



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Diseño y construcción de un trazador de curvas I-V para analizar paneles solares fotovoltaicos

*Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico*

Autor

Juan Francisco Moscoso Romo
jfrancisco.moscosor@gmail.com
C.I. 0301804068

Director

Ing. Luis Gerardo González Morales, Ph.D.
C.I. 1729711059

CUENCA – ECUADOR

09 de abril de 2021



Resumen

El gran incremento de la industria de la energía solar fotovoltaica, ha conllevado al desarrollo de herramientas que permitan evaluar periódicamente el estado de los sistemas de generación fotovoltaicos. Dentro de esas herramientas destacan los trazadores de curvas I-V, los cuales permiten evaluar el estado de plantas fotovoltaicas, brindando información precisa sobre posibles fallas o deterioros que pueden estar afectando el funcionamiento de la instalación. En este contexto, el presente trabajo de titulación muestra el diseño y la construcción de un trazador de curvas I-V basado en el método de carga capacitiva, mismo que se emplea para obtener las características corriente-voltaje de módulos o cadenas fotovoltaicas con el fin de evaluar su rendimiento.

Todo el proceso de diseño del trazador de curvas I-V se describe a detalle en este trabajo, en el cual se especifica todos los materiales empleados, el diagrama electrónico de las etapas de control y fuerza, y el programa desarrollado en Python para controlar todo el funcionamiento del trazador de curvas I-V. Una simulación realizada en PSIM permite ejemplificar el funcionamiento del equipo. Una vez finalizado el diseño, se continúa con el proceso de construcción del equipo, teniendo como resultado final un equipo portátil y escalable capaz de obtener las características corriente-voltaje de sistemas fotovoltaicos con corrientes de cortocircuito de hasta 16 A y con voltajes de circuito abierto de hasta 500 V, esto en tiempos inferiores a 1 segundo. Además, en el documento se brinda una revisión bibliográfica de la información más relevante con respecto a las curvas I-V y al análisis de las mismas; así como también información relacionada a los diferentes métodos que pueden emplear los trazadores de curvas I-V.

Finalmente, se realiza pruebas experimentales en los paneles fotovoltaicos del laboratorio de Micro-red de la Universidad de Cuenca con el fin de evaluar el estado de los mismos y validar el funcionamiento del trazador de curvas I-V construido. Los resultados de las pruebas experimentales mostraron que cuatro de los seis paneles fotovoltaicos analizados presentan fallas o deterioros, lo cual coincide con los resultados esperados. Además, los resultados obtenidos se comparan con respecto a los obtenidos de un trazador de curvas I-V comercial, consiguiendo resultados similares en ambos casos, comprobando de esta manera que el equipo construido es adecuado para analizar el estado de los sistemas de generación fotovoltaicos.

Palabras Clave: *Curvas I-V. Trazador de curvas I-V. Carga capacitiva. Sistemas fotovoltaicos*



Abstract

The great increase in the photovoltaic solar energy industry has led to the development of tools that make it possible to periodically evaluate the state of photovoltaic generation systems. Among these tools, the I-V curve tracers stand out, which allow evaluating the state of photovoltaic plants, providing precise information about possible failures or deterioration that may be affecting the operation of the installation. In this context, the present work shows the design and construction of an I-V curve tracer based on the capacitive charging method, which is used to obtain the current-voltage characteristics of photovoltaic modules or strings in order to evaluate their performance.

The entire design process of the I-V curve tracer is described in detail in this work, which specifies all the materials used, the electronic diagram of the control and force stages, and the program developed in Python to control the entire operation of the I-V curve tracer. A simulation carried out in PSIM allows to exemplify the operation of the equipment. Once the design was completed, the equipment construction process was proceeded, resulting in a portable and scalable equipment capable of obtaining the current-voltage characteristics of photovoltaic systems with short-circuit currents lower than 16 A and with open-circuit voltages lower than 500 V, this in times below 1 second. In addition, the document provides a bibliographic review of the most relevant information regarding the I-V curves and their analysis; as well as information related to the different methods that I-V curve tracers can use.

Finally, experimental tests were carried out on the photovoltaic panels of the Microgrid laboratory of the University of Cuenca in order to evaluate their status and validate the operation of the constructed I-V curve tracer. The results of the experimental tests showed that four of the six photovoltaic panels analyzed present failures or deterioration, which is consistent with the expected results. In addition, the results obtained were compared with those obtained from a commercial I-V curve tracer, obtaining similar results in both cases, thus verifying that the equipment built is adequate to analyze the state of photovoltaic generation systems.

Keywords: *I-V curves. I-V curve tracer. Capacitive load. Photovoltaic systems*



Índice General

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	XV
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL	XVI
DEDICATORIA	XVII
AGRADECIMIENTOS	XVIII
1 GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 Metodología	3



1.5	Contenido	4
2	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1	Energía y Fuentes de Energía.....	5
2.1.1	Energía	5
2.1.2	Fuentes de Energía.....	5
2.2	Energía Solar Fotovoltaica.....	6
2.2.1	El Sol y la Energía.....	6
2.2.2	Energía Solar	7
2.2.3	Energía Solar Fotovoltaica	8
2.2.3.1	Celdas Fotovoltaicas y Efecto Fotoeléctrico	8
2.2.3.2	Módulo, Panel, String, Subarray y Array.....	10
2.2.3.3	Ventajas y Desventajas de la Energía Solar Fotovoltaica	12
2.2.3.4	Modelos Matemáticos de un generador fotovoltaico.....	13
2.2.3.5	Modelo de Diodo Único.....	14
2.2.3.6	Características de los Celdas Solares Fotovoltaicas.....	17
2.3	Análisis de las curvas I-V.....	18
2.3.1	Definición de las curvas I-V.....	18
2.3.2	Curvas I-V de celdas, módulos y matrices fotovoltaicas	19
2.3.3	Condiciones estándar de medida o STC.....	21
2.3.4	Variación de las curvas I-V debido a la Temperatura e Irradiancia	21
2.3.5	Especificaciones técnicas de una de una celda o módulo fotovoltaico	23
2.3.6	Normativas Internacionales	24
2.3.7	Corrección de Temperatura e Irradiancia a STC según la norma IEC 60891:2009....	25
2.3.8	Desviaciones de la curva I-V de acuerdo a la norma IEC 62446-1.....	29
2.3.8.1	Variación 1 – Presencia de escalones o cortes en curva I-V	30
2.3.8.2	Variación 2 – La curva I-V medida, muestra un valor de I_{SC} menor que la prevista	32
2.3.8.3	Variación 3 – La curva I-V medida, muestra un valor de V_{OC} menor que el previsto	33
2.3.8.4	Variación 4 – Curvatura de la rodilla o codo de la curva.....	35
2.3.8.5	Variación 5 – Pendiente menos pronunciada en la región de fuente de voltaje.....	35
2.3.8.6	Variación 6 – Mayor pendiente en la región de fuente de corriente	36
2.3.9	Índices de Rendimiento	36
2.3.9.1	Factor de Rendimiento PF	37
2.3.9.2	Factor de Forma FF	37
2.3.9.3	Relación de Voltaje y Corriente.....	38
2.3.10	Trazadores de Curvas I-V	38
2.3.10.1	Método de carga resistiva.....	40
2.3.10.2	Método de carga capacitiva.....	42



