2020).

4.3.2. Condiciones Estándar de Medida (STC)

Dado que la curva característica de un módulo fotovoltaico varía y depende de las condiciones ambientales, es necesario considerar una serie de condiciones de funcionamiento para comparar valores de diferentes fabricantes.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ha establecido una serie de normas internacionales para los sistemas de energía fotovoltaica. Entre estas regulaciones, algunas están completamente relacionadas con la curva I-V, así:

- **IEC 60904-1:2006.** - Describe los procedimientos para la medición de las características de corriente-voltaje de los dispositivos fotovoltaicos en luz solar natural o simulada. Establece requisitos básicos para la medición, define procedimientos para diferentes técnicas de medición en uso y muestra prácticas para minimizar la incertidumbre de medición (IEC, 2020).
- **IEC 60891: 2009.**- Define los procedimientos que deben seguirse para las correcciones de temperatura e irradiación a las características I-V medidas de los dispositivos fotovoltaicos (IEC, 2021).
- **IEC 62446-1.**- Es para uso de los diseñadores e instaladores de sistemas de energía solar fotovoltaica conectada a la red como plantilla para proporcionar documentación efectiva a un cliente. Al detallar las pruebas de puesta en servicio y los criterios de inspección esperados, también pretende ayudar en la verificación/inspección de un SFV conectado a la red después de la instalación y para la posterior inspección, mantenimiento o modificaciones (IEC, 2018).

Los parámetros que se presentan dentro de estas normativas de una forma más generalizada se las muestra en la [Tabla 1](#).

Tabla 1*Parámetros Característicos de los Módulos Fotovoltaicos*

Irradiancia	1000 W/m ²
Temperatura de la Célula	25°C
Distribución Espectral	AM (masa de aire) 1.5G

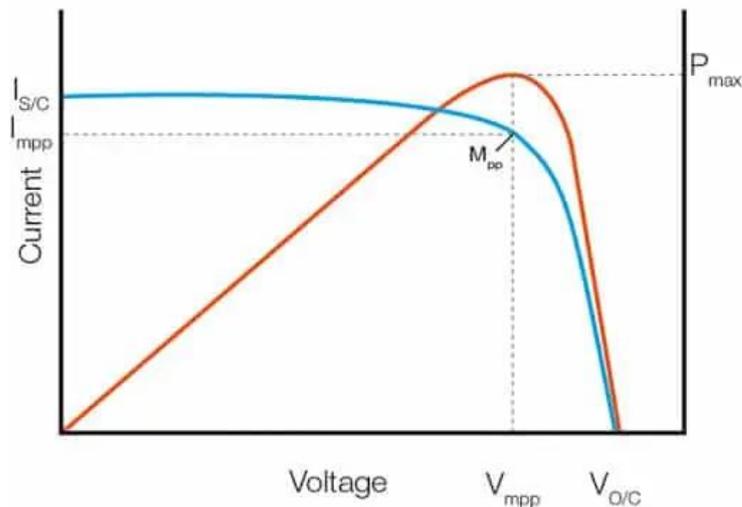
Cabe recalcar que los parámetros característicos mostrados en la [Tabla 1](#) vienen incluidos en las hojas de especificaciones técnicas de los fabricantes y están definidos en estas condiciones. Sin embargo, pocas veces los módulos fotovoltaicos alcanzan estas condiciones, ya que un nivel de irradiancia de 1000 W/m² puede alcanzarse al mediodía, mientras que la temperatura de 25°C puede cambiar dependiendo del estado del clima.

4.4. Curva P-V

La curva P-V, también conocida como la curva de potencia-voltaje, es una representación gráfica de la relación entre la potencia eléctrica generada por un panel FV y el voltaje en sus terminales. Es una herramienta fundamental para comprender y evaluar el rendimiento de los paneles FV en diferentes condiciones operativas.

La curva P-V es útil para determinar el punto de máxima potencia (*Mpp*, por sus siglas en inglés), que es el punto en el que el panel FV produce la mayor cantidad de potencia eléctrica. Este punto varía según las condiciones de iluminación, temperatura y carga conectada al panel. En la [Figura 9](#) se puede observar la forma que tiene la curva P-V.

Figura 9
Representación gráfica de la curva P-V



Nota. Curva de color azul es la curva I-V y la curva roja P-V y M_{pp} es el punto de máxima potencia del panel

En resumen, la curva P-V es una herramienta esencial para entender el comportamiento y el rendimiento de un panel FV bajo diversas condiciones. Facilita la toma de decisiones en el diseño, instalación y operación de sistemas solares, contribuyendo a maximizar la eficiencia y la producción de energía eléctrica a partir de fuentes solares.

4.4.1. Relación entre curva I-V y P-V

Como ya se explicó en la [Sección 4.3](#), la curva I-V, o curva de corriente-voltaje, es otra representación gráfica fundamental utilizada en el análisis de paneles FV, y se diferencia de la curva P-V en la variable que se mide y representa en cada eje.

Ambas curvas son valiosas y complementarias al evaluar paneles solares y sistemas fotovoltaicos. La elección entre la curva P-V y la curva I-V dependerá de los objetivos específicos del análisis y del tipo de información que se desee obtener. En la práctica, a menudo se utilizan ambas para obtener una visión completa del rendimiento de un sistema fotovoltaico.

4.5. Graficador de Curvas I-V

El graficador de curvas I-V es un instrumento que captura las características I-V de los SFV correspondientes a condiciones ambientales variables. El dispositivo es ampliamente utilizado para evaluar la generación de energía, rendimiento y detectar las condiciones de falla de los generadores de energía fotovoltaica así es como lo manifiesta (Zhu & Xiao, 2020). En

otras palabras, el graficador de curvas I-V permitirá estar más seguro que el funcionamiento de panel solar es óptimo, evitando pérdidas de energía y según la variación de la curva se determinara el tipo de inconveniente que presente un módulo tal como se muestra en el punto [4.3.1](#).

4.5.1. Partes Básicas de un Graficador de Curvas I-V

El principio básico de los trazadores de curvas I-V es variar la salida fotovoltaica de la condición de circuito abierto a la de cortocircuito y adquirir la variación del voltaje y la corriente. La operación incluye tres partes básicas:

- **Sistema de adquisición de datos (DAQ)**

Es el encargado de leer los valores de voltaje y corriente de un módulo fotovoltaico, la resolución del graficador de curvas I-V depende del número de puntos de medición, debido a que los conjuntos fotovoltaicos a escala comercial necesitan registrar grandes cantidades de datos, por este motivo el DAQ tiene que ser rápido cerca de las 250 muestras por segundo y tener una memoria mínimo de 64Gb para el almacenamiento de información.

- **Acondicionador de energía**

La resistencia variable y una carga electrónica son elementos de un acondicionador de energía. El acondicionador de energía se utiliza para ajustar y optimizar el rendimiento de un generador fotovoltaico, que convierte la luz solar en energía eléctrica lo cual ayudará a variar la carga en los terminales del generador fotovoltaico esto con el objetivo de poder obtener una curva I-V.

- **Estrategia de control**

Una buena estrategia de control se basa en poder enviar con precisión la señal de control al acondicionador de potencia y medir de manera efectiva los valores I-V de un SFV, en otras palabras, para que la estrategia de control opere de manera correcta, dependerá del funcionamiento de las dos primeras partes básicas que conforma un graficador de curvas I-V.

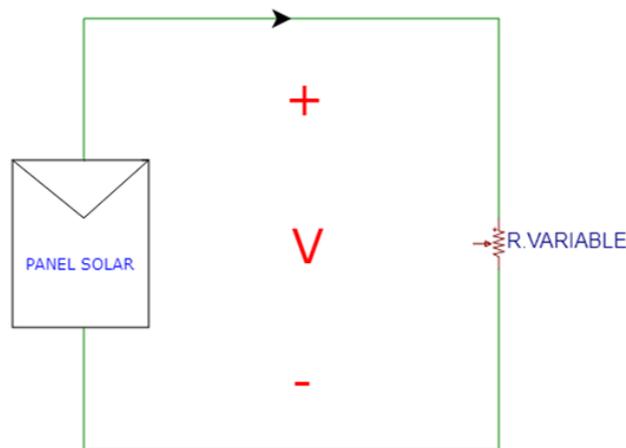
4.5.2. Métodos de Construcción

Existen varios métodos que pueden emplearse para obtener la Curva I-V al momento de variar la carga en los terminales del generador fotovoltaico. Dichos métodos que se pueden emplear son:

- **Método de Carga Resistiva**

El método de carga resistiva es el procedimiento más sencillo para obtener las curvas I-V de un módulo fotovoltaico. En este método se emplea un resistor variable para obtener los puntos de operación de la curva, tal como se puede apreciar en la [Figura 10](#).

Figura 10
Esquema de resistencia variable

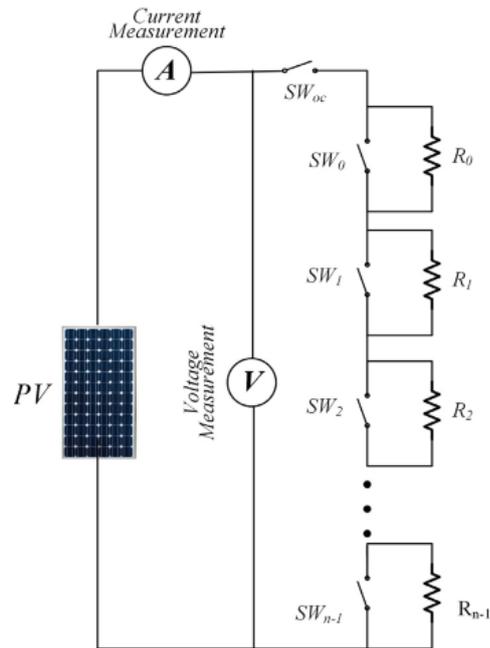


Nota. Circuito equivalente del método de carga resistiva

De esta manera ([Duran et al., 2008](#)) explica que la forma más sencilla de medir la curva I-V de un módulo es usar una resistencia variable R como se muestra en la [Figura 10](#). El valor de R variará en pasos de cero a infinito para capturar los puntos de la curva I-V de cortocircuito a circuito abierto, midiendo la tensión y la corriente en cada paso. Este método solo es aplicable a módulos de baja potencia ya que las resistencias para mayor potencia apenas están disponibles.

Para mejorar la calidad de la medición, se aplica un algoritmo para acelerar el trazado I-V, este método se lo presenta como un esquema binario para obtener las curvas I-V y contiene varias resistencias combinadas con interruptores, las cuales son controlados por un microcontrolador, permitiendo tener una gran cantidad de valores de resistencias y de esta manera obtener curvas I-V suaves ([Zhu & Xiao, 2020](#)). La configuración del circuito se puede observar en la [Figura 11](#).

Figura 11
Esquema Binario



Nota. Método de carga resistiva con esquema binario donde PV es el panel solar. Tomado de *A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer* (p.349) por Zhu & Xiao, 2020.

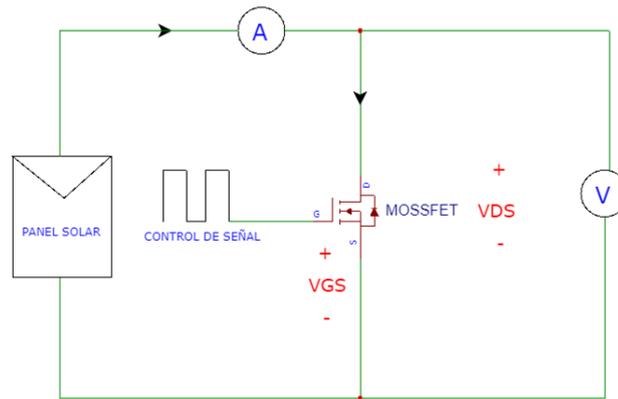
A pesar de la sencillez de este método, su utilización tiene una serie de inconvenientes y restricciones.

- Un banco de resistencias que permita cubrir todo el rango de la curva I-V a menudo es grande, pesado, y su ajuste es complicado.
- Otro problema es conseguir que los puntos de medición estén distribuidos uniformemente a lo largo de toda la curva.

- **Método de Carga Electrónica**

Este método utiliza un transistor (MOSFET, IGBT o BJT) como carga tal como se observa en la [Figura 12](#). El transistor se comporta como una resistencia variable. El voltaje drenador-fuente se modula a través del voltaje puerta-fuente en el caso de usar un transistor MOSFET o un IGBT, o a través de la corriente de base en el caso de usar un BJT. De esta manera, las curvas I-V pueden obtenerse rápidamente empleando este método ([Zhu & Xiao, 2020](#)).

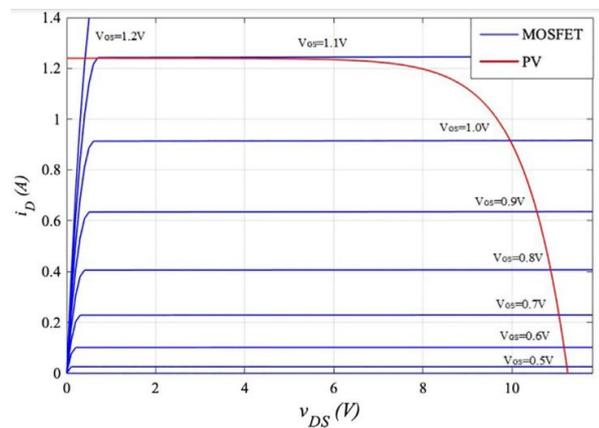
Figura 12
Esquema de Trazador de Curvas I-V con MOSFET



Nota. Circuito equivalente del método de carga electrónica

La corriente de drenaje I_D se puede controlar al variar el voltaje puerta-fuente V_{GS} . Toda la curva I-V puede obtenerse si V_{GS} varía en un rango adecuado y se consiguen distintos puntos de la curva I-V del módulo fotovoltaico, tal como se muestra en la [Figura 13](#), por lo cual la utilización de circuitos de control resulta de gran importancia ([Zhu & Xiao, 2020](#)).

Figura 13
Características I-V de un módulo fotovoltaico y de un transistor MOSFET



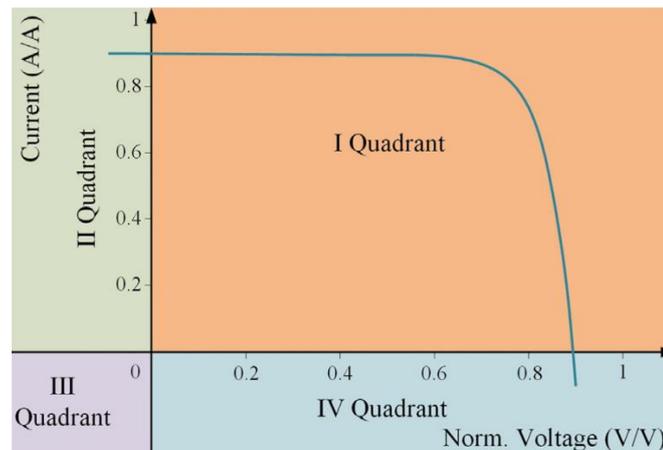
Nota. Grafica sobre la variación de V_{GS} en curva I-V en transistor MOSFET. Tomado de *A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer* (p.350) por [Zhu & Xiao, 2020](#)

Sin embargo, el uso de este método se limita a aplicaciones de media potencia, ya que los transistores deben consumir toda la potencia proporcionada por el generador fotovoltaico. Además, el alto costo de los transistores de alta calidad significa que este enfoque no es adecuado para grandes sistemas fotovoltaicos.

- **Método Suministro de Energía de Cuatro Cuadrantes**

El método conforma un sistema capaz de entregar y disipar energía; en otras palabras, puede generar o absorber corriente con voltaje bipolar (positivo o negativo). Se puede utilizar como carga ajustable para otras fuentes de alimentación u otros equipos. Para un módulo fotovoltaico el principal interés es obtener la curva I-V en el primer cuadrante. Pero, la exploración de los puntos que se encuentran en el segundo y cuarto cuadrante es decir los valores de corriente y voltaje respectivamente (Duran et al., 2008). Tal como se observa en la Figura 14.

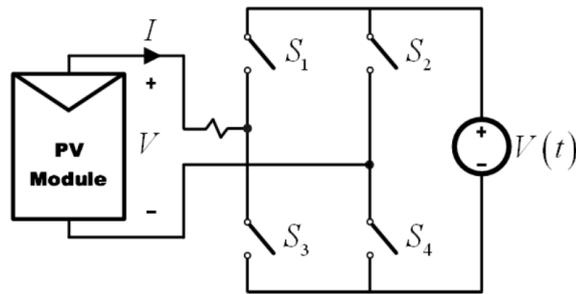
Figura 14
Curva I-V con el Método Suministro de Energía de Cuatro Cuadrantes



Nota. Grafica de Curva I-V especificado por cuadrante. Tomado de *A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer* (p.351) por Zhu & Xiao, 2020

Una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes puede verse como una fuente de alimentación $V(t)$, cuya salida puede variar mediante una señal de entrada de referencia o programarse para barrer un rango de valores (Duran et al., 2008). El esquema del circuito se muestra en la Figura 15.

Figura 15
Circuito del método de suministro de cuatro cuadrantes



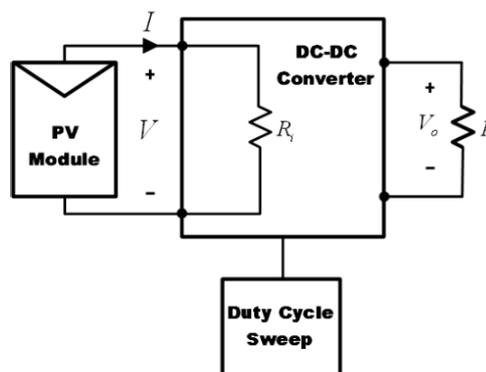
Nota. El gráfico es un esquema de circuito del método de suministro de cuatro cuadrantes donde PV es el panel solar. Tomado de *Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review* (p.3) por Duran et al., 2008

El método de fuente de alimentación de cuatro cuadrantes es el más rápido y preciso que los demás métodos. La clasificación de medición puede llegar a 1000 V/100 A. Empero, la fuente de alimentación de cuatro cuadrantes es costosa y voluminosa por esta razón, este método se ha limitado a experimentos de laboratorio (Zhu & Xiao, 2020).

- **Método con Convertidores DC-DC.**

Los convertidores DC-DC se emplean para simular una resistencia virtual en los terminales de un módulo fotovoltaico y de esta manera obtener la correspondiente curva I-V. En la [Figura 16](#) se muestra el circuito esquemático de los trazadores I-V que emplean convertidores DC-DC.

Figura 16
Esquema de Trazador de Curvas I-V



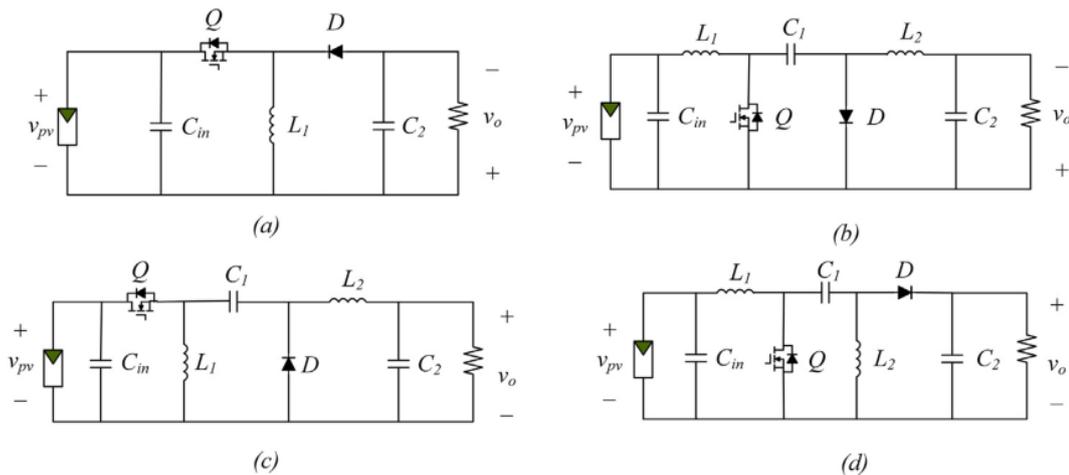
Nota. Circuito esquemático de los trazadores I-V que emplean convertidores DC-DC. Tomado de *Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review* (p.4) por Duran et al., 2008.

Existen cuatro configuraciones dentro de este método las cuales son las siguientes:

- Convertidores *Buck-Boost*.** - Los convertidores *Buck-Boost* no son adecuados para trazar las curvas I-V, esto debido a que estos convertidores no permiten medir valores cercanos a la corriente de cortocircuito y tampoco permiten medir puntos que se encuentren cercanos al voltaje de circuito abierto (Zhu & Xiao, 2020).
- Convertidores *Cuk*.** – Con este convertidor se obtiene una reproducción de la curva I-V con menos ondulación.
- Convertidores *Zeta*.** – Este tipo de convertidor poseen una corriente nominal más baja que en las otras dos configuraciones.
- Convertidores *SEPIC*.** – Esta al igual que el convertidor *Zeta* tiene una corriente nominal baja y la gráfica de la curva I-V tiene baja ondulación.

En la [Figura 17](#) se muestra un esquema de los circuitos de cada una de las configuraciones mencionadas dentro de método de convertidores DC-DC.

Figura 17
Configuraciones de los Convertidores DC-DC.



Nota. Configuraciones DC-DC empleadas para la obtención de las curvas I-V (a) *Buck-Boost* (b) *Cuk* (c) *Zeta* (d) *SEPIC*. Tomado de *A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer* (p.352) por Zhu & Xiao, 2020

En definitiva, el uso de este tipo de trazadores permite obtener las curvas I-V de manera efectiva y a bajo costo, aunque su utilización ocasiona que se produzcan fluctuaciones de voltaje y corriente.

- **Método de Carga Capacitiva**

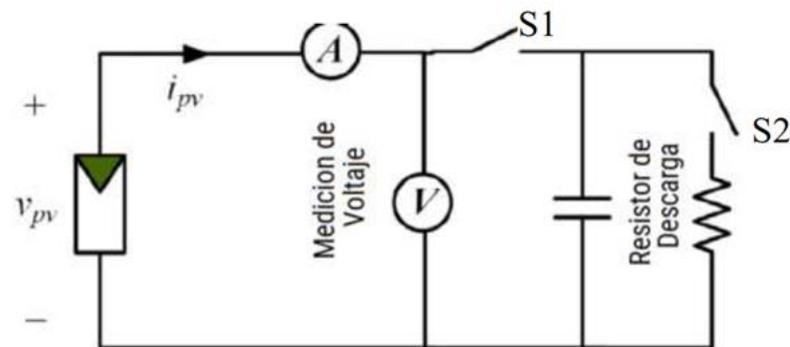
Este último método será el que se empleará para la construcción de graficador de curvas I-V el cual se lo detalla a continuación, explicando el funcionamiento y comportamiento del circuito que se presentará para el diseño.

El método de carga capacitiva se puede usar en SFV para dos aplicaciones típicas:

- Una forma muy simple y económica de rastrear la curva I-V en un SF de cualquier tamaño.
- Para rastrear la potencia máxima, especialmente cuando se produce el sombreado parcial (Spertino et al., 2015).

El procedimiento de carga capacitiva se vale de un condensador para adquirir las curvas I-V del módulo fotovoltaico, abarcando desde la condición de cortocircuito hasta la condición de circuito abierto. El esquema correspondiente se encuentra detallado en la [Figura 18](#) presentada a continuación.

Figura 18
Esquema del Circuito del Método de Carga Capacitiva



Nota. Esquema de método de carga capacitiva para la obtención de la curva I-V donde V_{pv} es el voltaje del panel y i_{pv} la corriente. Tomado de *A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer* (p.349) por Zhu & Xiao, 2020

De acuerdo a la [Figura 18](#), al inicio de la medición el condensador debe estar descargado y los interruptores S1 y S2 abiertos. Una vez que se cierra el interruptor S1, el capacitor se empieza a cargar desde la condición de cortocircuito. Al aumentar la carga del condensador, la corriente disminuye, en tanto que el voltaje aumenta. Una vez que el condensador este completamente cargado, se alcanza la condición de circuito abierto y la medición de la curva I-V termina (Petrone et al., 2017).

Para poder realizar una nueva medición, es necesario descargar la energía del condensador, por lo cual se abre el interruptor S1 y se cierra el interruptor S2, de tal manera que el condensador se descargue a través de la resistencia de descarga. Una vez finalizada la descarga del capacitor, el interruptor S2 se abre y el trazador queda listo para una nueva medición.

Los capacitores empleados en el diseño de circuito tienen que ser de alta calidad, es decir, que los capacitores deben tener pequeñas pérdidas, por este motivo se recomienda utilizar capacitores electrolíticos.

Un parámetro importante que hay que tomar en cuenta al momento de efectuar el método de carga capacitiva. Según Muñoz & Lorenzo, (2006) explica que es el tiempo de carga del condensador el cual deberá estar dentro del intervalo de 20ms - 100ms, puesto que esto permite que las condiciones ambientales (irradiación y temperatura) no varíen durante la medición, así como también que los componentes del sistema no se sobrecalienten. No obstante, debido a la gran cantidad de circunstancias de operación y de características de los sistemas de generación fotovoltaicos.

Dentro de este método existen algunos parámetros que hay que tomar en cuenta, como el valor de capacitor, el tiempo de carga de mismo y una resistencia de descarga, la obtención de estos valores se lleva a cabo mediante la aplicación de fórmulas específicas, las cuales se describen detalladamente a continuación.

La fórmula para el cálculo de capacitancia y tiempo de carga se la presenta de la siguiente manera:

$$C = \frac{I_{SC} \times T_m}{V_{OC}} \quad (1)$$

Donde:

C : Capacitancia

I_{SC} : Es la corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico.

T_m : Tiempo de carga del capacitor

V_{OC} : Voltaje de circuito abierto de módulo fotovoltaico.

Hay que tomar en cuenta que los valores de I_{SC} y V_{OC} vienen en las especificaciones técnicas del panel solar, este valor dependerá del modelo y tamaño de módulo fotovoltaico a utilizar para graficar la curva I-V.

Al calcular el valor de C, es esencial considerar un tiempo que se encuentre dentro de los rangos sugeridos por el método, asegurando que las condiciones ambientales permanezcan constantes. Además, dicho tiempo debe ajustarse adecuadamente a las capacidades del sistema de adquisición de datos (DAQ), garantizando así una captura sin contratiempos de la información. Con este propósito, se realiza un despeje a la ecuación (1), expresando el tiempo de carga de la siguiente manera.

$$T_m = \frac{C \times V_{OC}}{I_{SC}} \quad (2)$$

Así, mediante este proceso, se asignarán valores específicos a la capacitancia, y el tiempo de carga resultante del capacitor deberá situarse dentro de un intervalo predefinido para la aplicación efectiva de este método.

Para el caso de la resistencia de descarga, el valor tiene que ser lo más alto posible porque de esta forma no influirá en el funcionamiento normal del circuito ni las mediciones, para este cálculo aplicaremos la siguiente ecuación.

$$R = \frac{T}{C} \quad (3)$$

Donde:

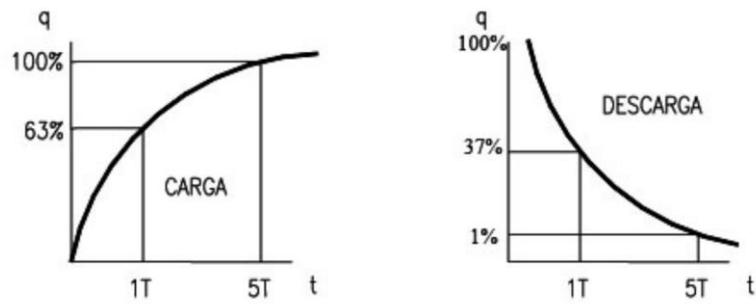
R : Valor de resistencia de descarga

T : Tiempo de descarga de capacitor

C : Valor de capacitancia

A continuación, en la [Figura 19](#) se presenta una representación gráfica del comportamiento del capacitor respecto a la carga y descarga del mismo.

Figura 19
Carga y Descarga de un Capacitor



Nota. Graficas de carga y descarga del capacitor respecto al tiempo. Tomado de *Engineering of photovoltaic system* por (Lorenzo, 2011)

Para finalizar, en la [Tabla 2](#) se presenta un resumen de todos los métodos que se pueden emplear para el graficador de curvas I-V, con las diferencias que existen entre cada uno de ellos y poder detallar por que el método de carga capacitiva es el más adecuado para aplicarlo en la construcción del graficador de curvas I-V.

Tabla 2
Resumen de los Métodos

METODOS DE CONSTRUCCION				
Carga resistiva	Carga electrónica	Suministro de energía de cuatro cuadrantes	Convertidores DC-DC	Carga capacitiva
Es aplicable módulos de baja potencia	Se limita a aplicaciones de media potencia.	Alto costo y volumen.	No permiten medir valores cercanos a la corriente y al voltaje, de cortocircuito y circuito abierto respectivamente.	Una forma muy simple y económica de rastrear la curva I-V en un SFV de cualquier tamaño.
Los puntos de medición no están distribuidos uniformemente a lo largo de toda la curva	Alto costo de los transistores de alta calidad	Se limita a pruebas en laboratorios	Ocasiona fluctuaciones de voltaje y corriente.	Permite trabajar con potencias elevadas y es mejor en cuanto a precisión.

5. Metodología

5.1. Justificación del método elegido (Carga Capacitiva)

Como se pudo apreciar en la [Sección 4.4.2](#) se realizó un análisis detallado sobre todos los métodos de construcción para el graficador de curvas I-V donde se explica el desempeño de cada uno de ellos, todos con un mismo fin, poder examinar el funcionamiento de un panel FV, algunos con unas ventajas sobre otro como el método de suministro de cuatro cuadrantes el cual era uno de los más rápidos y precisos pero la desventaja es el costo y tamaño del equipo, por lo tanto en base a este análisis, se muestra en la [Tabla 2](#) un resumen detallando diferencias entre cada uno de los métodos en donde prevalece el método de carga capacitiva como el mejor para poder aplicarlo en la construcción del graficador, debido a que este es excelente en cuanto a precisión, costo, mide potencias elevadas y permite la obtención de curvas I-V sin fluctuaciones de voltaje y corriente, permitiendo controlar el tiempo de obtención de la curva al elegir el valor del condensador de manera adecuada. A demás es el método más usado entre los graficadores comerciales debido a que con este método la curva puede tener desviaciones solo del $\pm 1\%$ con respecto a la curva real.

5.2. Descripción de método propuesto

El método a utilizar para la construcción del graficador de curvas I-V es de carga capacitiva, el cual se basa en obtener los valores de corriente y voltaje de un panel FV. Dichos valores se obtendrán a través de sensores los cuales estarán previamente evaluados para su uso.

Luego de obtener estos valores, se registrarán en un sistema de adquisición de datos (DAQ). Una vez almacenados, se llevará a cabo la representación gráfica de la curva, la cual estará disponible para su visualización en una pantalla conectada a la Raspberry a través de HDMI. Posteriormente, se descargará el capacitor para prepararse para una nueva medición. El sistema propuesto emplea dos capacitores conectados en paralelo con el fin de cumplir a cabalidad el tiempo de carga del capacitor, necesario para el método empleado, el cual es de 20ms a 100ms.

Los valores de los capacitores se los calcula en base a las características de los paneles fotovoltaicos en los que se van a tomar las medidas de la curva I-V, para la

alimentación de equipo se emplearan dos tipos de fuentes de 5v y 12v con el fin de alimentar sensores y el dispositivo de almacenamiento de datos.

El diseño empleado se lo ha dividido en dos partes los cuales son la etapa de fuerza en la que consta los circuitos de carga de descarga de los capacitores y la etapa de control y adquisición de datos la cual permite la obtención de los valores de voltaje y corriente a través de sensores. Al graficar la curva, se almacenará en la *Raspberry* para permitir su posterior análisis y poder controlar el funcionamiento del SFV, las figuras obtenidas se las podrá descargar en una memoria USB, con el objetivo de poder visualizarlas en un equipo más grande como una computadora e irlas guardando para poder realizar comparaciones con distintas medidas que se tomen con el graficador.

5.3. Materiales de la Etapa de Fuerza

En esta etapa se detalla todos los elementos que forman parte de los circuitos de carga y descarga de los condensadores como resistencia, transistores IGBT, capacitores y fusibles.

5.3.1. Fusible

Se emplea un fusible con el fin de proteger el equipo de corrientes cuyos valores superen las especificaciones para los cuales el equipo está diseñado. El fusible utilizado es el fusible cerámico F30AL250V con una capacidad nominal de 30A y opera a un voltaje máximo de 250V. En la [Figura 20](#) se puede apreciar el tipo de fusible empleado en el equipo.

Figura 20
Fusible cerámico F30AL250V



Nota. Fusible para DC que soporta 30A

5.3.2. Transistores IGBT

Dentro de diseño del equipo se emplean dos transistores los cuales el primero se encarga de controlar la carga de los capacitores y el segundo encargado de controlar la descarga del arreglo de capacitores. A continuación, se detalla el funcionamiento de cada uno de los transistores.

- IGBT 1.- Permite que el SF se conecte con el arreglo de condensadores. De esta manera, al activarse el transistor IGBT 1, los condensadores se empezarán a cargarse desde cero hasta el voltaje de circuito abierto, esto en un periodo tiempo que se encuentra dentro del rango establecido para el diseño.
- IGBT 2.- Este transistor se activa una vez finalizado el proceso de carga y permite que los capacitores se descarguen, esto se realiza por razones de seguridad y para que el equipo quede listo para una nueva medición.

Los transistores a utilizar para en el graficador de curvas I-V es el GT40RR22 de marca TOSHIBA. Entre las características principales de los transistores tenemos el voltaje máximo de colector-emisor es de 1350V y la corriente máxima de colector es de 40A a una temperatura de 25°C. Estos dispositivos pueden operar a una temperatura en el rango de -55°C a +175°C. Además, el voltaje de corte de puerta-emisor es de 5V.

Se usan estos transistores debido a que sus características son las indicadas para el graficador de curvas I-V propuesto, debido a que el equipo desarrollado permite obtener las curvas I-V de los SF con voltajes de circuito abierto de hasta 350 V y con corrientes de cortocircuito hasta los 20 A. En la [Figura 21](#) se puede apreciar el transistor GT40RR22.

Figura 21
Transistor IGBT GT40RR22



Nota. El IGBT soporta una corriente en DC de 33A a 40A

En la [Tabla 3](#) se puede observar más datos importantes sobre el IGBT que ayudo a poder realizar un correcto diseño del circuito.