2.3.10.3	Método de carga electrónica.....	44
2.3.10.4	Método de suministro de energía de cuatro cuadrantes	46
2.3.10.5	Método con convertidores DC-DC	47
3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TRAZADOR DE CURVAS I-V	49
3.1	Justificación del método seleccionado: Método de Carga Capacitiva.....	49
3.2	Descripción general del sistema propuesto.....	49
3.3	Diseño Eléctrico	51
3.3.1	Etapa de Fuerza	51
3.3.1.1	Sistema de Generación Fotovoltaico.....	51
3.3.1.2	Breaker o Disyuntor DC.....	52
3.3.1.3	Transistores IGBT	52
3.3.1.4	Banco de Capacitores.....	53
3.3.1.5	Resistencia de Descarga	58
3.3.1.6	Lista de Materiales empleados en la Etapa de Fuerza.....	58
3.3.2	Etapa de Control y Adquisición de Datos.....	59
3.3.2.1	Circuitos de Control.....	62
3.3.2.1.1	Circuito de Disparo de los Transistores IGBT	62
3.3.2.1.2	Circuito de selección de la configuración del banco de capacitores	63
3.3.2.2	Sistema de Adquisición de Datos.....	65
3.3.2.2.1	Medición de Voltaje	65
3.3.2.2.2	Medición de Corriente.....	66
3.3.2.2.3	Medición de Temperatura e Irradiancia.....	68
3.3.2.2.4	Adquisición de Datos	70
3.3.2.2.5	Trazado de la curva I-V y almacenamiento de la información	72
3.3.2.3	Circuitos de Alimentación.....	72
3.3.2.4	Lista de materiales empleados en la Etapa de Control y Adquisición de Datos.....	73
3.4	Construcción del prototipo	74
3.4.1	Diagrama Electrónico	74
3.4.2	Construcción del Trazador de curvas I-V.....	77
3.5	Características del trazador de curvas I-V desarrollado.....	79
3.5.1	Capacitancia	79
3.5.2	Rangos de Operación.....	80
3.5.2.1	Rango Máximo de Voltaje y Corriente del ADC.....	80
3.5.2.1.1	Rango Máximo de Voltaje del ADC	80
3.5.2.1.2	Rango Máximo de Corriente del ADC.....	81
3.5.2.1.3	Rango Máximo de Voltaje/Corriente del ADC empleados en el equipo.....	82
3.5.3	Resolución.....	82
3.5.3.1	Resolución en la Medición de Voltaje.....	82



3.5.3.2	Resolución de la medición de Corriente.....	83
3.5.4	Velocidad de Barrido.....	83
3.5.5	Tiempo de Descarga.....	84
3.5.6	Tamaño y Costo del Equipo.....	85
3.6	Simulación del sistema propuesto.....	86
3.7	Proceso de obtención de la curva I-V y Aplicación desarrollada en Python .	91
3.7.1	Diagrama de Flujo del Proceso de Obtención de la curva.....	91
3.7.2	Aplicación desarrollada en Python.....	93
3.8	Calibración de los sensores.....	98
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	99
4.1	Descripción del proceso de análisis.....	99
4.2	Características de los módulos analizados.....	101
4.3	Simulación de las características corriente-voltaje de los módulos fotovoltaicos.....	103
4.3.1	Identificación de Parámetros en STC.....	104
4.3.2	Variación con Irradiancia y Temperatura.....	107
4.4	Resultados y Análisis.....	110
4.4.1	Consideraciones para la obtención de las curvas I-V.....	110
4.4.2	Curvas I-V obtenidas.....	111
4.4.2.1	Curva I-V Módulo 1 - JINKO JKM275PP-60 PP-1.....	112
4.4.2.2	Curva I-V Módulo 2 - JINKO JKM275PP-60 PP-2.....	113
4.4.2.3	Curva I-V Módulo 3 - ATERSA A-250M P5-3.....	115
4.4.2.4	Curva I-V Módulo 4 - ATERSA A-250M P5-13.....	116
4.4.2.5	Curva I-V Módulo 5 - ATERSA A-250M P6-1.....	117
4.4.2.6	Curva I-V Módulo 6 - ATERSA A-250M P8-1.....	118
4.4.3	Comparación entre las curvas I-V obtenidas con el equipo construido y con un trazador comercial.....	120
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
5.1	Conclusiones.....	123
5.2	Recomendaciones.....	124
	REFERENCIAS.....	125



ANEXOS..... 129

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1. Espectro solar que llega fuera de la atmosfera comparado con la que emite un cuerpo negro a 5778K [7].</i>	6
<i>Figura 2.2. Componentes de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra [9].</i>	7
<i>Figura 2.3. Celda Fotovoltaica Típica [10].</i>	9
<i>Figura 2.4. Celda Solar Fotovoltaicas a) monocristalina y policristalina [12], b) de película delgada de silicio amorfo [13] y c) orgánica [14].</i>	10
<i>Figura 2.5. Panel Solar a) apariencia y b) configuración [11].</i>	11
<i>Figura 2.6. Capacidad de energía fotovoltaica desde la celda hasta la matriz fotovoltaica [11].</i>	12
<i>Figura 2.7. Diodos de bypass y diodos de bloque en un circuito fotovoltaico [11].</i>	12
<i>Figura 2.8. Circuito Equivalente Modelo de Diodo Único [16].</i>	14
<i>Figura 2.9. Circuito Equivalente Modelo de Doble Diodo [16].</i>	14
<i>Figura 2.10. Circuito Equivalente a) Modelo Ideal de Diodo Único, b) Modelo de Diodo Único Simplificado 1 y c) Modelo de Diodo Único Simplificado 2 [16].</i>	16
<i>Figura 2.11. Curvas I-V y P-V típicas de una celda solar [11].</i>	17
<i>Figura 2.12. Curvas I-V de a) 3 celdas conectadas en serie y b) 3 celdas conectadas en paralelo [18].</i>	19
<i>Figura 2.13. Curvas I-V de a) 3 módulos conectados en serie y b) 3 módulos conectados en paralelo [18].</i>	20
<i>Figura 2.14. Escalado de una curva I-V de una celda fotovoltaica a una matriz fotovoltaica [18].</i>	21
<i>Figura 2.15. Conjunto de curvas I-V del módulo fotovoltaico CS3W-420P [21].</i>	22
<i>Figura 2.16. Tres regiones en la curva I-V [3].</i>	29
<i>Figura 2.17. Variaciones en la forma de la curva I-V de acuerdo a la norma IEC 62446-1.</i>	30
<i>Figura 2.18. Diferentes tipos de escalonado en las curvas I-V [27].</i>	31
<i>Figura 2.19. Efectos de la degradación inducida por voltaje PID a lo largo del tiempo en las curvas I-V [27].</i>	34
<i>Figura 2.20. Representación gráfica del Factor de Relleno, Relación de Corriente y Relación de Voltaje [27].</i>	38
<i>Figura 2.21. Operación típica de un trazador de curvas I-V [3].</i>	40
<i>Figura 2.22. Método de carga resistiva [30].</i>	40
<i>Figura 2.23. Método de carga resistiva que emplea un esquema binario [3].</i>	41