Tabla 3
Especificaciones Técnicas del IGBT GT40RR22

Tensión colector-emisor	1350 V
Voltaje puerta-emisor	± 25 V
Corriente colector (DC) ($T_c = 25^\circ$)	40 A
Corriente colector (DC) ($T_c = 100^\circ$)	33 A
Disipación de energía del colector	230 W

5.3.3. Capacitores

Dentro del diseño eléctrico se utilizan dos capacitores conectados en paralelo para poder cargar los mismos dentro del tiempo establecido para el método sea para el **panel solar 1** (un panel) o **panel solar 2** (dos paneles conectados en serie). Para poder adquirir los capacitores empleados se realizó un cálculo basándonos en las especificaciones técnicas de cada panel FV, con el objetivo de que el equipo funcione adecuadamente para cualquiera de los dos tipos de paneles que se encuentran en la Universidad.

A continuación, se detallan los cálculos realizados para cada uno de los paneles fotovoltaicos en los cuales se tomarán los datos para graficar la curva I-V. Estos cálculos se realizan para justificar que la capacitancia empleada con el arreglo cumple a cabalidad para ser usados para ambos paneles.

En la [Tabla 4 y 5](#) se detalla los valores de V_{OC} e I_{SC} de los paneles fotovoltaicos 1 y 2 respectivamente, con los cuales nos ayudamos en el cálculo para poder obtener el valor de capacitancia de 11200 μF en un arreglo en paralelo. Este proceso se realiza con el propósito de asegurar que, al emplear la ecuación (2), el tiempo de carga se encuentre dentro de los límites definidos, los cuales oscilan entre 20 ms y 100 ms, según se detalla en la [Sección 4.4.2](#) del método de carga capacitiva.

Tabla 4*Valores de corriente y voltaje de panel 1*

V_{oc}	37.06V
I_{sc}	13.85A

Cálculo de T_m con la ecuación (2)

$$T_m = \frac{11200\mu F \times 37.06V}{13.85A}$$

$$T_m = 29.97ms$$

Tabla 5*Valores de corriente y voltaje de panel 2*

V_{oc}	74.12V
I_{sc}	13.85A

Cálculo de T_m

$$T_m = \frac{11200\mu F \times 74.12V}{13.85A}$$

$$T_m = 59.94ms$$

Como se puede observar en el cálculo, para ambos paneles FV el tiempo de carga de los capacitores está dentro del rango está establecido en el método.

Los capacitores son los componentes fundamentales del graficador de curvas I-V, ya que el método empleado en el diseño consiste en cargar los capacitores desde la condición de cortocircuito hasta la condición de circuito abierto y de esta manera obtener las curvas características corriente y voltaje.

Los capacitores a utilizar para el equipo son dos NIPPON CHEMI-CON con una capacitancia de 5600uF conectados en paralelo. Cada uno de los capacitores está diseñado para operar a un voltaje máximo de 350V a una temperatura máxima de 105 °C. En la [Figura 22](#) se muestra la fotografía del capacitor.

Figura 22
Capacitor NIPPON CHEMI-CON



Nota. Es un capacitor electrolítico que soporta una corriente de 21.9A
En la [Tabla 6](#) se indican más especificaciones técnicas sobre el capacitor.

Tabla 6
Especificaciones Técnicas del Capacitor NIPPON CHEMI-CON

Rango de temperatura	-25 ~ 105 °C
Voltaje nominal	350 V
Resistencia a Temperatura/Tiempo	105 °C / 5000 horas
Vida útil Temperatura/Tiempo	1000 horas
Corriente de ondulación nominal	21900mArms / 105°C / 120Hz
Tolerancia de capacitancia	-20 ~ 20%(M) / 20°C, 120Hz

5.3.4 Resistencia de descarga

La resistencia de descarga que se utiliza en el trazador de curvas I-V cumple la función de descargar la energía almacenada en los capacitores con el único fin de poder volver a trazar otra curva que se necesite analizar.

Para el equipo se utiliza una resistencia tipo tubo L100J500 de 100 W y 500Ω que soporta hasta 2845V, esta resistencia se puede observar en la [Figura 23](#).

Figura 23

Resistencia de descarga L100J500



Nota. Es una resistencia grande que puede soportar hasta 2845V y ayuda a la descarga del capacitor.

5.4. Materiales de etapa de control y adquisición de datos

En esta etapa se detallan los materiales que ayudaron a tomar datos para poder graficar la curva I-V entre ellos se encuentran sensores, *raspberry* y dentro de ello también los dispositivos que ayudan a la alimentación del circuito en general.

5.4.1. *Raspberry PI 3 B +*

Para que el sistema funcione de manera eficiente se necesita un equipo que nos permita tener el control de datos a recopilar a través de los sensores y a su vez se puedan almacenar para ser analizados, es por esta razón que se emplea el uso de una *raspberry* Pi 3 B+ como un mini computador que se alimenta con 5 V y una corriente de 2.5 A. Los datos recopilados se almacenan en una microSD de 64 Gb, además la *raspberry* contiene 4 puertos USB, un puerto para cable Ethernet, un puerto HDMI en el cual se incluye una pantalla de 5 pulgadas donde se podrá observar la gráfica, y por ultimo los 40 pines GPIO (*General Purpose Input Output*) que mediante programación en *Phyton* se les especifica que función cumplen cada uno de los pines seleccionados, entre ellos se encuentra el control de los sensores y la activación de los IGBT.

Es así que este mini computador recibe señales provenientes de los sensores de voltaje y corriente los cuales serán representados en una gráfica de curva I-V para su posterior análisis, además también envía señales de 1 y 0 para activar y desactivar los IGBT utilizados para el control de los capacitores. Todo este proceso es posible gracias

al programa realizado en *Python* en el cual se le indica de manera adecuada todas las tareas antes mencionadas. En la [Figura 24](#) se puede observar la *raspberry* utilizada.

Figura 24
Raspberry PI3 B+



Nota. Contiene 4 puertos USB y un puerto para cable Ethernet con una memoria RAM de 1Gb.

5.4.2. *Transductor de voltaje*

Este es un sensor de voltaje para DC, el cual nos sirve para poder tomar la medida del voltaje del panel solar al momento de graficar la curva I-V y se lo conoce como transductor de voltaje LV25-P. En la [Figura 25](#) se observa la imagen del transductor de voltaje mientras que en la [Tabla 7](#) se observan algunas características del sensor.

Figura 25
Transductor de voltaje LV25-P



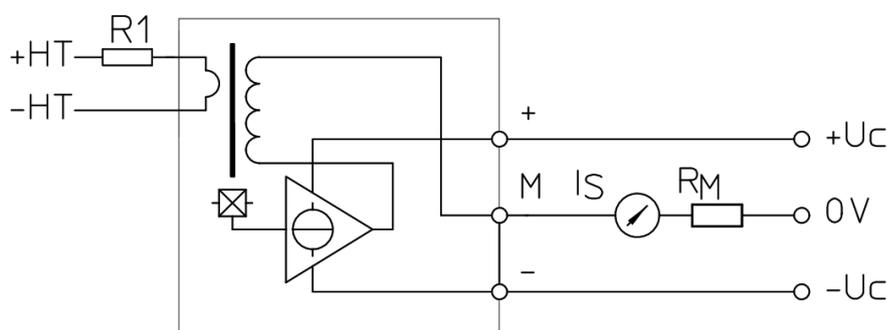
Nota. Es un sensor de voltaje industrial LEM específico para DC

Tabla 7
Especificaciones técnicas del transductor voltaje LV25-P

Símbolo	Significado	Valor
I_{PN}	Corriente primaria	10 mA
I_{SN}	Corriente secundaria	25 mA
V_{PN}	Voltaje Primario	10 V – 500 V
U_C	Fuente de voltaje	$\pm 12V$ o $\pm 15V$

El sensor tiene un circuito esquemático donde consta de un circuito primario y circuito secundario. El circuito primario consta de los terminales de panel solar y de una resistencia primaria, mientras que en el circuito secundario está conformado por la resistencia de medida y las entradas de las fuentes de alimentación que son de -12V y +12V como se observa en la [Tabla 7](#). El circuito esquemático se puede observar en la [Figura 26](#).

Figura 26
Circuito esquemático del transductor LV25-P



Nota. HT+ y HT- son los terminales donde se conectará el panel FV, mientras que U_C+ y U_C- es la alimentación del sensor.

El transductor de voltaje permite aislar galvánicamente el circuito primario del circuito secundario. Para poder medir el voltaje de los paneles fotovoltaicos una corriente proporcional a dicho voltaje debe circular por R_1 que esta conectada en serie con el transductor. Esto genera un voltaje menor en la resistencia R_M que es proporcional al voltaje del panel fotovoltaico. Los valores de las resistencias R_M que se pueden utilizar en el circuito se los muestra en la [Tabla 8](#).

Tabla 8
Valores de resistencia secundaria según el voltaje de alimentación

Resistencia Secundaria	Voltaje	Corriente	Valores
R_M	$\pm 12V$	$\pm 10mA$	$30\Omega - 190\Omega$
		$\pm 14mA$	$30\Omega - 100\Omega$
	$\pm 15V$	$\pm 10mA$	$100\Omega - 350\Omega$
		$\pm 14mA$	$100\Omega - 190\Omega$

5.4.3. Transductor de corriente

Es un sensor que permite obtener el valor de la corriente del panel fotovoltaico y se lo conoce como transductor de corriente LAH-25-NP en la [Figura 27](#) se observa el transductor y en el [Tabla 9](#) se especifica algunas características del mismo.

Figura 27
Transductor de voltaje LAH 25-NP



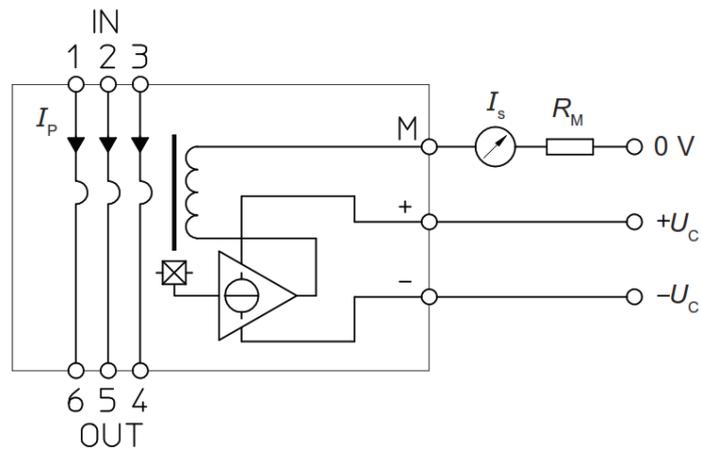
Nota. Es un sensor de corriente industrial LEM específico para DC

Tabla 9
Especificaciones técnicas del transductor de corriente LAH-25-NP

Símbolo	Significado	Valor
I_{PN}	Corriente primaria nominal	8-12-25 A
I_{SN}	Corriente secundaria	25 mA
U_C	Fuente de voltaje	$\pm 12V$ o $\pm 15V$

El transductor de corriente también dispone de un circuito esquemático donde el circuito primario tiene que estar conectado en serie con los capacitores de tal manera que la corriente que circula a través del transductor sea la misma que la que pasan por los capacitores que se encuentran conectados en paralelo. Mientras que el circuito secundario al igual que el del transductor de voltaje es para las fuentes de alimentación. En la [Figura 28](#) se puede observar el circuito esquemático del transductor de corriente.

Figura 28
Circuito esquemático del transductor LAH-25-NP



Nota. IN es la entrada de la corriente y OUT la salida, mientras que U_c+ y U_c- es la alimentación del sensor.

En este transductor existen varias configuraciones en el circuito primario que se pueden observar en la [Tabla 10](#)

Tabla 10
Configuraciones del circuito primario

Número	Corriente primaria nominal	Corriente primaria máxima	Configuración
1	25A	55A	
2	12A	27A	
3	8A	18A	

Para el generador de curvas I-V construido se utilizó la primera configuración debido a que esta nos permite tomar un mayor valor de corriente en el circuito primario que es de 25A y se acopla a las características principales del generador de curvas I-V puesto que el diseño propuesto tiene como límite soportar hasta 20 A.

Dentro del circuito secundario también existen valores de resistencias R_M que dependerán del valor de voltaje con que se alimente el transductor, dichos valores de las resistencias se lo pueden apreciar en la [Tabla 11](#).

Tabla 11
Valores de resistencia secundaria según voltaje de alimentación

Resistencia secundaria	Voltaje	Temperatura	Valores
R_M	$\pm 12V$	70 °C	0Ω - 284Ω
		85 °C	0Ω - 280Ω
	$\pm 15V$	70 °C	67Ω - 398Ω
		85 °C	70Ω - 394Ω

5.4.4. ADC ADS1115

El ADS1115 es el dispositivo que nos ayuda a la adquisición de los datos necesarios para el graficador de curvas I-V y a su vez nos permite convertir las señales analógicas recibidas por los sensores de voltaje y corriente a señales digitales para que la *raspberry* pueda adquirir los datos de los sensores de manera correcta y posteriormente poder ser almacenarlos. Esto debido a que la *raspberry* solo admite señales digitales en la [Figura 29](#) se puede observar el ADC (*Analog-to-Digital Converter*) utilizado en el graficador de curvas I-V.

Figura 29
ADC ADS 1115



Nota. Convertidor de señales analógicas a digitales que tiene 8 frecuencias de muestreo que van desde los 8sps hasta 860sps.

El ADS1115 es un ADC de 16 bits que tiene diferentes frecuencias de muestreo programables, por lo cual permite controlar el número de muestras por segundo (sps), así el ADC tiene ocho frecuencias de muestreo diferentes que van desde 8 sps hasta 860 sps. Además, este ADC posee un amplificador de ganancia programable PGA, el cual permite establecer seis valores de voltaje de referencia diferentes para configurar el rango completo de bits y además admite cuatro señales analógicas, de las cuales se harán uso dos para los sensores que se van a utilizar, dichos sensores se comunican con la *raspberrypi* para la adquisición de los datos por medio de una comunicación I2C mediante programación en el ADS1115, en donde se desarrolló un script en *Python*.

En la [Tabla 12](#) se presentan las frecuencias de muestreo y su tiempo de obtención, mientras que en la [Tabla 13](#) se muestran los voltajes de referencia que pueden programarse y el correspondiente tamaño del bit menos significativo LSB del ADC.

Tabla 12
Frecuencias de muestreo y tiempo de muestra del ADS1115

Frecuencia de muestreo (sps)	Tiempo por muestra (ms)
8	125
16	65.5
32	31.25
64	15.625
128	7.8125
250	4
475	2.1053
860	1.1628

Tabla 13
Voltajes de referencia y tamaño LSB del ADS1115

Voltaje de referencia	LSB (μV)
$\pm 6.144\text{ V}$	$187.5\ \mu\text{V}$
$\pm 4.096\text{ V}$	$125\ \mu\text{V}$
$\pm 2.048\text{ V}$	$62.5\ \mu\text{V}$
$\pm 1.024\text{ V}$	$31.25\ \mu\text{V}$
$\pm 0.512\text{ V}$	$15.625\ \mu\text{V}$

$\pm 0.256 \text{ V}$	$7.8125 \mu\text{V}$
-----------------------	----------------------

Ahora se detallan los materiales empleados para la alimentación del graficador de curvas I-V, las cuales constan de dos tipos de fuentes que son las siguientes.

5.4.5. Fuente de 5V

La fuente de 5V que se empleó en el graficador alimenta todos los componentes electrónicos de los circuitos de control y de la etapa de incluido la *raspberry*. La fuente utilizada es la SR-25-5 la cual permite conectarse a 110V y de salida obtendremos los 5V y 5A con una potencia de 25W, la fuente de voltaje utilizada se puede observar en la [Figura 30](#).

Figura 30
Fuente de alimentación SR-25-5



Nota. Fuente de 5V/5A que se alimenta con 110V

5.4.6. Fuente de 12V

Las fuentes de 12V utilizadas en el diseño son cuatro las cuales se distribuyen de la siguiente manera, 2 son para alimentar el IGBT1 e IGBT2 puesto que requiere que estas sean independientes de los demás circuitos de alimentación, mientras que las otras 2 son para los sensores de voltaje y corriente, debido a que estos necesitan una alimentación de +12 V y -12 V para su funcionamiento.

Las fuentes utilizadas son una Hi-Link HLK-PM12 que al igual que la de 5V estas se conectan a 110V, pero en la salida tendremos un valor de 12V y 0.25A con una potencia de 3W. En la [Figura 31](#) se puede observar la imagen de la fuente empleada.

Figura 31
Fuente Hi-Link HLK-PM12



Nota. Fuente de 12V/0.25A que se alimenta con 110V

En la [Sección 5.3](#) y la [Sección 5.4](#) se acabaron de especificar todos los materiales empleados en el diseño del graficador de curvas I-V, cabe recalcar que se mencionaron los materiales más significativos dentro del diseño, pero no podemos dejar de lado a los materiales más comunes dentro de un circuito entre ellos se encuentran resistencias, transistores NPN 2N4401 y optoacopladores los cuales fueron incluidos dentro del circuito de disparo de los IGBT1 e IGBT2.

A continuación, en la [Tabla 14](#) se detallan de forma resumida los materiales mostrados en las secciones antes nombradas.