Figura 2.24. Método de carga resistiva propuesto en [32].	42
Figura 2.25. Circuito esquemático del método de carga capacitiva [3].	42
Figura 2.26. Curva I-V real y curva I-V ideal [28].	43
Figura 2.27. Circuito esquemático de un trazador I-V que emplea un MOSFET como carga electrónica [3].	45
Figura 2.28. Características I-V de un módulo fotovoltaico y de un transistor MOSFET [3].	45
Figura 2.29. Curva I-V obtenida con una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes [3].	46
Figura 2.30. Circuito esquemático del método de suministro de energía de cuatro cuadrantes [3].	47
Figura 2.31. Circuito esquemático de los trazadores I-V que emplean convertidores DC-DC [30].	48
Figura 2.32. Principales topologías de convertidores DC-DC empleadas para la obtención de las curvas I-V (a) Buck-Boost (b) Cuk (c) Zeta (d) SEPIC [3].	48
Figura 3.1. Diagrama de Bloques del Trazador I-V propuesto.	50
Figura 3.2. Circuito Esquemático del circuito de fuerza.	51
Figura 3.3. Breaker DC TOB7Z-63 [36].	52
Figura 3.4. Transistor IGBT G30N135HR [37].	53
Figura 3.5. Distintas configuraciones del banco de capacitores.	54
Figura 3.6. Esquema de Conexión del Banco de Capacitores.	55
Figura 3.7. Capacitor BHC de 4400 uF.	56
Figura 3.8. Contactor SIRIUS 3RT2024-1AG20 [38].	57
Figura 3.9. Resistencia de equilibrio ATE 10SR-27k-J [39].	57
Figura 3.10. Resistencias L100J500E [40].	58
Figura 3.11. Ordenador empleado para el trazador de curvas I-V: Raspberry Pi 3B [1].	60
Figura 3.12. Pines GPIO del Raspberry Pi 3B [41].	61
Figura 3.13. Circuito Esquemático empleado para el disparo de los transistores IGBT.	62
Figura 3.14. Circuito Esquemático empleado para iniciar el proceso de obtención de la curva I-V.	63
Figura 3.15. Circuito Esquemático empleado para activar el contactor.	64
Figura 3.16. a) Transductor LV25-P y b) Circuito Esquemático [42].	65
Figura 3.17. a) Transductor LAH 25-NP b) Circuito Esquemático y c) Conexión empleada [43].	67
Figura 3.18. a) Sensor de Irradiancia SP-110 b) Sensor de Temperatura LM35.	70
Figura 3.19. Convertidor Analógico-Digital ADS1015 [44].	71
Figura 3.20. Diagrama Electrónico. Parte 1.	75
Figura 3.21. Diagrama Electrónico. Parte 2.	75
Figura 3.22. Diagrama Electrónico. Parte 3.	76
Figura 3.23. Diagrama Electrónico. Parte 4.	76
Figura 3.24. Trazador de curvas I-V construido. Parte exterior superior.	77
Figura 3.25. Trazador de curvas I-V construido. Partes exteriores laterales.	78
Figura 3.26. Trazador de curvas I-V construido. Parte Interior.	79
Figura 3.27. Simulación del Funcionamiento del Trazador de curvas I-V realizada en PSIM.	86
Figura 3.28. Curva voltaje vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM.	88



<i>Figura 3.29. Curva voltaje vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM – Fase de Carga.</i>	88
<i>Figura 3.30. Curva voltaje vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM – Fase de Descarga.</i>	89
<i>Figura 3.31. Curva corriente vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM</i>	89
<i>Figura 3.32. Curva corriente vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM – Fase de Carga.</i>	90
<i>Figura 3.33. Curva corriente vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM – Fase de Carga.</i>	90
<i>Figura 3.34. Diagrama de Flujo del Proceso de Obtención de la curva I-V.</i>	91
<i>Figura 3.35. Diagrama de Flujo del script desarrollado en Python.</i>	94
<i>Figura 3.36. Interfaz Gráfica desarrollada.</i>	95
<i>Figura 3.37. Diagrama de Flujo de la Interfaz Gráfica desarrollada.</i>	96
<i>Figura 4.1. Distribución de paneles fotovoltaicos del laboratorio de Micro-red eléctrica de la Universidad de Cuenca [29].</i>	100
<i>Figura 4.2. Módulos fotovoltaicos policristalinos analizados.</i>	101
<i>Figura 4.3. Módulos fotovoltaicos monocristalinos analizados.</i>	102
<i>Figura 4.4. Modelo ideal de diodo único ISDM.</i>	103
<i>Figura 4.5. Curva I-V y Curva P-V del módulo ATERSA A-250M obtenidas empleando el ISDM.</i>	104
<i>Figura 4.6. Curva I-V y Curva P-V del módulo JINKO JKM275PP-60 obtenidas empleando el ISDM.</i>	106
<i>Figura 4.7. Curvas I-V del módulo ATERSA A-250M. Irradiancia Constante y Temperatura Variable.</i>	108
<i>Figura 4.8. Curvas I-V del módulo ATERSA A-250M. Irradiancia Variable y Temperatura Constante.</i>	108
<i>Figura 4.9. Curvas I-V del módulo JINKO JKM275PP-60. Irradiancia Constante y Temperatura Variable.</i>	109
<i>Figura 4.10. Curvas I-V del módulo JINKO JKM275PP-60. Irradiancia Variable y Temperatura Constante.</i>	110
<i>Figura 4.11. Curva I-V del módulo PP-1 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)</i>	112
<i>Figura 4.12. Curva I-V del módulo PP-2 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)</i>	113
<i>Figura 4.13. Curvas I-V del módulo P5-3 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)</i>	115
<i>Figura 4.14. Curvas I-V del módulo P5-13 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)</i>	116
<i>Figura 4.15. Curvas I-V del módulo P6-1 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)</i>	117
<i>Figura 4.16. Curvas I-V del módulo P8-1 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)</i>	119



Figura 4.17. Curvas I-V del módulo P5-3 en STC a) modelada (curva negra), b) obtenida del trazador I-V construido (curva roja) y c) obtenida del trazador I-V comercial (curva azul)... 120

Figura 4.18. Curvas I-V del módulo P5-13 en STC a) modelada (curva negra), b) obtenida del trazador I-V construido (curva roja) y c) obtenida del trazador I-V comercial (curva azul)... 121

Figura 4.19. Curvas I-V del módulo P6-1 en STC a) modelada (curva negra), b) obtenida del trazador I-V construido (curva roja) y c) obtenida del trazador I-V comercial (curva azul)... 121

Figura 4.20. Curvas I-V del módulo P8-1 en STC a) modelada (curva negra), b) obtenida del trazador I-V construido (curva roja) y c) obtenida del trazador I-V comercial (curva azul)... 122



Índice de Tablas

<i>Tabla 2.1. Ventajas y Desventajas de la Energía Solar Fotovoltaica [10] [11] [15].....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2.2. Significado de los Puntos y Valores importantes de las curvas I-V y P-V.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2.3. Condiciones Estándar de Medida STC [18]</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2.4. Especificaciones del módulo fotovoltaico CS3W-425P [21].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3.1. Configuración del banco de capacitores.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 3.2. Lista de componentes empleados en la etapa de fuerza.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 3.3. Configuración del banco de capacitores de acuerdo a los contactores activados.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 3.4. Características Principales del dispositivo LV 25-P</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 3.5. Características Principales del dispositivo LAH 25-P.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 3.6. Características Principales de los dispositivos SP-110 y LM-35.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 3.7. Frecuencias de Muestreo y Tiempo por muestra del ADS1115 y del ADS1015.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 3.8. Voltaje de Referencia y tamaño del LSB de los ADC ADS1115 y del ADS1015.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 3.9. Lista de componentes empleados en la etapa de control y.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 3.10. Valores de la capacitancia total de acuerdo a la configuración del banco de capacitores.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 3.11. Rango Máximo de Voltaje de acuerdo a la configuración del ADC.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 3.12. Rango Máximo de Corriente de acuerdo a la configuración del ADC</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 3.13. Resolución de Voltaje de acuerdo a la configuración del ADC</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 3.14. Resolución de Voltaje de acuerdo a la configuración del ADC</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 3.15. Tiempos de Descarga del Banco de Capacitores de acuerdo a su configuración. ...</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 3.16. Dimensiones y Peso del Trazador de curvas I-V construido.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 3.17. Costo de los Materiales Empleados para la construcción del.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 4.1. Especificaciones del módulo fotovoltaico ATERSA A-250M [47].....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 4.2. Especificaciones del módulo fotovoltaico JINKO JKM275PP-60 [48]</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 4.3. Resultados de la simulación del ISDM. Módulo ATERSA A-250M</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 4.4. Resultados de la simulación del ISDM. Módulo JINKO JKM275PP-60.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 4.5. Parámetros obtenidos del modelo del módulo PP-1 y del trazador de curvas I-V... </i>	<i>113</i>
<i>Tabla 4.6. Parámetros obtenidos del modelo del módulo PP-2 y del trazador de curvas I-V... </i>	<i>114</i>
<i>Tabla 4.7. Parámetros obtenidos del modelo del módulo P5-3 y del trazador de curvas I-V. ..</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 4.8. Parámetros obtenidos del modelo del módulo P5-13 y del trazador de curvas I-V.. </i>	<i>116</i>
<i>Tabla 4.9. Parámetros obtenidos del modelo del módulo P6-1 y del trazador de curvas I-V. ..</i>	<i>118</i>



Tabla 4.10. Parámetros obtenidos del modelo del módulo P8-1 y del trazador de curvas I-V.. 119



Cláusula de licencia y autorización para la publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Juan Francisco Moscoso Romo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRAZADOR DE CURVAS I-V PARA ANALIZAR PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 09 de abril de 2021

Juan Francisco Moscoso Romo

C.I: 0301804068



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Juan Francisco Moscoso Romo, autor del trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRAZADOR DE CURVAS I-V PARA ANALIZAR PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 09 de abril de 2021

Juan Francisco Moscoso Romo

C.I: 0301804068



Dedicatoria

Dedico este trabajo primeramente a Dios. A mis padres, Freddy y Deisi, por ser los guías a lo largo de toda mi vida, por inculcarme todos los valores presentes en mi persona, y por ser sinónimos de amor, trabajo y fortaleza. A mis hermanos, María Paz y Andrés, por apoyarme en todo momento y estar siempre unidos ante cualquier situación. A todos los amigos que he ido haciendo con el tiempo, con quienes hemos compartido buenos y malos momentos. A mis abuelitos, Cornelio y Violeta, a quienes les mando un fuerte abrazo hasta el cielo.



Agradecimientos

A la Universidad de Cuenca, por acogerme en sus aulas y formarme como persona y como profesional. A mi familia, por todo su apoyo en mi etapa universitaria. A mi tutor, Ing. Luis González, por guiarme a lo largo de todo el proceso del trabajo de titulación, y por ser un excelente profesional y amigo. A todas las personas del laboratorio de Micro-Red con quienes compartí estos meses, por tantos buenos momentos, por toda su ayuda y consejos.



Capítulo 1

Generalidades

1.1 Introducción

Las energías renovables tienen un papel cada vez más protagónico en el mundo, esto debido a que el uso de este tipo de fuentes de energía se ha integrado en el mundo para suplir parte de la demanda de energía eléctrica, la misma que continuará en aumento en los próximos años, y como un mecanismo para combatir el cambio climático; todo esto como una solución para alcanzar la sostenibilidad [1]. Es por esta razón que el estudio de dichas fuentes de energía se ha convertido en un tema de gran interés.

Dentro de este grupo, se encuentra la energía solar fotovoltaica, la cual constituye justamente una fuente de energía renovable inagotable y se refiere a la generación directa de electricidad a partir de la radiación solar. La industria de la energía solar fotovoltaica ha tenido un gran crecimiento en los últimos años, lo cual puede evidenciarse con el aumento de la capacidad instalada de este tipo de energía en muchos países [1]. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA) la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica total a nivel mundial a finales del año 2019 alcanzó al menos 603 GW [2] y seguirá aumentando, siendo una de las principales fuentes de energía renovable utilizada en los próximos años. Una de las principales ventajas del empleo de los módulos fotovoltaicos es su larga vida útil [1], por lo que se espera que los sistemas fotovoltaicos puedan operar durante algunas décadas [3]. Estos sistemas fotovoltaicos deben evaluarse periódicamente a lo largo de toda su vida útil, en consecuencia, surge la necesidad de la industria de contar con una herramienta que permita evaluar con precisión cualquier problema potencial en dichos sistemas [3]. El método mayormente utilizado por profesionales para el diagnóstico de las instalaciones fotovoltaicas es la obtención de las curvas características corriente-voltaje o curvas I-V. Este método es altamente confiable y es considerado una herramienta fundamental en la detección de fallas [1].



Las curvas I-V proporcionan información relevante acerca del rendimiento de la celda, módulo, cadena o matriz fotovoltaica bajo análisis, ya que son una representación gráfica de su funcionamiento y muestran la relación que existe entre la corriente y el voltaje del generador fotovoltaico. A los equipos empleados para la obtención de las curvas I-V de manera efectiva se les denomina trazadores de curvas I-V. Existen diversas topologías mencionadas en la literatura que pueden utilizar los trazadores para la obtención de las curvas I-V, sin embargo, todas ellas tienen el mismo principio de operación, el cual se basa en la obtención del voltaje y corriente, desde la condición de cortocircuito hasta la condición de circuito abierto [3]. Las curvas I-V varían, en cuanto a su forma, según las condiciones propias del generador fotovoltaico (presencia de fallas o deterioros) y según las condiciones de temperatura e irradiancia, por lo que es necesario la medición de estas condiciones ambientales al momento de la obtención de la curva I-V. Así, cuando el generador fotovoltaico presenta algún deterioro, la curva I-V presenta desviaciones atípicas en comparación con una curva estándar. Estas desviaciones pueden deberse a diversas fallas en el generador fotovoltaico (sombreado parcial o total, depósito de polvo, celdas agrietadas, problemas de delaminación, un cortocircuito en el diodo de bypass, degradación normal del módulo, la presencia de un punto caliente, entre otros), por lo cual un análisis adecuado debe realizarse para determinar el origen de la desviación.

De este modo, los trazadores de curvas I-V constituyen una herramienta adecuada para evaluar el funcionamiento de los sistemas de generación fotovoltaicos y diagnosticar la presencia de fallas o deterioros [3]; sin embargo, actualmente la Universidad de Cuenca no cuenta con este equipo. En este contexto, el trabajo desarrollado pretende la construcción de un trazador de curvas I-V portátil y escalable, de tal manera que la Universidad de Cuenca cuente con una herramienta para la obtención de las curvas I-V.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar y construir un trazador de curvas I-V utilizando el método de carga capacitiva para contar con una herramienta de análisis de los paneles solares fotovoltaicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Determinar la importancia del uso de trazadores de curvas I-V para los paneles solares.
- II. Analizar los distintos métodos para obtener las curvas I-V.
- III. Desarrollar un prototipo funcional para obtener las curvas I-V de manera sencilla y eficaz.



- IV. Emplear el prototipo construido para detectar posibles fallas en los paneles solares del Laboratorio de Micro-Red de la Universidad de Cuenca.

1.3 Alcance

Una vez culminado el desarrollo de este trabajo, el trazador de curvas I-V construido será una herramienta que podrá ser utilizada para la obtención de las curvas I-V de módulos o cadenas fotovoltaicas cuyo rendimiento se pretenda evaluar.

1.4 Metodología

La metodología empleada en el desarrollo de este trabajo es la siguiente:

En primer lugar, se busca información relacionada a las curvas I-V y a las diferentes topologías empleadas por los trazadores de curvas I-V en artículos científicos, libros, revistas, es decir en toda fuente que contenga información valiosa para tener una idea clara del tema del trabajo. Una vez definida la bibliografía, se procede a la elaboración del marco teórico del proyecto.

Luego de la investigación, con los conocimientos adquiridos, se define la topología que tendrá el trazador de curvas I-V, siendo el método de carga capacitiva la topología escogida para la construcción del prototipo. Una vez definida la topología, se procede a realizar el diseño eléctrico del circuito, para lo cual se examina la disponibilidad de los todos los componentes empleados en el diseño en el mercado local, o en su defecto, la factibilidad de su importación. Ya con el diseño establecido, se realiza una simulación del circuito en el software PSIM para validar el funcionamiento del mismo.