Tabla 14
Resumen de componentes empleados en el diseño del graficador de curvas I-V

Descripción	Componente	Cantidad	Características Principales
ETAPA DE FUERZA			
Fusible cerámico	F30AL250V	1	30A - 250V
IGBT	GT40RR22	2	40A - 1350V - 230W
Capacitor	NIPPON CHEMI-CON	2	5600uF 350V
Resistencia de descarga	L100J500	1	100W 500Ω
ETAPA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS			
Raspberry	PI 3B +	1	40 pines GPIO

			4 puertos USB 5V – 2.5A
Transductor de voltaje	LV25-P	1	500V
Transductor de corriente	LAH-25-NP	1	25A
ADC	ADS1115	1	16 bits 8 sps - 860 sps
Fuente de 5V	SR-25-5	1	5V - 5A
Fuente de 12V	Hi-Link HLK-PM12	4	12V – 0.25A - 3W
Transistores	2N4401	2	V_{ce} : 40V I_c : 600mV
Optoacopladores	PC817	2	-
	1 k Ω	2	-
	10 k Ω	4	-
	330 Ω	2	-
Resistencias	220 Ω	3	-
	470 Ω	1	-
	100 k Ω	1	-
	135 Ω	1	-

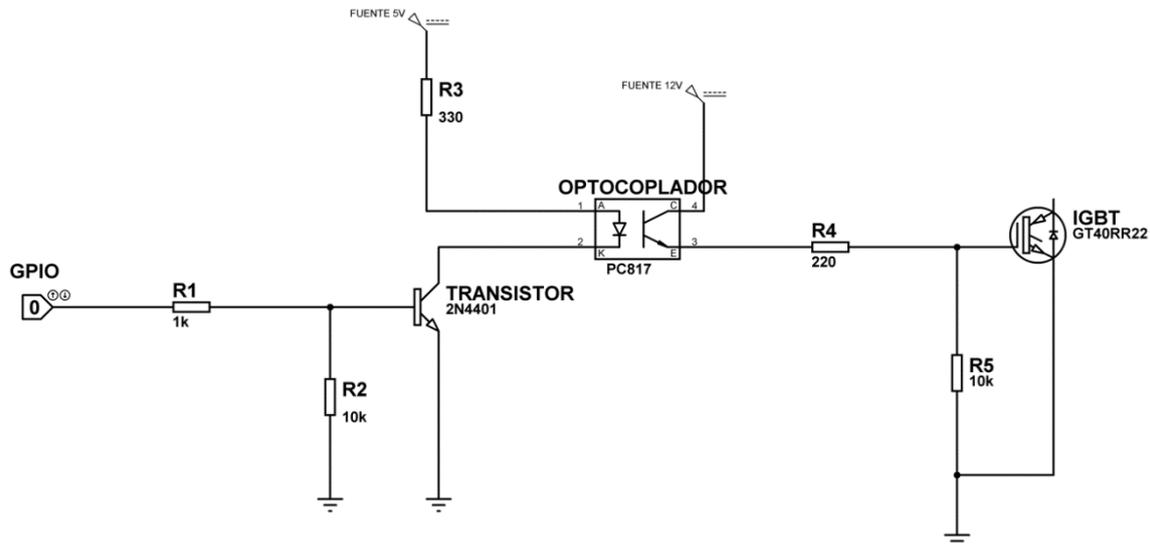
5.5. Circuitos empleados en el diseño del graficador de curvas I-V

En el diseño se emplean diferentes circuitos que ayudan a un funcionamiento óptimo del graficador de curvas I-V entre ellos se encuentran el circuito de disparo del IGBT1 e IGBT2, el circuito de carga y descarga de los capacitores, el circuito de lectura de los sensores y el circuito de alimentación, a continuación, se detallan cada uno de los circuitos mencionados.

5.5.1. Circuito de disparo de los IGBT.

Los IGBT tienen que activarse y desactivarse de manera coordinada para que en el proceso de la obtención de la curva I-V sea la correcta, es por ello que este circuito es de suma importancia debido a que también ayuda al control de la carga de descarga de los capacitores. En la [Figura 32](#) se muestra el esquema del circuito empleado.

Figura 32
Esquema del circuito de disparo de los IGBT



Nota. Disparo del IGBT junto con el optoacoplador

En la [Figura 32](#) se puede observar que en la entrada está conectado a un pin GPIO de la *raspberry* en el cual mediante programación se le indica cuando tiene que empezar a realizar el disparo a lo que el circuito se enciende el GPIO se encuentra en “0” es decir se encuentra apagado, al darle la señal de inicio desde la pantalla pasara el GPIO a “1” se encuentra encendido y empezara a enviar la señal de disparo al IGBT, la señal digital es controlada por el optoacoplador PC817 para que el IGBT la reciba sin ningún tipo de inconveniente.

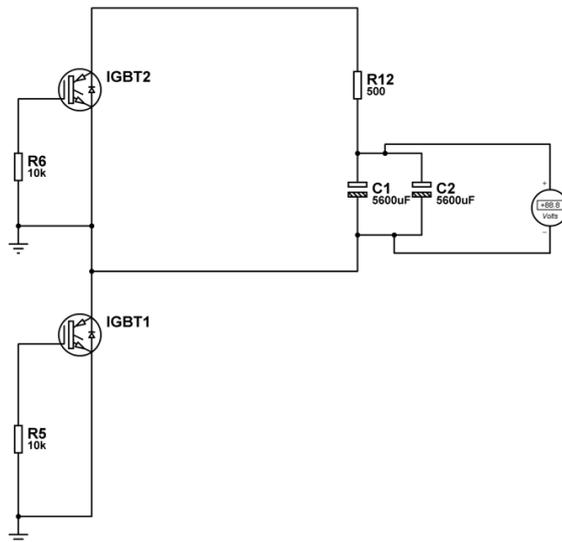
Hay que tomar en cuenta que pese a que el circuito sea el mismo para el IGBT1 e IGBT2 al inicio ambos se encuentran en “0” al momento de dar inicio desde la pantalla el IGBT1 se pasa a “1” mientras se carga de los capacitores, este proceso no se demorara mucho ya que la carga es rápida como se muestra en la [Sección 5.3.3](#). Una vez cargado mediante programación después de ocho segundos se lo apaga al IGBT1 y se enciende el IGBT2 para que empiece el proceso de descarga de los capacitores y así indicar que el graficador está listo para tomar otra muestra.

5.5.2. Circuito de carga y descarga de los capacitores.

A continuación, en la [Figura 33](#) se muestra el esquema de circuito de la carga y descarga de los capacitores.

Figura 33

Esquema de circuito de carga y descarga de los capacitores



Nota. Conexión de los dos IGBT y capacitores en paralelo

Como, se puede observar los capacitores de 5600 μF se encuentran conectados en paralelo, esto porque necesitamos cumplir con lo requerido para el graficador de curvas I-V, el cual que es una capacitancia total de 11200 μF que soporte un SFV de alta potencia y que el tiempo de carga se encuentre dentro del rango establecido, en la [Sección 4.4.2.](#), en serie se encuentra conectada la resistencia de descarga que igual soporta altas potencias tal como se especifica en la [Sección 5.3.4.](#)

En el esquema se puede observar de mejor manera como actúan los IGBT, al momento de recibir la señal de la *raspberry* el IGBT1 se activa y comenzara la carga, luego que se desactive el IGBT1 el IGBT2 se activa y empieza la descarga donde la corriente circula alrededor de los capacitores el IGBT2 y la resistencia así hasta que se descarga por completo. Algo muy importante que tenemos que hacer es puentear los IGBT con una resistencia de 10k Ω , debido a que los IGBT tiene un capacitor conector entre la puerta y el emisor y ahí se descarga la señal que entra desde los GPIO de la *raspberry*, esto se realiza para poder tener un mejor control en la carga y descarga de los capacitores pues si esto no se realiza los capacitores solo se quedaran cargados directamente.

5.5.3. Circuito lector de sensores

El circuito lector de los sensores es independiente para cada uno, es decir que un circuito será para el sensor de corriente y otro para el sensor de voltaje, dichos circuitos se diseñaron basándonos en la hoja de datos de cada sensor.

Para el sensor de voltaje tendremos que buscar las resistencias tanto para el circuito primario y secundarios, según la [Tabla 7](#) y [Figura 25](#) mostradas en la [Sección 5.4.2](#). la corriente primaria que ingrese por $R1$ tiene que ser $10mA$, para ello tendremos que partir del voltaje máximo que soporta el equipo el cual es de $350 V$. El valor de $R1$ se calcula de la siguiente manera aplicando la ley de ohm:

$$R1 = \frac{V_{max}}{I_{PN}} \quad (4)$$

Remplazamos los valores y obtenemos:

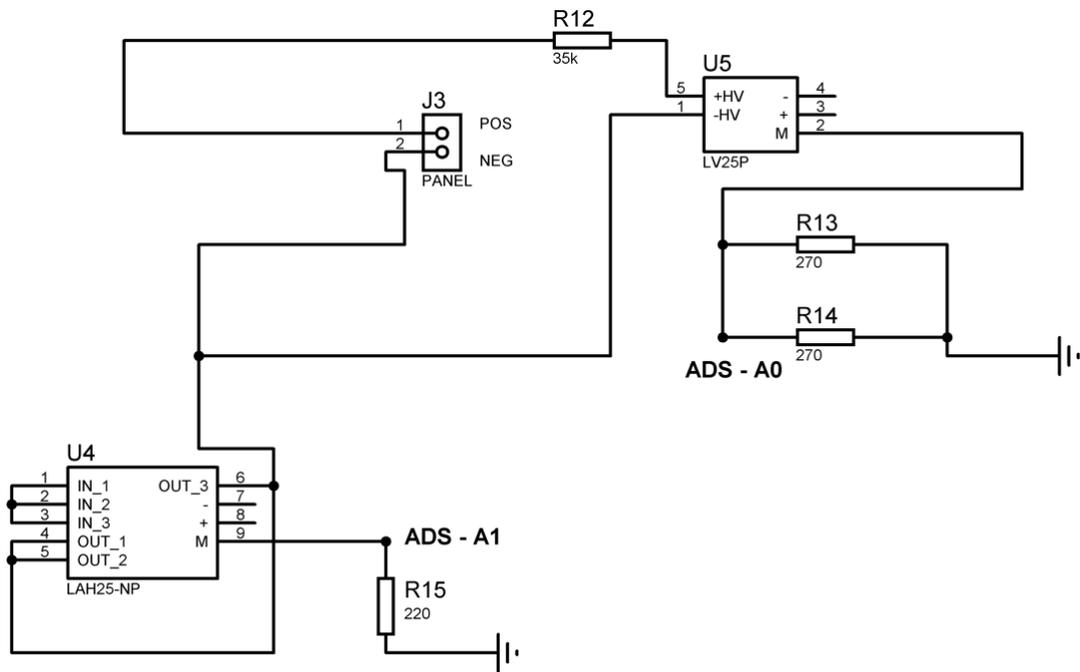
$$R1 = 35\ 000\Omega$$

Para R_M el valor tiene que estar entre $30\Omega - 190\Omega$ debido a que en la [Tabla 8](#) se muestra ese rango por que el sensor es alimentado con $\pm 12V$ y con una I_{PN} de $10 mA$. Por esta razón para evitar problemas se escoge un valor de R_M intermedio es por esto que se coloca dos resistencias de 270Ω en paralelo lo que nos da un valor de $R_M = 135\Omega$.

Para el sensor de corriente es un poco más sencillo ya definido la configuración según la [Tabla 10](#) es la primera, ya que soporta hasta $25 A$ como máximo en la entrada y el equipo está diseñado que soporte hasta $20 A$, mientras que R_M tiene que estar entre $0\Omega - 284\Omega$ basándonos en la [Tabla 11](#) al igual que en el sensor de voltaje se acogió un valor intermedio por esta razón $R_M = 220\Omega$.

Con estos valores ya definidos el circuito para el sensor de voltaje y corriente empleados en el graficador se puede observar en la [Figura 34](#).

Figura 34
Esquema de circuito de lector de sensores

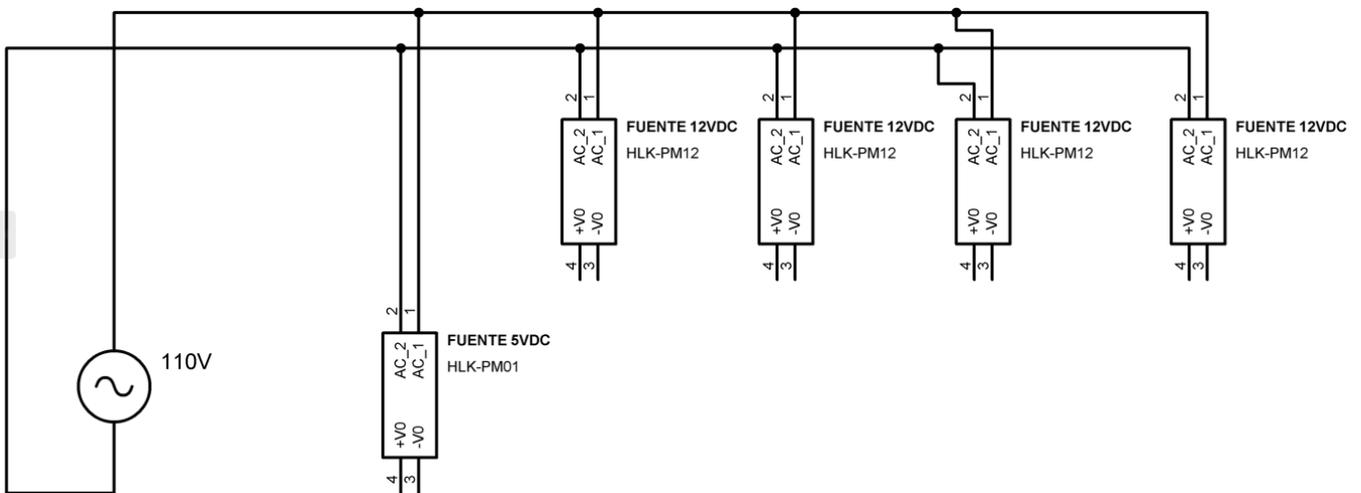


Nota. Conexión de los sensores de voltaje y corriente en software Proteus

5.5.4. Circuito de alimentación

El circuito de alimentación consta de una fuente de 5V y cuatro fuentes de 12V en donde todas se encuentran conectadas a un cable que se alimentará con 110V para que el circuito empiece a funcionar y encienda todo el equipo. En la [Figura 35](#) se observa el esquema del circuito de alimentación.

Figura 35
Esquema de circuito de alimentación



Nota. Circuitos de alimentación con la fuente de 5V y las cuatro fuentes de 12V

En el esquema se observa la conexión de todas las fuentes de alimentación que forman parte del graficador de curvas I-V, es una conexión sencilla pero muy importante ya que con ello se pondrá en marcha el funcionamiento de todo el equipo la fuente de 5V alimenta la *raspberry*, el optocoplador que se usa para el disparo de los IGBT1 e IGBT2, mientras que las fuentes de 12V están distribuidas de la siguiente manera:

Dos de ellas alimentan los optoacopladores de los IGBT, es importante que las fuentes sean independientes para cada IGBT para que funcionen de manera apropiada, ya que si solo se usa una fuente para ambos IGBT no se activarán a lo que se envíe la señal de inicio.

Las otras dos fuentes son para los sensores de voltaje y corriente una de ellas alimenta con +12V y la otra con -12V debido a que la alimentación de los sensores tiene que ser simétrica.

5.6. Construcción del graficador de curvas I-V

Una vez detallado los esquemas de todos los circuitos empleados en el graficador de curvas I-V, se procede con la construcción del equipo.

Se empieza con la construcción de circuito impreso es decir la placa PCB. En los [Anexos del 1-4](#) se muestra el proceso de construcción de la PCB, de esta forma, en el [Anexo 1](#) se muestra el esquema de circuito impreso de la placa PCB realizada en *proteus*, en el [Anexo 2 y 3](#) se presenta la PCB construida y en el [Anexo 4](#) está la placa con todos los componentes del equipo (sensores de voltaje-corriente, IGBT, fuentes de alimentación, etc.). En la [Figura 36](#) se muestra la caja metálica donde van todos los componentes del graficador.

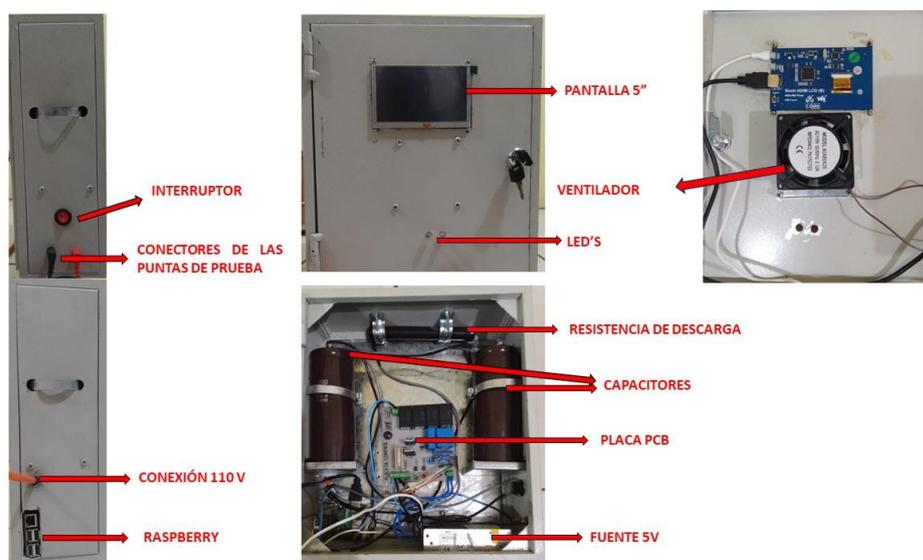
Figura 36
Caja metálica para los componentes del graficador



Nota. Parte externa e interna de la caja metálica del graficador de curvas I-V

En la [Figura 36](#) se puede observar la caja metálica del graficador de curvas I-V, donde se ubicaron todos los componentes empleados para que funcione de manera eficiente. Un componente extra que se añadió es un ventilador que ayuda a que el circuito no se recaliente, en la caja se incluirán los capacitores, la resistencia de descarga, la fuente de 5V, la *raspberry*, la pantalla y los conectores para las puntas de prueba con las que se toma las medidas de voltaje-corriente de los paneles FV. En la [Figura 37](#) se puede observar la caja con todos los componentes ya ubicados y conectados para su funcionamiento.