Después de que el funcionamiento del circuito eléctrico se valida, se adquiere todos los componentes empleados en el diseño y se procede a la construcción del trazador de curvas I-V y a la elaboración de un programa desarrollado en Python para la obtención de las curvas I-V. Una vez finalizada la construcción del equipo, los sensores empleados se calibran para garantizar la calidad de las mediciones obtenidas con el mismo.

Luego, se emplea el equipo construido para obtener las curvas I-V de los módulos fotovoltaicos del laboratorio de Micro-red de la Universidad de Cuenca y finalmente, los resultados obtenidos son analizados y comparados con respecto a los obtenidos por un trazador de curvas I-V comercial.



1.5 Contenido

El trabajo desarrollado está organizado de la siguiente manera:

- **Capítulo 1:** En este capítulo se presenta la introducción, objetivo general y objetivos específicos, el alcance y la metodología empleada para el desarrollo del trabajo.
- **Capítulo 2:** En este capítulo se presenta la revisión del estado del arte, en donde se recopila información acerca de la energía solar fotovoltaica, y principalmente, se presenta los fundamentos teóricos de las curvas I-V y de los trazadores de curvas I-V.
- **Capítulo 3:** En este capítulo se presenta todo el proceso de diseño del trazador de curvas I-V, se describe el proceso construcción y se muestra las características más relevantes del prototipo construido. Además, se describe el programa implementado para controlar el funcionamiento de todo el equipo.
- **Capítulo 4:** En este capítulo se emplea el equipo construido para la obtención de las curvas I-V de seis diferentes módulos fotovoltaicos y se realiza el análisis respectivo de la condición de cada uno de ellos. Los resultados se validan con respecto a los obtenidos con un trazador de curvas I-V comercial.
- **Capítulo 5:** En este capítulo se presenta las conclusiones obtenidas al final del este trabajo, conjuntamente con las recomendaciones para el uso del equipo construido.



Capítulo 2

Marco Teórico y Estado del Arte

2.1 Energía y Fuentes de Energía

2.1.1 Energía

La energía es un componente esencial de la sociedad, puesto que permite el desarrollo y el crecimiento económico de los países, además de estar presente en la vida diaria de las personas. Es por esto fundamental tener disponibilidad de un suministro de energía limpia, confiable y oportuna [4].

La energía es un recurso que puede ser de diferentes tipos y estar disponible de diversas fuentes, sin embargo, es necesario transformar la energía en formas utilizables según sea la necesidad, como por ejemplo energía eléctrica, energía térmica, energía mecánica, energía lumínica, entre otras.

2.1.2 Fuentes de Energía

En cuanto a las fuentes de energía, generalmente se clasifican en dos categorías a partir de su fuente primaria:

- *Energías No Renovables.* – Son aquellas fuentes que provienen de reservas de energía limitadas y dependen de procesos naturales para su creación. Estos recursos son finitos y se reemplazan muy lentamente en comparación a su velocidad de consumo [4]. Dentro de este grupo se encuentran los combustibles fósiles (petróleo, gas natural, carbón) y la energía nuclear.

- *Energías Renovables.* – Son aquellas fuentes que provienen de recursos que se encuentran disponibles de forma natural y continua o que se reponen en periodos cortos de tiempo [5]. Entre las más comunes fuentes de energías renovables se encuentran: energía solar, energía hidroeléctrica, energía eólica, energía geotérmica, energía de biomasa y energía mareomotriz.

2.2 Energía Solar Fotovoltaica

2.2.1 El Sol y la Energía

El sol constituye una fuente de energía renovable inagotable; siendo además la principal fuente de la mayoría de las energías renovables en el planeta, con excepción de la energía de las mareas y la energía geotérmica [6] [7].

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 3.86×10^{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 [7]. En la [Figura 2.1](#) se muestra el espectro solar que llega fuera de la atmosfera, la cual puede aproximarse al de un cuerpo negro a una temperatura de 5778 K [7].

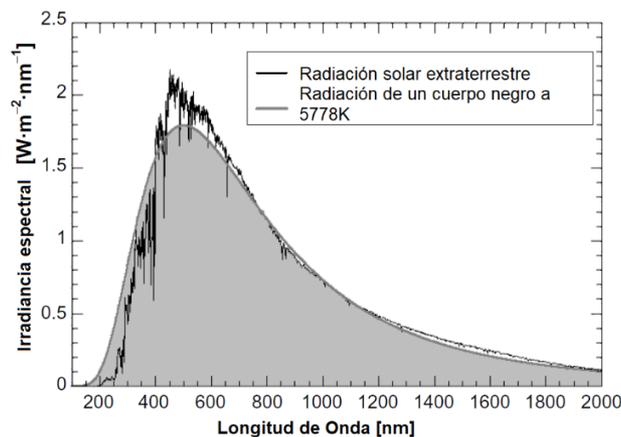


Figura 2.1. Espectro solar que llega fuera de la atmosfera comparado con la que emite un cuerpo negro a 5778K [7].

La energía solar por unidad de área que llega a la superficie exterior de la atmosfera de la Tierra puede obtenerse mediante la integral del espectro solar mostrada en la figura anterior. El valor de dicha energía se le conoce como constante solar y su valor promedio es de 1367 W/m^2 [7].



Sin embargo, no toda la energía proveniente de la radiación solar que llega a la tierra puede ser aprovechada, ya que del total de esa energía ($5,46 \times 10^{24}$ J o 1.517×10^{18} kWh), aproximadamente el 29% es reflejada al espacio, el 23% es absorbida por la atmosfera, y el 48% es absorbida por la superficie terrestre, siendo esta la energía que podemos aprovechar [7]. No obstante, con estos datos se aprecia como la energía solar abastecería completamente el consumo eléctrico mundial, que en el año 2018 fue de 2.474×10^{13} kWh [8].

La radiación solar que incide en una determinada superficie en la Tierra puede ser expresada por sus tres componentes principales, siendo estos radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada o albedo [9], los cuales se aprecian en la [Figura 2.2](#).

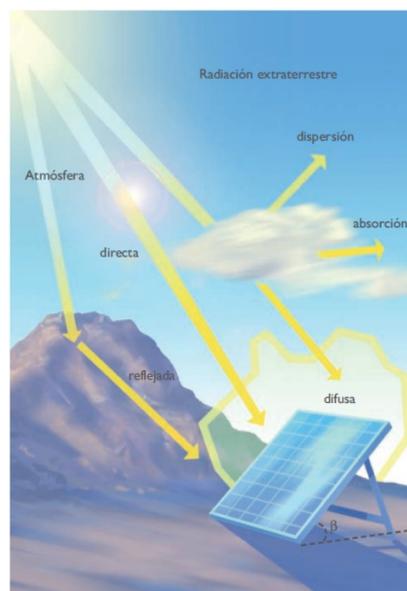


Figura 2.2. Componentes de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra [9].

2.2.2 Energía Solar

La energía solar se refiere a la energía que se obtiene directamente a partir del sol, ya sea a través de celdas fotovoltaicas, concentradores solares, entre otros. Sin embargo, transformar la energía solar, la cual es abundante en la superficie de la Tierra, en electricidad no es una tarea fácil y a menudo resulta costoso [6].

Generalmente, el uso de la energía solar se divide en dos categorías:

- **Energías Solar Térmica.** – Es una fuente de energía que se refiere al aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de algún fluido. Esta energía puede utilizarse para distintas aplicaciones en relación a la temperatura final del fluido, por ejemplo, se puede usar



para el calentamiento del agua, para la calefacción de viviendas, para procesos industriales, para producir electricidad, etc. [9].

- **Energías Solar Fotovoltaica.** – Es una fuente de energía que transforma la energía solar en energía eléctrica, a través de dispositivos semiconductores denominados celdas fotovoltaicas [9].