Figura 37
Caja metálica con los componentes ensamblados



Nota. En la imagen se detallan todos los componentes que forman parte del graficador de curvas I-V

En la [Figura 37](#) se pueden observar cómo quedan los componentes ensamblados en la caja metálica. Se puede ver que en los lados se encuentra el cable que se conecta a 110V y alimenta todo el equipo, también observamos la *raspberry* el interruptor que enciende el graficador y los conectores para las puntas de prueba de multímetro. Mientras que en la parte frontal se puede notar la pantalla y los *led's* verde que se enciende cuando empieza la carga de los capacitores y el rojo se enciende cuando empieza la descarga de los mismos. Finalmente, en la parte interna se observa los capacitores, resistencia de descarga, el ventilador, la placa PCB, la fuente de 5V debidamente concertados listo para su funcionamiento.

5.7. Proceso de obtención de la curva I-V y descripción de la aplicación desarrollada en Python

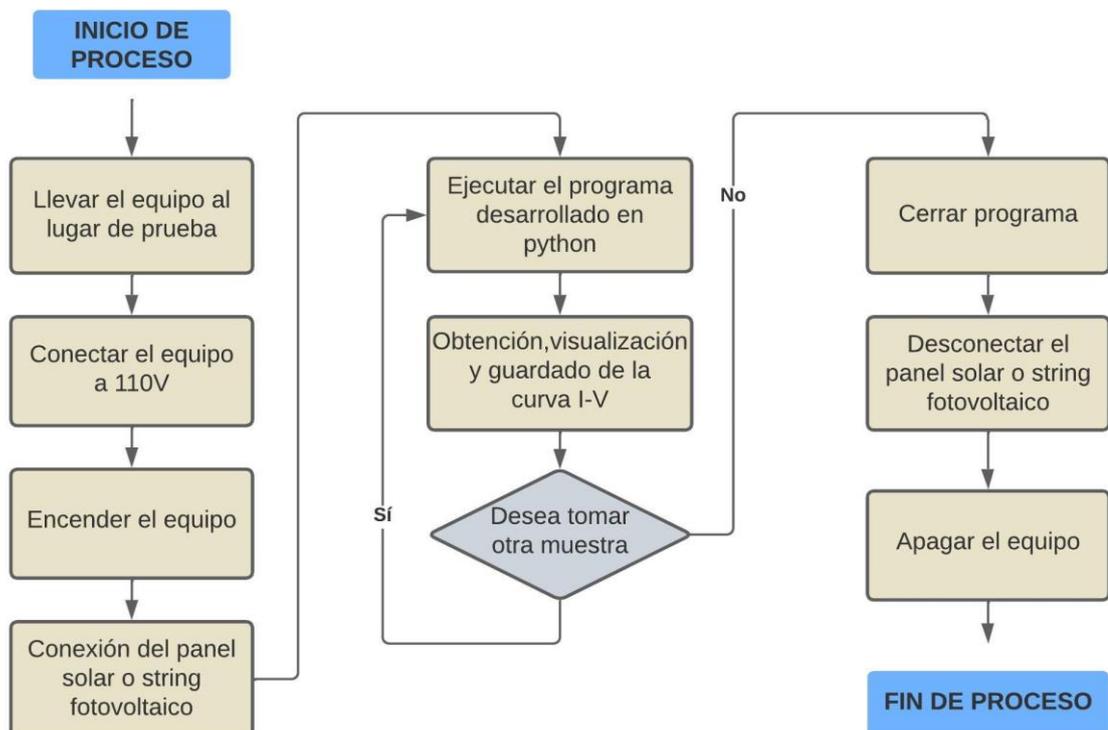
En esta sección se detallará el proceso a seguir para obtener la grafica de la curva I-V a través de la aplicación desarrollada en *python*.

5.7.1. Diagrama de flujo para la obtención de la curva I-V.

Para poder obtener la curva I-V de un panel solar o un *string* fotovoltaico se sigue el procedimiento presentado en la [Figura 38](#).

Figura 38

Diagrama de flujo para la obtención de la curva I-V



De acuerdo al diagrama de flujo propuesto en la [Figura 38](#) el procedimiento para poder obtener la curva I-V es el siguiente:

1) Llevar el equipo al lugar de prueba

Debido a que el equipo está diseñado para poder transportarlo a cualquier lugar es decir es portátil, esto facilita al momento de dirigirse al lugar de prueba donde se pretenda la obtención de la curva I-V.

2) Conectar el equipo a 110 V

Al conectar el equipo a 110 V este se energizará y podrá ser encendido para la toma de una muestra de la curva I-V.

3) Encender el equipo

Al momento que el equipo se energice podrá encenderse al presionar el botón que se encuentra en el graficador y estará listo para el proceso de obtención de la curva I-V.

4) Conexión del panel solar o string fotovoltaico

La conexión de panel o *string* fotovoltaico al equipo se la realiza mediante las puntas de multímetro tipo aguja, con lo cual el equipo se encuentra listo para obtener las características de corriente y voltaje del panel o *string* fotovoltaico.

5) Ejecutar el programa desarrollado en Python

Una vez que el panel se encuentre conectado al graficador, se ejecuta la aplicación desarrollada en *Python* el cual controla el proceso de obtención de la curva. En este punto el usuario elige el nombre de cómo se guarda la información obtenida por el equipo.

6) Obtención, visualización y guardado de la curva I-V.

Luego de haber ejecutado el programa el usuario podrá observar en la interfaz los valores obtenidos del panel FV y a su vez tendrá la opción de escoger si desea observar la curva I-V o la curva P-V. Una vez completado la visualización de las curvas el usuario podrá finalizar el programa y quedará listo para una nueva medición, mientras que el guardado se realiza de manera automática y podrá ser almacenada en un *flash memory* para un mejor análisis de la curva en un computador.

7) Desea tomar otra muestra

Si el usuario desea tomar otra muestra de un panel FV el proceso se repetirá desde la ejecución del programa para la toma de una nueva muestra caso contrario si el usuario ya no desea tomar otra muestra se dará por terminado la obtención de la curva.

8) Cerrar programa

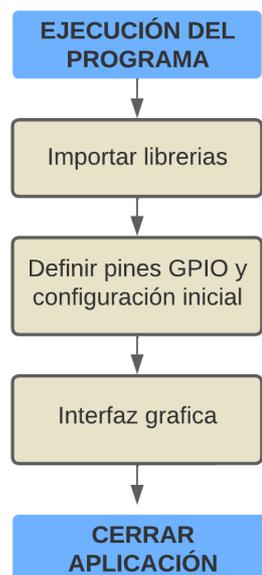
Si el usuario dio por finalizado la obtención de la curva I-V se cierra el programa y se procede a apagar el equipo y a desconectar el panel o *string* fotovoltaico.

5.7.2. Aplicación desarrollada en Python

La aplicación desarrollada en *Python* en la *Raspberry* es muy importante debido a que esta es la que se encarga del control de todo el circuito a la hora de leer los valores de voltaje y corriente de un panel FV y así poder graficar la curva I-V. Es por esto que desde la aplicación se manda las señales para que los IGBT se activen para la carga y descarga de los capacitores, a su vez nos permite obtener los valores de los sensores de voltaje - corriente y también nos ayuda a observar tanto la gráfica I-V y P-V del panel solar que se esté analizando y toda esta información obtenida se almacena en la memoria de la *Raspberry*. Además, la interfaz es sencilla y fácil de entender para el usuario esto gracias al uso de la librería llamada *tkinter*.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo para detallar la aplicación desarrollada en *Python* el cual se puede observar en la [Figura 39](#).

Figura 39
Diagrama de bloques del programa realizado en Python



Conforme mostrado en la [Figura 39](#) se observa como la aplicación desarrollada en *Python* se ejecuta en forma lineal y su proceso se detalla a continuación:

1) Importar librerías

Al iniciar con el desarrollo de la aplicación se importan todas las librerías necesarias para que funcione adecuadamente. Entonces se importan las librerías para trabajar con los pines del GPIO, con el ADC, con el bus I2C, tiempos, fechas, para graficar las curvas I-V y P-V, y para el desarrollo de la interfaz gráfica.

2) Definir pines GPIO y configuración inicial

Después de importar las librerías necesarias se procede a configurar los pines GPIO de la *Raspberry* las cuales operan con salidas y entradas digitales; su configuración ayuda al control del disparo de los transistores IGBT para la carga y descarga de los capacitores.

Una vez finalizada la configuración de los pines GPIO, todas las salidas digitales se ponen en “0”, de tal manera que los transistores se encuentren desactivados, es por esta razón que a esta configuración se la designa “*configuración inicial*” y está listo para empezar el proceso de obtención de la curva I-V.

3) Interfaz grafica

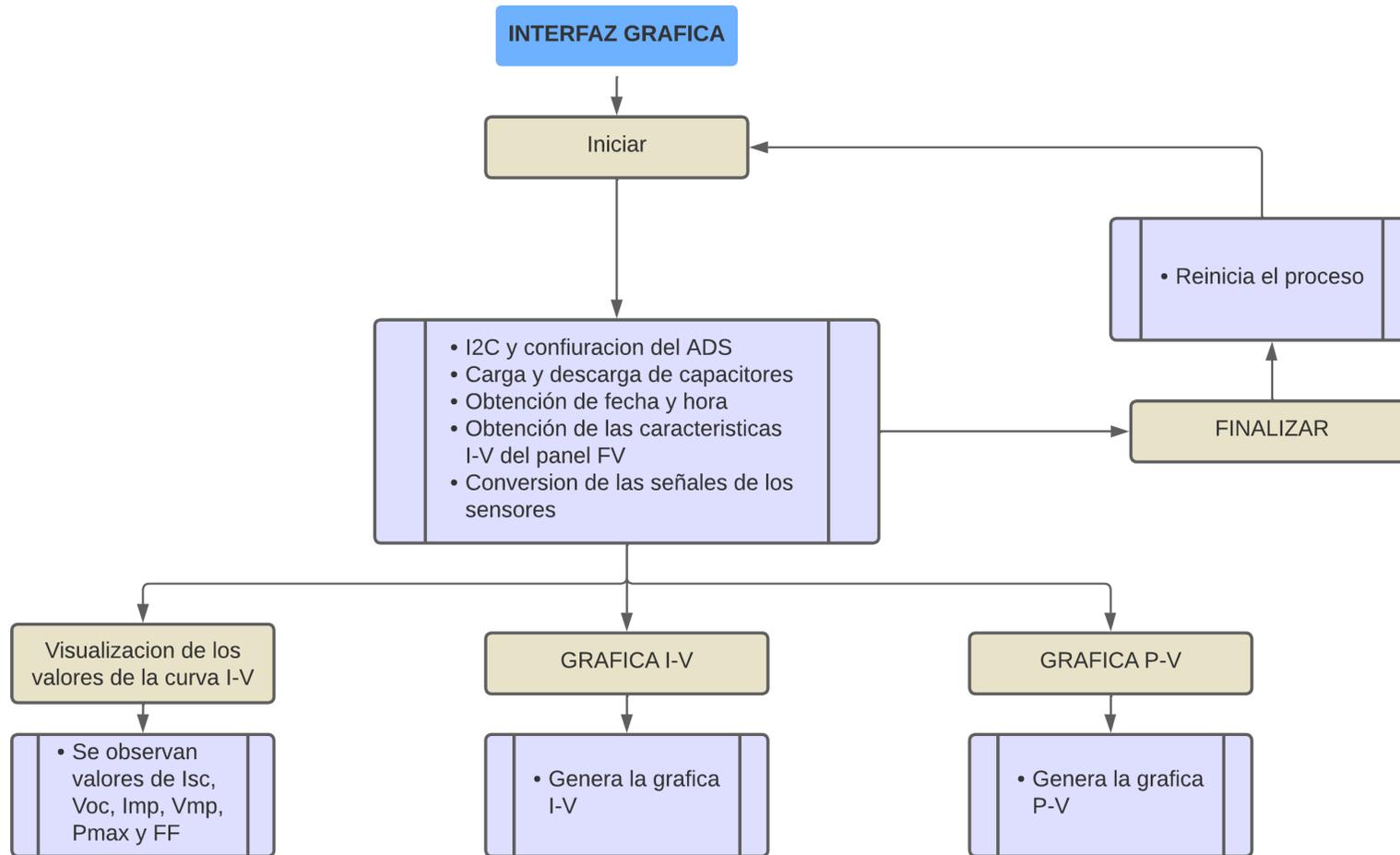
Una vez ya realizado la denominación de los pines GPIO y la configuración inicial, el programa ejecuta una interfaz gráfica, la cual se desarrolla para facilitar el uso del graficador por parte del usuario. Todo el desarrollo de la obtención de la curva I-V es controlado por la interfaz gráfica. En la [Figura 40](#) se observa la interfaz gráfica desarrollada y en la [Figura 41](#) se puede apreciar el diagrama de flujo de la misma.

Figura 40
Interfaz gráfica realizada



Nota. Interfaz gráfica desarrollada en Python, que contiene 4 botones y se podrán observar los valores obtenidos del panel FV.

Figura 41
Diagrama de flujo de la interfaz grafica



Conforme a la [Figura 40](#) y [Figura 41](#) se puede observar que la interfaz gráfica es compuesta de la siguiente manera:

1) *Botón INICIAR*

El usuario empezará el proceso de la obtención de las curvas una vez que presione el botón INICIAR que se encuentra en la interfaz gráfica y se empezaran a ejecutar una serie de acciones. De esta manera empieza con la comunicación I2C y se configura el ADC respecto al rango máximo de corriente y voltaje elegidos. Después, se adquiere la hora y fecha correspondiente al momento de obtención de la curva I-V, seguido del cierre del IGBT1 en donde se adquiere las señales obtenidas por los sensores de voltaje y corriente durante la carga de los capacitores y así generar la curva I-V. Una vez que los capacitores se han cargado completamente y se ha obtenido toda la información correspondiente a las características del panel FV, empieza la descarga de los capacitores llegando así a un valor de voltaje menor a 1 V. Luego, las señales de los sensores se convierten en información de voltaje, corriente; se guarda toda esa información en el archivo correspondiente, y se calcula la potencia con los valores de voltaje y corriente. Finalmente, una vez realizado todo lo anterior, toda la información relevante obtenida de la curva I-V se muestra en la interfaz gráfica, se deshabilita el botón INICIAR, y se habilita los botones CURVA I-V, CURVA P-V y FINALIZAR.

2) *Visualización de los valores de la curva I-V*

Una vez culminado el proceso de la obtención de la curva I-V en la interfaz se muestran los datos más relevantes de la curva, como son los valores de I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} , P_{max} y FF del panel FV.

3) *Botón CURVA I-V y CURVA P-V*

Los botones de CURVA I-V y CURVA P-V al ser presionados no permite observar las curvas obtenidas I-V y P-V del panel o *string* fotovoltaico.

4) *Botón FINALIZAR*

Al presionar el botón FINALIZAR lo que sucede es que la interfaz vuelve a las condiciones iniciales es decir se habilita el Botón INICIAR y el resto de botones se deshabilita lo cual nos indica que el equipo está listo para tomar otra muestra de algún panel FV si fuese necesario, caso contrario si no se desea tomar otra muestra se procede a apagar el equipo.

5.8. Tamaño y costo del graficador de curvas I-V

Una característica esencial en el graficador es que tiene que ser fácil de transportar por esta razón el graficador de curvas I-V se acopla para poder ser transportado a cualquier sitio donde se encuentre ubicados los paneles solares. A continuación, en la [Tabla 15](#) se pueden observar las dimensiones del equipo construido:

Tabla 15
Dimensiones del graficador de curvas I-V construido

Alto	35 cm
Ancho	30 cm
Profundidad	11.5 cm

En cuanto al costo total del equipo, los valores de cada material empleado se presentan en la [Tabla 16](#). De acuerdo con la tabla el costo del equipo es de \$870. Al comparar este precio un el graficador comercial HT *INSTRUMENTS SOLAR I-V500W* (4 201 USD) o el trazador *Solmetric PVA-1000S* (5 695 USD) que tienen características similares al equipo construido se puede ver que el graficador de curvas I-V construido es más económico.

Tabla 16
Costo de los materiales empleados en el graficador

COMPONENTE	PRECIO (USD)
1 gabinete eléctrico	60.00
2 transistores IGBT	10.00
2 capacitores electrolíticos	240.00
1 resistencia de descarga	25.00
1 Raspberry Pi 3 Modelo 3B +	100.00
1 sensor LV 25-P	70.00
1 sensor LAH 25-NP	40.00
1 ADC ADS1115	14.00
1 Fuente de 5V/5A	14.00
4 Fuentes de 12V/3W	32.00
Placa PCB	45.00
Pantalla 5"	75.00

Ventilador	10.00
Otros	150.00
TOTAL	870.00

6. Resultados

6.1. Detalle del proceso

Una vez completa la construcción del graficador de curvas I-V, este prototipo sirve para analizar determinados paneles fotovoltaicos que se encuentran en el bloque N°3 de la facultad de energía de la Universidad Nacional de Loja y de esta manera verificar su funcionamiento para detectar fallos. Los paneles son parte del trabajo de investigación sobre el " **Desarrollo de un sistema de soporte de decisiones para el autoconsumo fotovoltaico en el Ecuador: caso práctico en la Región Sur**" realizado en el año 2021. Los paneles mencionados se pueden observar en la [Figura 42](#) en la cual constan de 12 paneles en total.

Figura 42
Paneles solares analizados



Nota. Paneles ubicados en el bloque N°3 de la facultad de energía de la Universidad Nacional de Loja

6.2. Características de los paneles analizados

Los paneles analizados son monocristalinos y corresponden a los paneles **JINKO SOLAR JKM405M-54HL4-V** que se encuentran ubicados en el bloque N°3 de la facultad de energía, para el análisis se tomaron 3 paneles de los 12 que se muestran [Figura 42](#), en donde se los denomina como **panel solar 1** a uno solo de ellos y como **panel solar 2** a un

sistema conformado por dos paneles conectados en serie los cuales por una mala condición ambiental fueron golpeados por un árbol y se podrá observar el funcionamiento del graficador mostrándonos un fallo en la gráfica obtenida que se detalla más adelante. En la [Tabla 17](#) se muestran las especificaciones técnicas del panel mencionado.

Tabla 17
Especificaciones técnicas del panel JINKO SOLAR JKM405M-54HL4-V.

Características básicas					
Fabricante	Modelo	Tipo de celda	Dimensiones		
JINKO SOLAR	JKM405M-54HL4-V	Monocrystalina	1722×1134×30 mm		
Características eléctricas en STC					
I_{SC}	V_{OC}	I_{MP}	V_{MP}	P_{MP}	Eficiencia
13.85 A	37.06 V	13.27 A	30.52 V	405 W	20.74%

En el [Anexo 7](#) se presenta la hoja de datos del panel JINKO SOLAR JKM405M-54HL4-V, donde se pueden observar de forma más detallada todas las características que presenta el panel utilizado para las pruebas.

Antes de mostrar las curvas resultantes, se presenta una tabla y gráficos que representan los datos de voltaje y corriente recopilados de un panel fotovoltaico ubicado en el bloque 3 durante un lapso de 10 horas, con intervalos de 30 minutos. Estos datos se contrastarán con las mediciones realizadas mediante multímetros, con el propósito de evaluar la exactitud del graficador de curvas I-V al interpretar dichos valores. Tal como se pueden observar en la [Tabla 18](#), la [Figura 43](#) y [Figura 44](#).

Tabla 18
Valores de voltaje y corriente con el multímetro y el graficador de curvas I-V

N°	Hora	V_{oc} multímetro	V_{oc} graficador	I_{sc} multímetro	I_{sc} graficador
1	8:00	34,34	34,00	3,28	3,4
2	8:30	34,16	34,03	3,85	3,64
3	9:00	34,55	34,27	4,55	4,46
4	9:30	34,51	34,14	5,49	5,72
5	10:00	34,21	33,82	4,81	4,98
6	10:30	34,41	33,90	5,34	5,56
7	11:00	34,27	33,97	7,37	7,54
8	11:30	34,15	34,08	9,04	9,11
9	12:00	34,63	34,38	6,68	6,81

10	12:30	33,08	32,91	11,83	11,95
11	13:00	32,83	32,64	17,54	17,75
12	13:30	33,55	33,60	6,13	6,29
13	14:00	33,72	33,67	4,66	4,84
14	14:30	34,68	34,61	10,51	10,63
15	15:00	33,84	33,8	6,05	6,29
16	15:30	33,86	34,04	3,22	3,39
17	16:00	34,90	35,14	4,04	3,94
18	16:30	33,91	34,09	2,79	2,95
19	17:00	33,90	34,12	2,47	2,48
20	17:30	32,48	32,72	0,55	0,6
21	18:00	30,40	30,33	0,08	0,17

Figura 43
Análisis de las medidas de voltaje

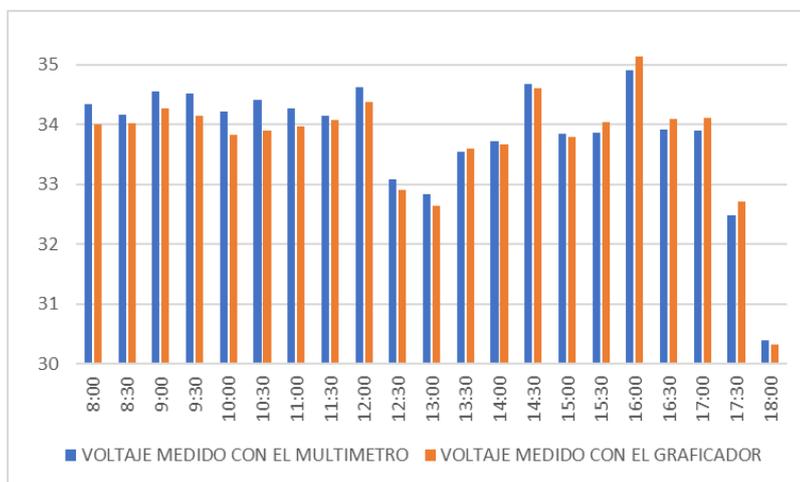
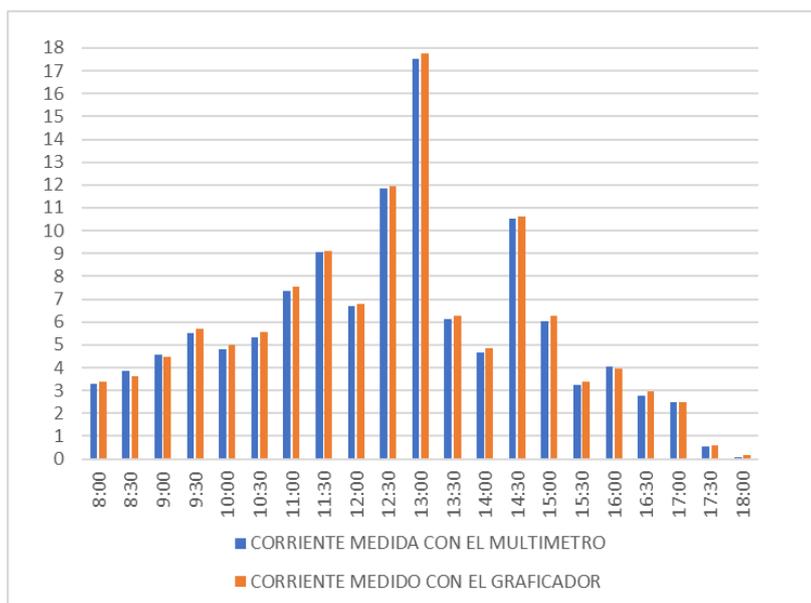


Figura 44
Análisis de las medidas de corriente



Al analizar los datos presentados en la [Figura 43](#) y [Figura 44](#), se puede constatar que los resultados obtenidos a través del graficador muestran una discrepancia relativamente pequeña en comparación con los valores medidos mediante multímetros. En el caso del voltaje, la diferencia máxima es de 0.34 V, y en cuanto a la corriente, la disparidad alcanza un máximo de 0.17 A. Esto evidencia que el graficador captura valores con un error mínimo, lo que lo hace aceptable para su aplicación con paneles fotovoltaicos.

6.3. Curvas I-V y P-V obtenidas

En las pruebas que se muestran a continuación se demuestra el funcionamiento del graficador de curvas I-V construido, donde se señala como varía la curva en diferentes horas, en diferentes condiciones ambientales y en paneles que se encuentran con fallas.

6.3.1. Curvas obtenidas en panel solar 1

En la primera prueba se toma una muestra del **panel solar 1** a las 16:30 de la tarde un día parcialmente soleado en la [Figura 45](#) se muestran las medidas de voltaje y corriente tomadas con un multímetro y en la [Tabla 19](#) se muestran los valores obtenidos con el graficador construido.

Figura 45
Medidas con multímetro de panel solar 1 (16:30)



Tabla 19*Valores obtenidos con el graficador de curvas I-V construido*

V_{OC}	33.23 V
I_{SC}	1.39 A
V_{mp}	25.77 V
I_{mp}	1.322 A
P_{max}	34.06 W
FF	0.74

En la [Figura 46](#) se muestran las medidas de voltaje y corriente del mismo panel, pero tomada a las 17:20 de la tarde, de igual manera tomadas con un multímetro, mientras que en la [Tabla 20](#) se muestran los valores obtenidos con el graficador.

Figura 46*Medidas con multímetro de panel solar 1 (17:20)***Tabla 20***Valores obtenidos con el graficador de curvas I-V construido*

V_{OC}	33.30 V
I_{SC}	1.07 A
V_{mp}	26.93 V
I_{mp}	0.98 A
P_{max}	26.32 W
FF	0.74

En la [Figura 45](#) y [46](#) se observan los valores medidos con multímetro, tanto de voltaje y corriente cabe recalcar que los valores medidos corresponden a V_{OC} e I_{SC} del panel solar, mientras que en la [Tabla 19](#) y [20](#) se observan los valores medidos con el graficador. Se puede evidenciar que la diferencia entre los valores es mínima, esto debido a que la constante de multiplicación en el código del equipo se lo calibra basándonos en el valor que lee el multímetro, esto con el único fin de que el graficador tome medidas lo más exactas posibles. Cabe mencionar que estos valores varían respecto a las características del panel que se muestran en la [Tabla 17](#) esto debido a las condiciones del clima, es por esta razón que tenemos un voltaje y corriente menor.

En la [Figura 41](#) se muestra la imagen del **panel solar 1** en el que se tomó las medidas con el graficador, mientras que en la [Figura 47](#) se observan las gráficas I-V y P-V tomada a las 16:30 y en la [Figura 48](#) las mismas graficas tomadas a las 17:20 obtenidas del panel mencionado.

Figura 47
Curvas I-V y P-V del panel solar 1 (16:30)

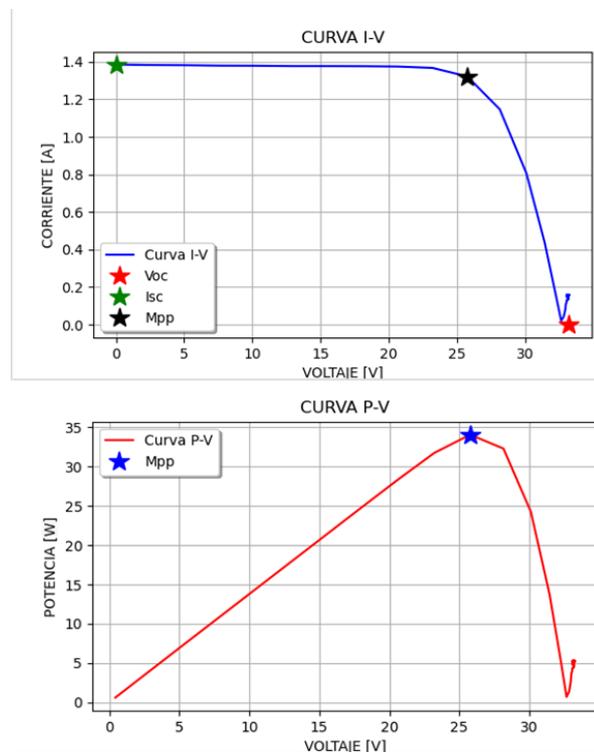
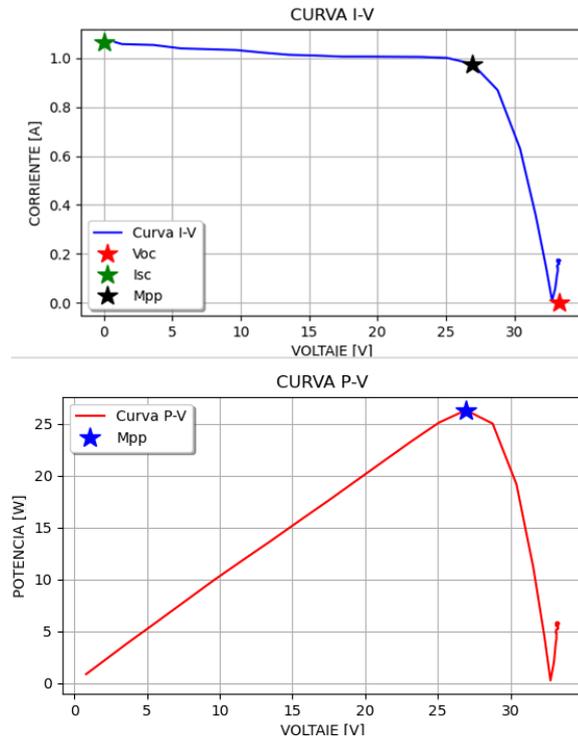


Figura 48
 Curva I-V y P-V de panel solar 1 (17:20)



En la [Figura 47](#) y [Figura 48](#) se observan gráficas I-V y P-V del panel y también un valor denominado M_{pp} el cual nos indica el punto de máxima potencia a la que se encuentra el panel en los diferentes horarios. Se puede deducir, que con respecto a las gráficas presentadas que el panel se encuentra en perfecto estado y a su vez por las condiciones climáticas se puede evidenciar que el valor de potencia y corriente son menores al de las características técnicas del panel, a su vez se puede evidenciar que por la hora que se toman las muestras la corriente en la [Figura 48](#) es menor respecto a la que se observa en la [Figura 47](#), esto debido que más tarde ya no es muy soleado y por ende la corriente tiende a disminuir. No obstante, se puede notar que las gráficas son buenas sin importar la hora a la que se toman las muestras, esto también se puede ver reflejado en el valor del FF obtenido con el graficador, por esta razón se concluye que el panel está sin fallos y funcional.

6.3.2 Curvas obtenidas del panel solar 1 con sombra

En la siguiente prueba se toma una muestra del **panel solar 1** a las 17:00, esta vez se coloca cartón que hace la sombra tal como se observa en la [Figura 49](#) junto con los

valores de voltaje y corriente medidos con el multímetro, mientras que en la [Tabla 21](#) se presentan los valores obtenidos con el graficador de curvas I-V construido.

Figura 49
Panel solar 1 con sombra y medidas tomadas con el multímetro (17:00)

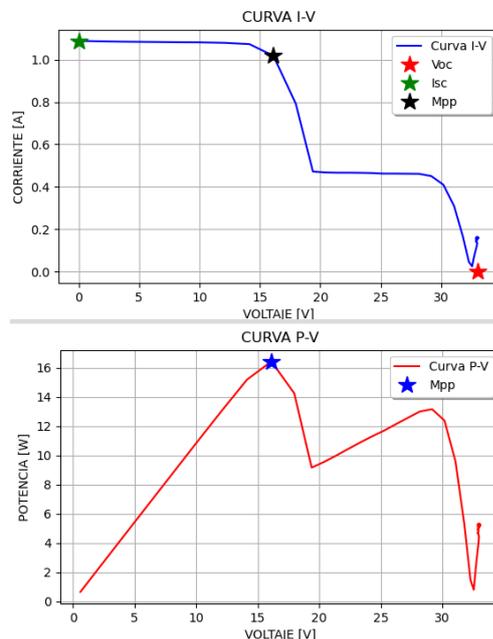


Tabla 21
Valores obtenidos con el graficador de curvas I-V construido

V_{OC}	33.05 V
I_{SC}	1.08 A
V_{mp}	16.11 V
I_{mp}	1.02 A
P_{max}	16.42 W
FF	0.46

Como podemos observar en la [Figura 49](#) según los valores medidos se podría decir que el panel está bien, pero todo esto cambia al medir con el graficador debido a que el valor del FF es bajo tal como se muestra en la [Tabla 21](#). Y esto se demuestra de mejor manera con las gráficas obtenidas con el graficador de curvas I-V que se muestran en la [Figura 50](#).

Figura 50
 Curva I-V y P-V del panel solar 1 con sombra (17:00)



Como se muestra en la [Figura 50](#) las gráficas presentan inconsistencia, lo que se observa es una curva I-V escalonada y cumple con lo detallado en la [Sección 4.3.1.](#) que explica el por qué se presenta este tipo de curva y por ello se manifiesta que el panel muestra fallos, de igual manera este problema se evidencia en la curva P-V. debido a la sombra que obstruye de cierta manera los rayos solares que capta el panel solar en ese instante.

6.3.2. *Curvas obtenidas del panel solar 2*

En este caso la prueba se toma a las 16:00 en dos paneles solares que están conectados en serie. Pero estos paneles se encuentran con fallos se trizaron las celdas al ser golpeadas por un árbol que se derrumbó debido a fuertes vientos. Los paneles mencionados se los puede observar en la [Figura 51](#), mientras que los valores medidos con el multímetro se muestran en la [Figura 52](#).

Figura 52
Panel solar 2 con fallos



Figura 51
Valores medidos con el multímetro (16:00)



A primera vista, en la [Figura 52](#) se observa que se leen regularmente los valores de voltaje y corriente de los paneles. No obstante, la discrepancia se evidencia en la [Tabla 22](#), donde se aprecia la divergencia en el valor del Factor de Forma (FF) obtenido mediante el trazador de curvas I-V. La [Figura 53](#) muestra las curvas I-V y P-V resultantes.