Términos muy usados en el ámbito de la energía solar son insolación e irradiancia. Se conoce como insolación a la cantidad de energía solar que llega a la superficie de la Tierra, en un determinado tiempo y ubicación, y su valor depende de una gran cantidad de factores [6]. En tanto que el término irradiancia hace referencia a la cantidad total de energía solar por unidad de área por segundo que llega a esa superficie, en otras palabras, la irradiancia hace referencia a la potencia por unidad de área y su valor generalmente viene expresado en W/m^2 [7].

2.2.3 Energía Solar Fotovoltaica

2.2.3.1 Celdas Fotovoltaicas y Efecto Fotoeléctrico

La generación de electricidad en corriente continua en las celdas fotovoltaicas ocurre debido al efecto fotoeléctrico. Este efecto ocurre en materiales semiconductores, los cuales presentan dos bandas de energía denominadas banda de valencia y banda de conducción respectivamente. Así, en las celdas fotovoltaicas, la energía necesaria para que el electrón más externo pase de la banda de valencia a la banda de conducción en el material, produciéndose así la electricidad, es proporcionada por la luz del sol [10].

Las celdas fotovoltaicas o células solares de base cristalina son las partes más importantes de los sistemas fotovoltaicos y están conformadas por un semiconductor en el cual está incorporada una unión PN, formándose en el lado positivo (N) y en lado negativo (P) de esta unión el voltaje dc [11]. Generalmente, el material semiconductor más usado para la fabricación de las celdas fotovoltaicas es el silicio, constituyendo estas el 90% del mercado mundial [10]. En la [Figura 2.3](#) se observa una celda fotovoltaica típica.

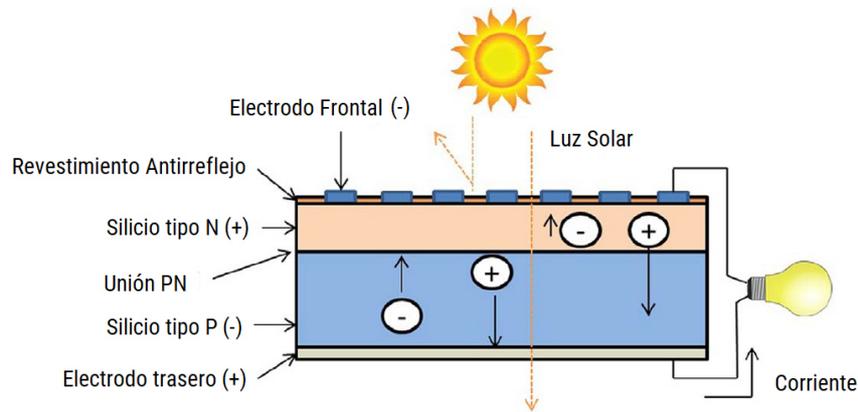


Figura 2.3. Celda Fotovoltaica Típica [10].

En la actualidad existen diferentes tecnologías para la fabricación de celdas fotovoltaicas, siendo el nivel de madurez comercial y la materia prima utilizada las que permiten clasificar dichas tecnologías en tres generaciones distintas [10], siendo estas:

- **Sistemas Fotovoltaicos de Primera Generación:** Emplean la tecnología del silicio cristalino, en su forma monocristalino y policristalino; siendo esta tecnología completamente comercial. Convierten aproximadamente el 11%–20% de la radiación solar en energía eléctrica [10].
- **Sistemas Fotovoltaicos de Segunda Generación:** Emplean tecnologías fotovoltaicas de películas delgadas. Entre estas tecnologías se incluyen el silicio amorfo, telururo de cadmio, seleniuro de cobre e indio, y seleniuro de galio, indio y cobre. Convierten aproximadamente el 5%–13% de la radiación solar en energía eléctrica [10].
- **Sistemas Fotovoltaicos de Tercera Generación:** Emplean tecnologías fotovoltaicas orgánicas, y se encuentran en fases de pruebas. Estas tecnologías no han sido ampliamente comercializadas [10].

En la [Figura 2.4](#) se presenta imágenes de celdas solares de acuerdo a la clasificación antes mencionada.

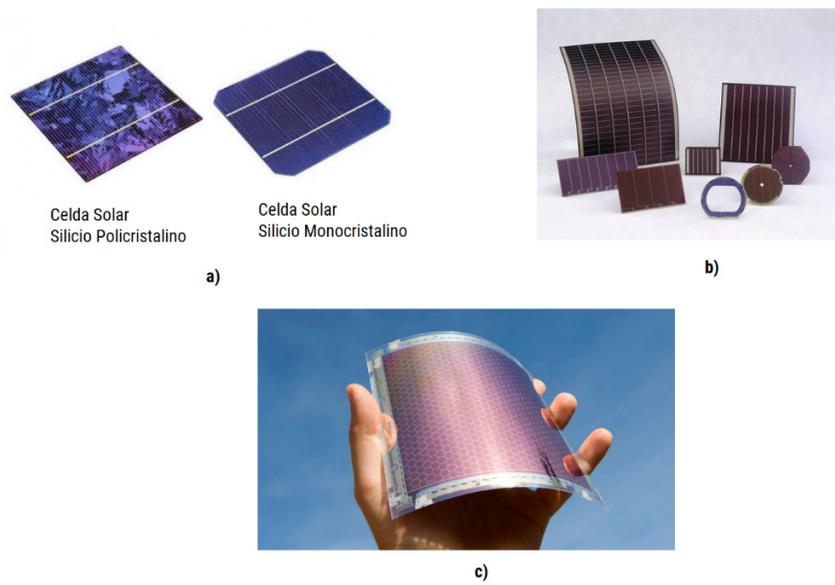


Figura 2.4. Celda Solar Fotovoltaicas a) monocristalina y policristalina [12], b) de película delgada de silicio amorfo [13] y c) orgánica [14].

2.2.3.2 Módulo, Panel, String, Subarray y Array

El voltaje producido por una celda fotovoltaica es generalmente menor a 1V, por lo cual las celdas se interconectan entre sí para producir voltajes más altos, los cuales son necesarios para la mayoría de aplicaciones prácticas. A la agrupación de celdas fotovoltaicas se le denomina módulo o panel fotovoltaico que generalmente incluyen 48, 54, 60 o 72 células solares [11].

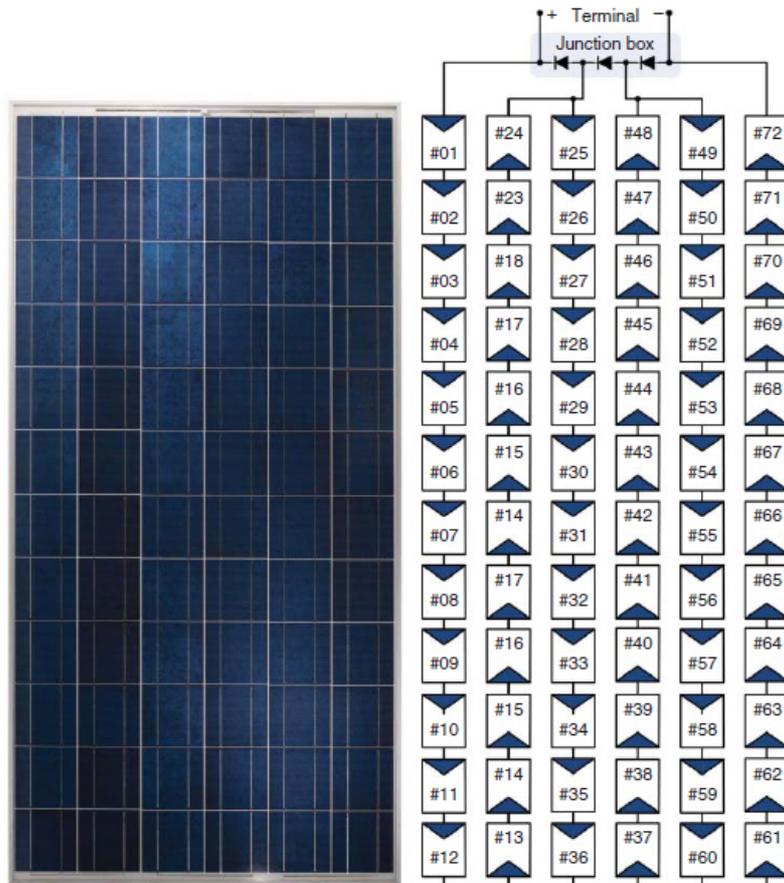


Figura 2.5. Panel Solar a) apariencia y b) configuración [11].