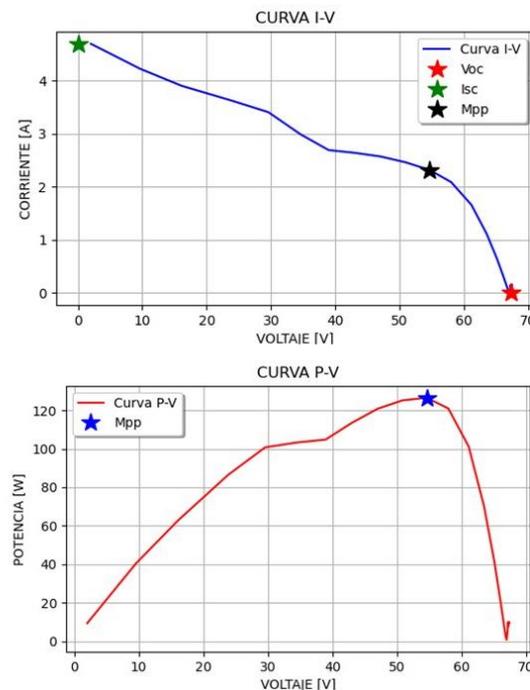
Tabla 22

Valores obtenidos con el graficador de curvas I-V construido

V_{OC}	67.35 V
I_{SC}	4.7 A
V_{mp}	56.60 V
I_{mp}	2.32 A
P_{max}	126.5 W
FF	0.4

Figura 53

Curva I-V y P-V del panel solar 2 (16:00)



Como se puede notar el valor del FF en la [Tabla 22](#) es muy bajo desde ahí se demuestra que el **panel solar 2** ya no se encuentra funcional y esto se puede evidenciar de mejor manera en la [Figura 53](#) curvas I-V y P-V obtenidas. Se observan claramente el fallo que tiene el panel, la corriente varía bastante respecto al voltaje y por ende la radiación se distribuye de forma desigual en panel solar.

Se pudo demostrar, que el graficador de curvas I-V funciona de manera correcta en todas las pruebas que se realizaron y será un aporte esencial para el trabajo de investigación sobre **“Desarrollo de un sistema de soporte de decisiones para el autoconsumo fotovoltaico en el Ecuador: caso práctico en la Región Sur”**. Dado que el equipo permite la toma periódica de pruebas, se facilita la monitorización continua con el objetivo de detectar posibles fallos en los paneles a lo largo del tiempo. Este enfoque proactivo permite realizar mantenimiento preventivo para abordar cualquier problema antes de que se agrave, contribuyendo así a la eficiencia y durabilidad del sistema.

7. Discusión

El proyecto de tesis se llevó a cabo con el propósito de proporcionar una herramienta que permita la verificación periódica del estado de paneles FV o sistemas FV. Estos componentes se ubican en la Universidad de Loja, específicamente en la Facultad de Energía, Industrias y Recursos Naturales No Renovables. Además, esta herramienta se concibió con la intención de ser un respaldo para el desarrollo de investigaciones, en particular para un proyecto denominado “**Desarrollo de un sistema de soporte de decisiones para el autoconsumo fotovoltaico en el Ecuador: caso práctico en la Región Sur**”, el graficador de curvas I-V se ha convertido en una herramienta indispensable para el proyecto en curso en la facultad. La importancia radica en que ni la Universidad ni la provincia disponen de un equipo con estas características. Su implementación no solo facilita la supervisión regular del estado de los paneles solares, sino que también colma una necesidad crucial al proporcionar capacidades que hasta ahora no estaban disponibles localmente.

El equipo desarrollado nos permite tomar lectura de valores correspondientes a voltaje y corriente de un panel FV de hasta 350 V y 20 A respectivamente, lo que lo convierte en un equipo eficiente, debido a que sin problema alguno podremos conectarlo hasta en un sistema conformado por 8 paneles FV.

Para el diseño y construcción del equipo se realizó un estudio minucioso de todos los métodos existentes, con el objetivo de ver el más indicado a la hora de poder emplearlo como parte del trabajo de investigación mencionado. Para poder obtener algunos de los materiales utilizados en el graficador se tuvo que traer del exterior debido que en el país no se encontró el material necesario para que cumpla con las características planteadas, es por ello que capacitores, sensores y la resistencia se los consiguió en Estados Unidos.

Con respecto a la alimentación del graficador, este se conecta a 110 V que alimenta todo el equipo y activa las fuentes internas de alimentación de 12V que enciende los sensores y los IGBT y 5V el cual alimenta las *raspberry* y la pantalla. Parte de la seguridad del equipo es que siempre después de tomar una muestra los capacitores quedaran totalmente descargados evitando así algún tipo de problema al momento de trasladar el equipo.

Con respecto a otros graficadores construidos el equipo es más eficiente en cuanto a capacidad de voltaje y corriente que soporta, tiene una interfaz fácil de utilizar para el usuario y la capacitancia se adecua automáticamente a los valores que presenten los paneles no hay necesidad de escoger o seleccionar valores de capacitancia para diferentes tipos de arreglos de los paneles FV.

8. Conclusiones

Al culminar el proyecto en base a los objetivos planteados se pudo concluir lo siguiente.

Los distintos tipos de métodos que existen para construir el graficador de curvas I-V se analizaron minuciosamente en la literatura de este proyecto en donde se detalló los principios de operación de cada uno de los métodos y en base a la revisión bibliográfica se tomó el método más óptimo para la construcción del equipo el cual fue el de carga capacitiva.

El uso del graficador de curvas I-V es importante a la hora de trabajar con la energía solar, debido a que con la ayuda de los paneles FV podemos tomar esa energía y poder aprovecharla de diferentes maneras y a su vez nos permiten poder tomar valores de voltaje y corriente los cuales son datos significativos, porque corresponden a una información valiosa al momento de graficar la curva I-V junto con el valor de máxima potencia de cada panel tal como se mostraron en los resultados, y así poder identificar si un panel FV tiene algún tipo de falla que puede estar perjudicando al sistema.

El equipo construido es capaz de tomar curvas I-V de circuitos de generación fotovoltaica con voltajes en circuito abierto hasta 350 V o menores, por lo cual se pueden evaluar SFV hasta con 8 *strings*, mientras que la capacidad de la corriente en cortocircuito a soportar es de 20 A.

Una vez culminado el proceso de construcción y el proceso de calibración de los sensores utilizados, se empleó el prototipo para obtener las curvas I-V de dos módulos fotovoltaicos de la Facultad de la energía, las industrias y los recursos naturales no renovables de la Universidad de Nacional de Loja, con el fin de evaluar el rendimiento de los mismos. En la primera prueba el **panel solar 1** analizado la curva I-V obtenida no mostró la presencia de fallas o deterioros en los mismos. En cuanto al **panel solar 2**, la curva I-V obtenida muestra la presencia de fallas o deterioro. Entre las fallas encontradas se encuentran, celdas trizadas y variación inusual de la corriente del módulo fotovoltaico. De esta manera se puede validar el funcionamiento del equipo construido.

9. Recomendaciones

En caso que por algún motivo se requiera abrir el equipo tomar en cuenta que el equipo se encuentre desconectado y los capacitores estén descargados en su totalidad para evitar cualquier tipo de accidente.

Es indispensable el uso del graficador en la investigación sobre el **“Desarrollo de un sistema de soporte de decisiones para el autoconsumo fotovoltaico en el Ecuador: caso práctico en la Región Sur”**, debido a que se puede tener un control periódico sobre el estado en que se encuentren los paneles solares.

Se recomienda el uso del graficador de curvas I-V para futuros proyectos relacionados con los paneles solares, ya que en un futuro el saber aprovechar la energía de sol ayudará al cuidado del medio ambiente.

Es fundamental aplicar todas las precauciones necesarias al operar el graficador de curvas I-V, especialmente cuando se manipulan paneles FV con niveles de voltaje significativamente altos.

10. Bibliografía

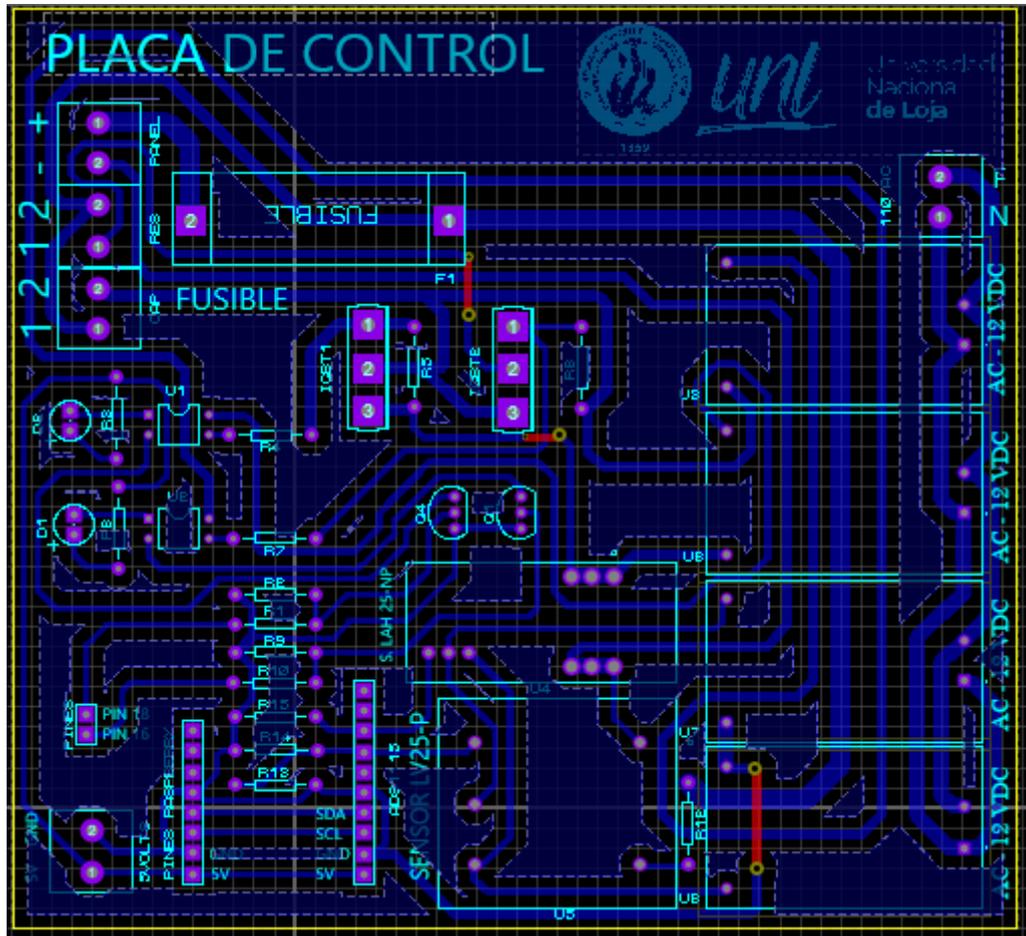
- Alternative Energy Tutorials. (2018, June 3). *Bypass Diode Ensures Solar Panel Protection*. <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/bypass-diode.html>
- Crawley, & Gerard M. (2016). *World Scientific Series in Current Energy Issues Volume 2* (Vol. 2).
- Duran, E., Piliouline, M., Sidrach-De-Cardona, M., Galan, J., & Andujar, J. M. (2008). Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922578>
- Garcia, M., & Arribas, L. (2001). *Energía Solar Fotovoltaica y Cooperación Al Desarrollo* (2001 IEPALA Editorial, Ed.; Vol. 6).
- Garcia, P. (2015). *ENERGÍA FOTOVOLTAICA TRAZADOR DE CURVAS V-I PARA SEGUIMIENTO DE MÓDULOS SOLARES*.
- Garcia, P. (2021). *Energía solar fotovoltaica para todos*.
- Hilcu, M. (2021). *¿Qué es y cómo funciona la energía solar?* OTOVO. <https://www.otovo.es/blog/energia/que-es-la-energia-solar/>
- IEC. (2018). *IEC 62446-1*. Ihs.Com. https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?&input_doc_number=&input_doc_title=&document_name=IEC%2062446%2D1&item_s_key=00668699&item_key_date=810429&origin=DSSC
- IEC. (2020). *IEC 60904-1:2006 | IEC Webstore | water management, smart city, rural electrification, solar power, solar panel, photovoltaic, PV, LVDC*. Webstore.Iec.Ch. <https://webstore.iec.ch/publication/3872>
- IEC. (2021). *IEC 60891:2009 Photovoltaic devices - Procedures for temperature*. Aenor.Com. <https://tienda.aenor.com/norma-iec-60891-2009-3821>
- Lorenzo, E. (2011). *Engineering of photovoltaic system*.

- Muñoz, J., & Lorenzo, E. (2006). Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays. *Solar Energy*, 80(11), 1489–1497. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.09.013>
- Pareja, M. (2010). *Energía solar fotovoltaica: guía del usuario* (S. A. MARCOMBO, Ed.; 2nd ed.).
- Parra, E., Albert, J., Valencia, M., & Ciemat, A. (2005). *Sistemas fotovoltaicos*.
- Petrone, Giovanni., Ramos-Paja, C. A., Spagnuolo, Giovanni., & Xiao, Weidong. (2017). *Photovoltaic Sources Modeling*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- PHOLTAIC. (n.d.). *Interpretaciones-de-las-formas-de-la-Curva-IV*.
- Planas, O. (2016, February 12). *Paneles de energía solar fotovoltaica*. [https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/tipos#:~:text=C%C3%A9lulas%20de%20silicio%20monocristalino%20\(M,alineados%20facilitando%20as%C3%AD%20la%20conductividad](https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/tipos#:~:text=C%C3%A9lulas%20de%20silicio%20monocristalino%20(M,alineados%20facilitando%20as%C3%AD%20la%20conductividad).
- Planas, O. (2019, October 3). *Que es Energia Solar*. Planas, Oriol . <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar>
- Ramón Guerrero Pérez. (2017). *Replanteo y funcionamiento de instalaciones solares fotovoltaicas*. ENAE0108 (Cueva de Viera, Ed.; segunda edición, Vol. 1).
- Santiago, R. (2022, February 18). *¿Qué es la energía solar y cómo se produce?* . BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-solar/>
- Schallenberg Rodríguez, J. C. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Instituto Tecnológico de Canarias.
- Spertino, F., Ahmad, J., Ciocia, A., di Leo, P., Murtaza, A. F., & Chiaberge, M. (2015). Capacitor charging method for I-V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems. *Solar Energy*, 119, 461–473. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.032>
- Vargas, T., & Abrahamse, A. (2014). *AN OPEN-SOURCE HARDWARE I-V CURVE TRACER FOR MONITORING PV OUTPUT IN BOLIVIA* (Vol. 1, Issue 14). http://www.appropedia.org/I-V_Curve_tracer.
- Xiao, W. (2017). *Photovoltaic Power System: Modeling, Design, and Control* (J. Wiley, Ed.; first).

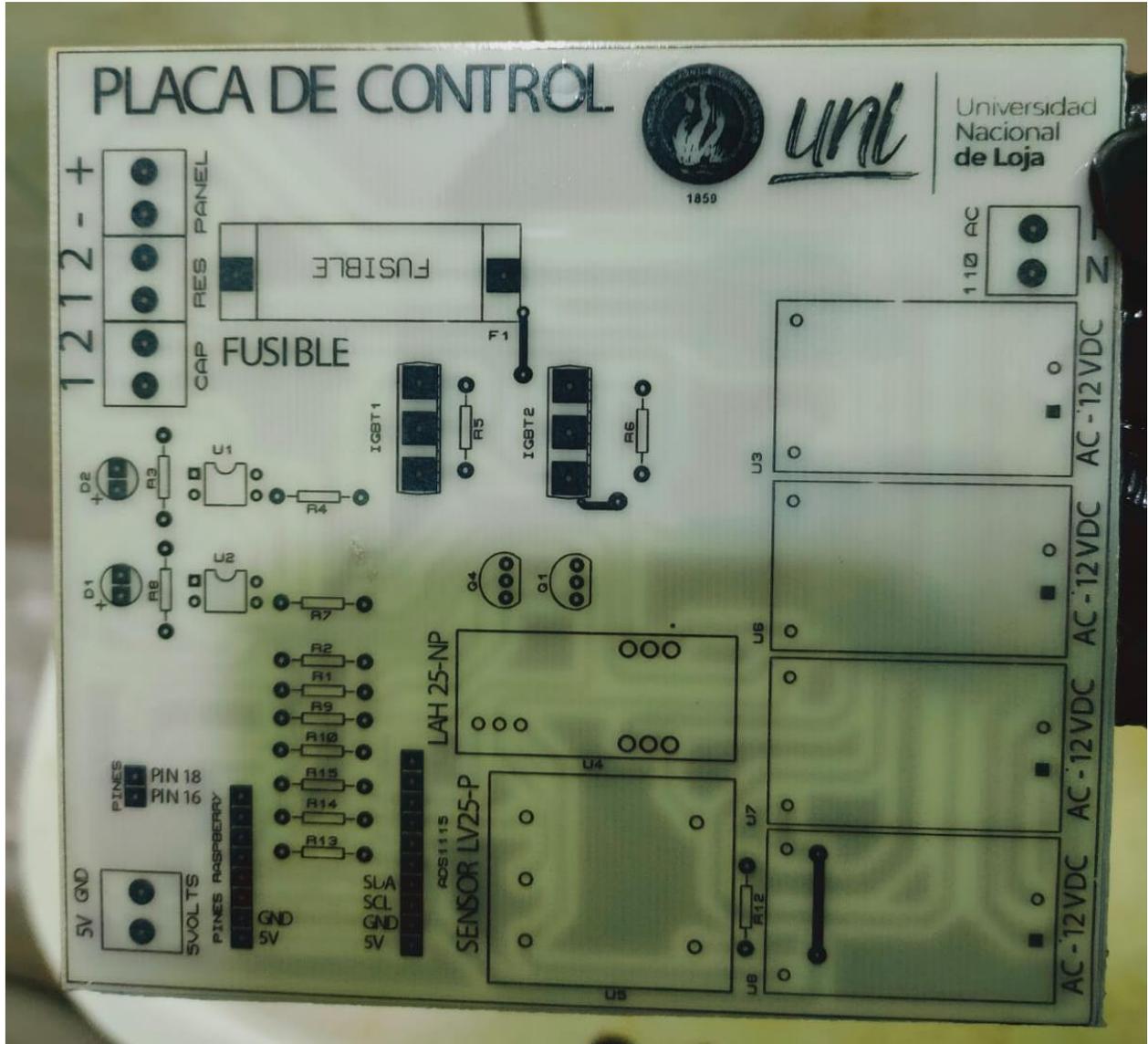
Zhu, Y., & Xiao, W. (2020). A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer. In *Solar Energy* (Vol. 196, pp. 346–357). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.020>