En la [Figura 2.5](#) se muestra un panel solar formado por 72 celdas fotovoltaicas conectadas en serie. De acuerdo con esa figura, se observa que el módulo fotovoltaico se divide en tres subconjuntos, denominados submódulos, de 24 células solares cada uno. Los diodos de derivación o diodos bypass conectados en paralelo con cada submódulo son componentes estándar de los paneles fotovoltaicos cristalinos, los cuales evitan daños en el módulo debido a imperfecciones o deterioros como los puntos calientes, en caso de que exista alguna falla en las celdas fotovoltaicas conectadas en serie (generación desequilibrada) [11].

La conexión de paneles solares en serie para aumentar el voltaje de salida se conoce como “string” o cadena fotovoltaica. Un “array” o matriz fotovoltaica consiste en la agrupación en paralelo de varias cadenas para aumentar la capacidad de corriente y por ende la capacidad de energía. Un “subarray” o submatriz hace referencia a un subconjunto de una matriz fotovoltaica de gran escala [11]. En la [Figura 2.6](#) se aprecia el orden jerárquico de la capacidad de energía de los componentes fotovoltaicos, desde la celda fotovoltaica hasta la matriz fotovoltaica.

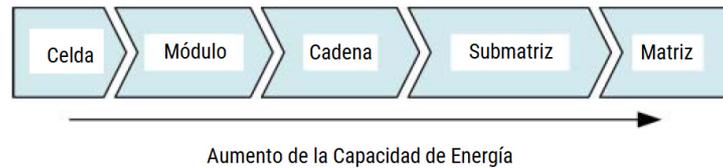


Figura 2.6. Capacidad de energía fotovoltaica desde la celda hasta la matriz fotovoltaica [11].

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 [11]. En la [Figura 2.7](#) se aprecia los diodos de bloqueo y los diodos de bypass en un circuito de generación fotovoltaico:

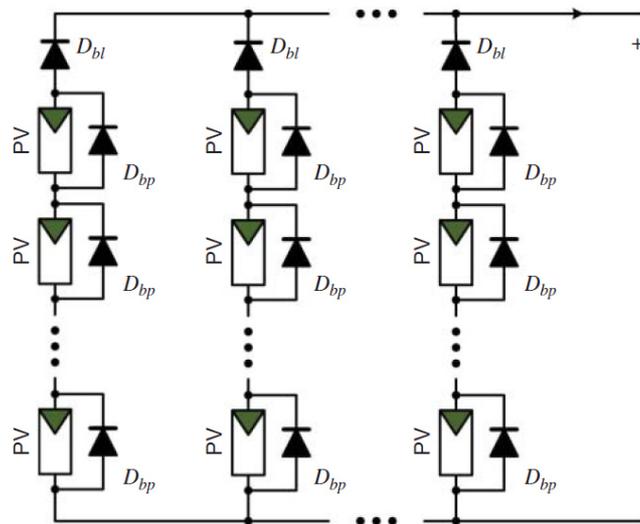


Figura 2.7. Diodos de bypass y diodos de bloque en un circuito fotovoltaico [11].

Los fusibles y disyuntores de corriente continua conectados en serie con cada cadena se han utilizado últimamente para proporcionar la protección necesaria a los circuitos debido a sus bajas pérdidas; y, combinando esto con la alta eficiencia de los sistemas fotovoltaicos actuales, el uso de los diodos de bloqueo se ha evitado [11].

2.2.3.3 Ventajas y Desventajas de la Energía Solar Fotovoltaica

En los últimos 20 años, la energía solar fotovoltaica ha tenido un crecimiento permanente y exponencial importante, siendo esta fuente de energía cada vez más común. Esto se debe principalmente a las grandes ventajas que presentan estos sistemas [11]; sin embargo, también presenta ciertas desventajas en cuanto a su utilización, por lo cual es necesario realizar un análisis cuidadoso



para su implementación [15]. En la [Tabla 2.1](#) se muestran las principales ventajas y desventajas de los sistemas que emplean la energía solar fotovoltaica.

Tabla 2.1. Ventajas y Desventajas de la Energía Solar Fotovoltaica [10] [11] [15]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Sistema Confiable	Limitaciones en cuanto a disponibilidad en el mercado
Bajo costo de operación y mantenimiento	
Fuente de energía gratuita	Alto costo inicial
Bajo mantenimiento	
Fuente de energía limpia y renovable	Área de instalación grande
Alta disponibilidad	
Generación cercana al consumidor	Dependencia del desarrollo tecnológico
No causa impactos ambientales	
Silencioso	Dependencia de las condiciones geográficas y ambientales (irradiación y temperatura)
Larga vida útil (> 20 años)	
No requiere se requiere de operadores	El almacenamiento de la energía aumenta los costos
Flexibilidad de construcción	
Disponibilidad de apoyo e incentivos para su implementación	Servicio técnico limitado en áreas remotas
Tiempo corto de instalación	

2.2.3.4 Modelos Matemáticos de un generador fotovoltaico

Existen varios modelos matemáticos que permiten reproducir el comportamiento de un sistema de generación fotovoltaico bajo distintas condiciones de temperatura e irradiación, difiriendo básicamente estos en cuanto a la precisión requerida por el usuario [11]. Así, un generador fotovoltaico se modela empleando un circuito equivalente y ecuaciones que lo describen. Generalmente, son dos los principales modelos empleados para modelar un generador fotovoltaico, siendo estos el modelo de diodo único y el modelo de doble diodo [16]. Estos circuitos equivalentes se muestran en la [Figura 2.8](#) y en la [Figura 2.9](#) respectivamente.

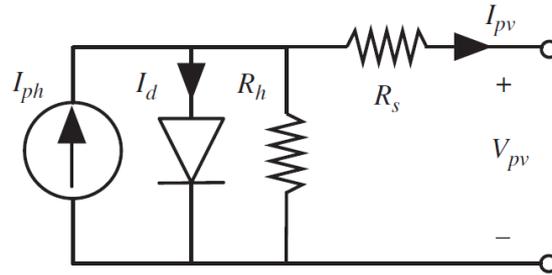


Figura 2.8. Circuito Equivalente Modelo de Diodo Único [16].

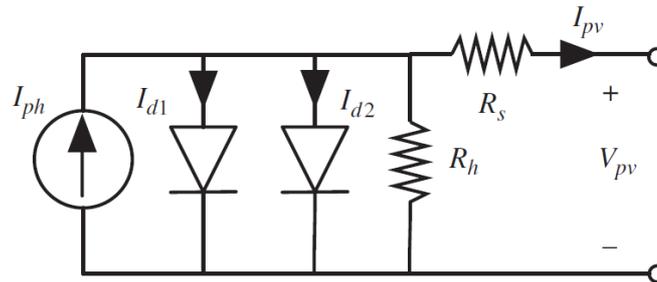


Figura 2.9. Circuito Equivalente Modelo de Doble Diodo [16].