11. Anexos

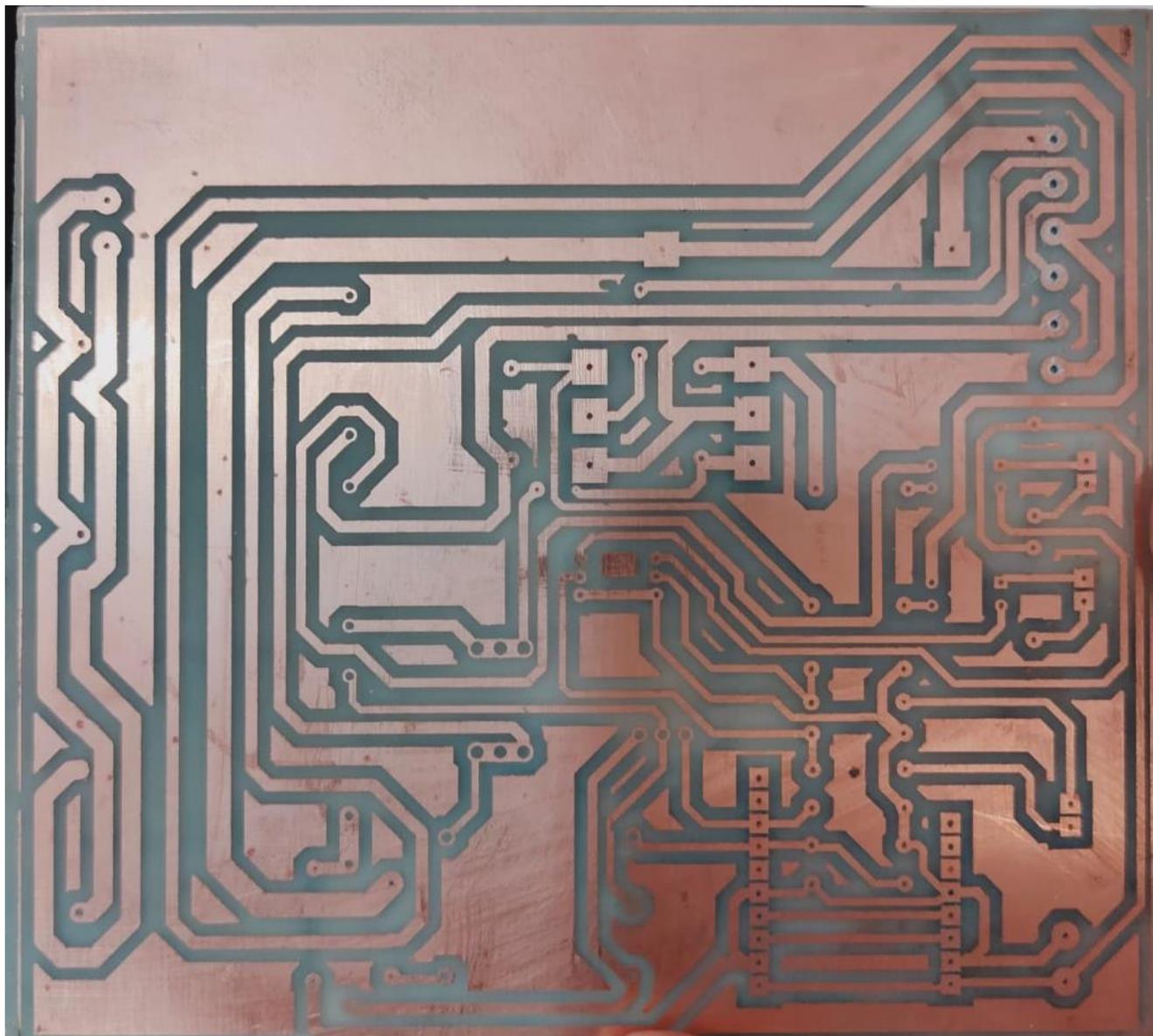
Anexo 1. Esquema de la placa PCB realizada en Proteus



Anexo 2. PCB construida parte frontal



Anexo 3. PCB construída parte posterior



Anexo 4. Placa PCB con los componentes ensamblados



Anexo 5. *Caja metálica*




```

ads= ADS.ADS1115(i2c) # Conexión ADS1115 al bus I2C (Puede ser también el módulo
ADS1015)

rate=860 # Frecuencia de Muestreo Programada: 860 datos/segundo para Voltaje y Corriente
samples=250# Numero de datos de V,I a capturar

ads.data_rate=rate

#if GAIN ==1 :

ganancia=1 # Ganancia Programable +4.096V
#m1=((4.096/32767)*(100000*10)/(135*25)) #Factor de conversión voltaje
m1=0.0155

#m2=(4.096/32767)*(25000)/(220*25) #Factor de conversión corriente
m2=0.00031

#ads.gain = 8 # Ganancia Programable +0.512 V
sensor_V= AnalogIn(ads, ADS.P0) # Canal de Voltaje
sensor_I= AnalogIn(ads, ADS.P1) # Canal de Corriente
voltaje= [None] * samples
corriente=[None] * samples

ads.gain = ganancia
print(ganancia)
voltaje = [None]*samples
corriente = [None]*samples
start = time.monotonic()
igbt1.value = True
for i in range(samples):
    voltaje[i] = sensor_V.value
    corriente[i] = sensor_I.value
end = time.monotonic()
tiempo_carga = end - start
igbt1.value = False

```



```

textbox2.delete(0, tk.END)
textbox2.insert(tk.END, str(Isc))
textbox3.delete(0, tk.END)
textbox3.insert(tk.END, str(Vmpp))
textbox4.delete(0, tk.END)
textbox4.insert(tk.END, str(Impp))
textbox5.delete(0, tk.END)
textbox5.insert(tk.END, str(Pmax))
textbox6.delete(0, tk.END)
textbox6.insert(tk.END, str(FF))

```

def grafica_iv():

```

    global voltaje
    global corriente
    Voc= max(voltaje)
    Isc= max(corriente)
    Pmax= max(potencia)
    Vmpp= voltaje[potencia.index(max(potencia))]
    Impp= corriente[potencia.index(max(potencia))]

    plt.figure(1)
    plt.plot(voltaje,corriente,color='blue',label='Curva I-V')
    plt.xlabel('VOLTAJE [V]')
    plt.ylabel('CORRIENTE [A]')
    plt.title('CURVA I-V')
    #plt.plot(Voc, corriente[voltaje.index(Voc)], '*', color='red', markersize=15, label = 'Voc')
    #plt.plot(voltaje[corriente.index(Isc)],Isc , '*', color='green', markersize=15, label = 'Isc')
    plt.plot(Voc, 0, '*', color='red', markersize=15, label = 'Voc')
    plt.plot(0,Isc , '*', color='green', markersize=15, label = 'Isc')

```

```

plt.plot(Vmpp,Impp,'*', color='black', markersize=15, label = 'Mpp')
legend = plt.legend(loc='best', shadow=True)
plt.grid(True)
plt.show()
def grafica_pv():
    global voltaje
    global potencia
    Vmpp= voltaje[potencia.index(max(potencia))]
    Pmax= max(potencia)
    plt.figure(2)
    plt.plot(voltaje,potencia,color='red',label='Curva P-V')
    plt.xlabel('VOLTAJE [V]')
    plt.ylabel('POTENCIA [W]')
    plt.title('CURVA P-V')
    plt.plot(Vmpp,Pmax,'*', color='blue', markersize=15, label = 'Mpp')
    legend = plt.legend(loc='best', shadow=True)
    plt.grid(True)
    plt.show()

# Crear la ventana principal
window = tk.Tk()

# Establecer el tamaño de la ventana
window.geometry("400x300") # Ancho x Alto

# Crear las etiquetas
label1 = tk.Label(window, text="Voc (V)")
label2 = tk.Label(window, text="Isc (A)")
label3 = tk.Label(window, text="Vmp (V)")

```

```

label4 = tk.Label(window, text="Imp (A)")
label5 = tk.Label(window, text="Pmax (W)")
label6 = tk.Label(window, text="FF")

# Crear los cuadros de texto
textbox1 = tk.Entry(window)
textbox2 = tk.Entry(window)
textbox3 = tk.Entry(window)
textbox4 = tk.Entry(window)
textbox5 = tk.Entry(window)
textbox6 = tk.Entry(window)

# Crear los botones
button1 = tk.Button(window, text="INICIAR", command=iniciar)
button2 = tk.Button(window, text="GRAFICA I-V", command=grafica_iv)
button3 = tk.Button(window, text="GRAFICA P-V", command=grafica_pv)

# Colocar los elementos en la ventana utilizando el gestor grid
label1.grid(row=0, column=0, pady=10)
textbox1.grid(row=0, column=1, pady=10)
label2.grid(row=1, column=0, pady=10)
textbox2.grid(row=1, column=1, pady=10)
label3.grid(row=2, column=0, pady=10)
textbox3.grid(row=2, column=1, pady=10)
label4.grid(row=3, column=0, pady=10)
textbox4.grid(row=3, column=1, pady=10)
label5.grid(row=4, column=0, pady=10)
textbox5.grid(row=4, column=1, pady=10)
label6.grid(row=5, column=0, pady=10)

```

```
textbox6.grid(row=5, column=1, pady=10)

button1.grid(row=0, column=2, sticky="e", pady=10)
button2.grid(row=1, column=2, sticky="e", pady=10)
button3.grid(row=2, column=2, sticky="e", pady=10)

# Centrar la ventana en la pantalla
window.eval('tk::PlaceWindow . center')

# Ejecutar el bucle principal de la ventana
window.mainloop()
```

www.jinkosolar.com



Tiger Pro 54HC

395-415 Watt

MONO-FACIAL MODULE

P-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

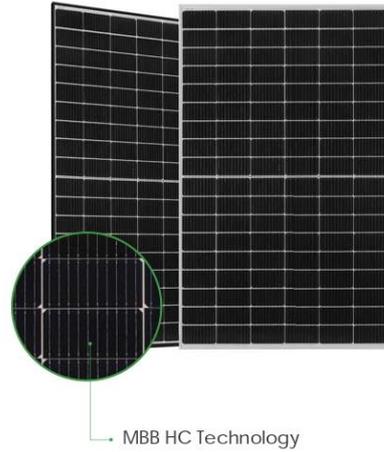
IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Quality Management System

ISO14001:2015: Environment Management System

ISO45001:2018

Occupational health and safety management systems



MBB HC Technology

Key Features



Multi Busbar Technology

Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.



Durability Against Extreme Environmental Conditions

High salt mist and ammonia resistance.



Reduced Hot Spot Loss

Optimized electrical design and lower operating current for reduced hot spot loss and better temperature coefficient.



Enhanced Mechanical Load

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



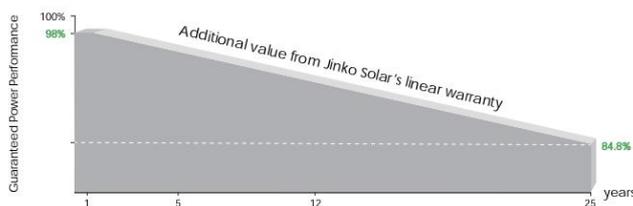
PID Resistance

Excellent Anti-PID performance guarantee via optimized mass-production process and materials control.



POSITIVE QUALITY
Continuously Quality Improvement

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

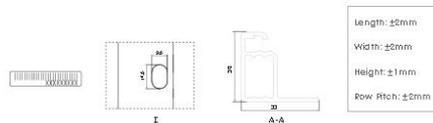
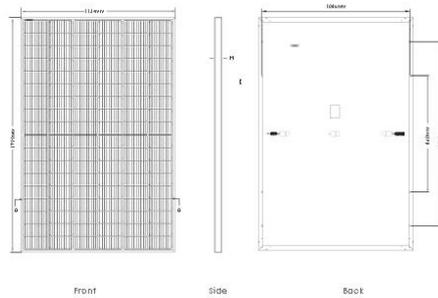


15 Year Product Warranty

25 Year Linear Power Warranty

0.55% Annual Degradation Over 25 years

Engineering Drawings

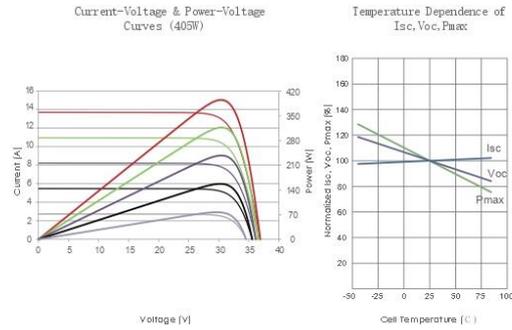


Packaging Configuration

[Two pallets = One stack]

36pcs/pallets, 72pcs/stack, 936pcs/ 40HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	P type Mono-crystalline
No. of cells	108 (2x54)
Dimensions	1722×1134×30mm (67.80×44.65×1.18 inch)
Weight	22.0 kg (48.50 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM395M-54HL4		JKM400M-54HL4		JKM405M-54HL4		JKM410M-54HL4		JKM415M-54HL4	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	395Wp	294Wp	400Wp	298Wp	405Wp	301Wp	410Wp	305Wp	415Wp	309Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	30.32V	28.26V	30.42V	28.42V	30.52V	28.56V	30.62V	28.72V	30.79V	28.88V
Maximum Power Current (Imp)	13.03A	10.40A	13.15A	10.47A	13.27A	10.55A	13.39A	10.62A	13.48A	10.69A
Open-circuit Voltage (Voc)	36.90V	34.83V	36.98V	34.90V	37.06V	34.98V	37.14V	35.05V	37.31V	35.21V
Short-circuit Current (Isc)	13.71A	11.07A	13.78A	11.13A	13.85A	11.19A	13.92A	11.24A	14.01A	11.32A
Module Efficiency STC (%)	20.23%		20.48%		20.74%		21.00%		21.25%	
Operating Temperature (°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

^{*}STC: ☀ Irradiance 1000W/m² 📖 Cell Temperature 25°C ☁ AM=1.5
 NOCT: ☀ Irradiance 800W/m² 📖 Ambient Temperature 20°C ☁ AM=1.5 🌀 Wind Speed 1m/s

©2020 Jinko Solar Co., Ltd. All rights reserved.
 Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

JKM395-415M-54HL4-(V)-F2.1-EN

Anexo 8. *Obtención de las curvas I-V de los paneles solares*



MANUAL DE USUARIO

1. Se conecta el graficador de curvas I-V a 110 V



2. Se enciende el equipo con el botón que esta en el lado derecho del equipo.

BOTON ENCENDIDO

3. El equipo se enciende y se ejecutara automáticamente la interfaz del programa.



4. Se conectan las puntas del multímetro al equipo y al panel que se va a tomar las medidas.

5. Una vez conectado las puntas de multímetro, se procede a dar *click* al botón INICIAR para iniciar la lectura de los valores de corriente y voltaje.



6. Luego de dar *click* al botón INICIAR pasaran 50 segundos entre la carga y descarga de los capacitores, donde el led verde indicara la carga del capacitor mientras que el led rojo indicará el proceso de descarga del mismo y se mostraran los valores leídos del panel en la interfaz.

7. Luego de haber obtenido los valores podremos observar las gráficas y eso podremos hacerlo al dar *click* en botón GRAFICA I-V o GRAFICA P-V.





8. Cualquiera de los dos botones que se escoja nos permitirán observar las gráficas y dicha grafica se podrán guardar en el equipo para de ahí ser almacenada en una memoria externa para un posterior análisis de la muestra obtenida. La opción guardar se mostrará en al parte inferior de la imagen con un icono de *disquet* como se observa en a la figura.

9. Por último, si se desea tomar otra muestra se dará *click* en el botón FINALIZAR y se limpiará la interfaz y podremos tomar otra muestra repitiendo todo desde el quinto punto.



Loja, 28 de agosto de 2023

MONCADA MONCADA SARA HELEN, Licenciada en Ciencias de la Educación, Mención Idioma Ingles por la Universidad Nacional de Loja (UNL), y Magister en Pedagogía de los Idiomas Nacionales y Extranjeros, Mención Enseñanza de Inglés por la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL).

CERTIFICA. –

Que el resumen de tesis titulada “Diseño y construcción de un graficador de curvas I-V para paneles fotovoltaicos” a cargo del estudiante Luis Bryan Collaguazo Valle con cédula de identidad 1718519612ca sido debidamente traducido y revisado por mi persona.



Mgs. Moncada Moncada Sara Helen

C.I. 1103737571

REGISTRO SENECYT N°: 1031-2023-2647502