Donde:

- I_{ph} : Corriente Fotovoltaica Fotoinducida [A]
- I_d : Corriente del Diodo [A]
- R_h : Resistencia Shunt o de derivación [Ω]
- R_s : Resistencia en serie [Ω]
- I_{pv} : Corriente Fotovoltaica en los terminales de salida [A]
- V_{pv} : Voltaje Fotovoltaico en los terminales de salida [V]

En el primer modelo se emplea un reducido número de parámetros, razón por la cual este modelo es el más utilizado (equilibrio simplicidad-precisión); en tanto que el segundo modelo es más preciso pero la identificación de los parámetros es más compleja [11] [16].

2.2.3.5 Modelo de Diodo Único

De acuerdo a la sección anterior, el modelo de diodo único es el más usado en la literatura para modelar generadores fotovoltaicos a base de silicio cristalino; sin embargo, este modelo no ofrece buenas precisiones a niveles bajos de irradiancia [16]. Empleando el circuito equivalente presentado



en la [Figura 2.8](#), la ecuación que describe las características corriente-voltaje de una celda fotovoltaica está dada por (2.1).

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_h} \quad (2.1)$$

La corriente del diodo está dada por la ecuación de Shockley, la cual se muestra en (2.2).

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{(V_{pv} + I_{pv}R_s) \cdot q}{k \cdot T_c \cdot A_n}} - 1 \right] \quad (2.2)$$

Donde:

- I_s : Corriente de saturación del diodo [A]
- q : Carga elemental del electrón [1.609x10-19 C]
- k : Constante de Boltzmann [1.38x10-23 J/C]
- T_c : Temperatura de la celda fotovoltaica [° K]
- A_n : Factor de Idealidad del Diodo

El voltaje térmico de la unión PN de la celda fotovoltaica viene dado por la ecuación (2.3).

$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad (2.3)$$

En base a lo anterior, se requiere identificar cinco parámetros desconocidos (I_{ph} , I_s , R_h , R_s , A_n) para representar la relación que existe entre I_{pv} y V_{pv} , razón por lo cual a este modelo también se lo conoce como el modelo de cinco parámetros [11]. Además, este modelo puede simplificarse al no considerar R_h , R_s o ambas resistencias, pero dichas simplificaciones generan ciertas inexactitudes a niveles de irradiancia elevados (al no considerar R_s) y en condiciones no coincidentes (al no considerar R_h) [16].

Los circuitos equivalentes de estos modelos se muestran en la [Figura 2.10](#).

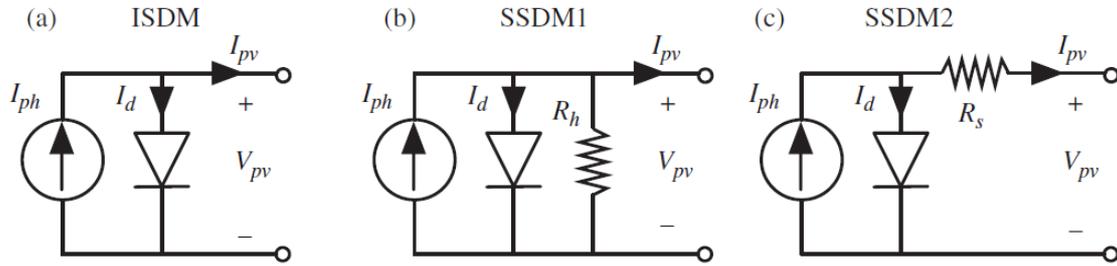


Figura 2.10. Circuito Equivalente a) Modelo Ideal de Diodo Único, b) Modelo de Diodo Único Simplificado 1 y c) Modelo de Diodo Único Simplificado 2 [16].

Así, para el modelo ideal de diodo único se considera $R_s = 0$ y $R_h = \infty$; para el modelo de diodo único simplificado 1 se considera $R_s = 0$ y para el modelo de diodo único simplificado 2 se considera $R_h = \infty$. Las ecuaciones (2.4), (2.5), (2.6), (2.7) y (2.8) describen las características corriente-voltaje de una celda fotovoltaica de los tres modelos antes mencionados.

- *Modelo Ideal de Diodo Único*

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (2.4)$$

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{V_{pv} \cdot q}{k \cdot T_c \cdot A_n}} - 1 \right] \quad (2.5)$$

- *Modelo de Diodo Único Simplificado 1*

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \frac{V_{pv}}{R_h} \quad (2.6)$$

I_d está dada por (2.5)

- *Modelo de Diodo Único Simplificado 2*

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (2.7)$$

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{(V_{pv} + I_{pv} R_s) \cdot q}{k \cdot T_c \cdot A_n}} - 1 \right] \quad (2.8)$$

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el modelo que se utilice debe ofrecer un equilibrio entre la simplicidad y la precisión requerida por el usuario; ya que, la parametrización y simulación de un modelo más complejo requiere una mayor cantidad de datos y una mayor potencia de cálculo. El modelo ideal de Diodo único es el más sencillo debido a la simplicidad que ofrece para la identificación de parámetros, así como también para la simulación del modelo. El segundo modelo en cuanto a simplicidad es el modelo de diodo único simplificado 1, seguido por el modelo de diodo único simplificado 2 y finalmente, el modelo más complejo es el modelo de diodo único completo [11].

Además, en [11] se presenta las maneras de calcular cada uno de los parámetros de los modelos antes mencionado, así como también las respectivas correcciones a valores de temperatura e irradiancia distintos.

2.2.3.6 Características de los Celdas Solares Fotovoltaicas

Las características a la salida de una celda solar fotovoltaica se representan por las curvas corriente-voltaje (curvas I-V) y por las curvas potencia-voltaje (curvas P-V). Otras curvas que se usan para representar dichas características son las curvas voltaje-corriente (V-I) y las curvas potencia-corriente (P-I), aunque estas se utilizan en casos especiales [11]. En la [Figura 2.11](#) se presenta las curvas I-V y P-V típicas de una celda solar para una irradiancia y temperatura determinada.

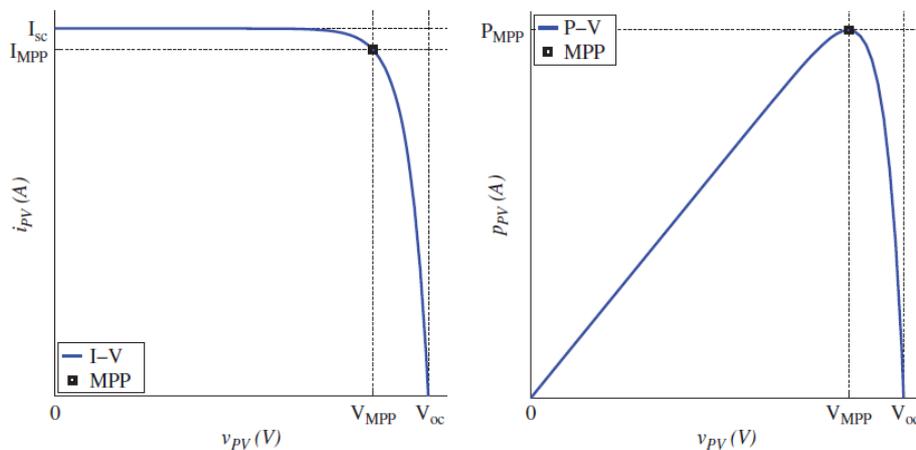


Figura 2.11. Curvas I-V y P-V típicas de una celda solar [11].

Como se puede apreciar en la [Figura 2.11](#), existen ciertos puntos y valores importantes en las curvas I-V y P-V de una celda solar fotovoltaica. En la [Tabla 2.2](#) se presenta la descripción de dichos puntos y valores.

Tabla 2.2. Significado de los Puntos y Valores importantes de las curvas I-V y P-V

Símbolo	Significado
I_{sc}	El punto de cortocircuito (I_{sc}) es el punto en el cual los terminales de la celda fotovoltaica están en cortocircuito, por lo que el voltaje es cero.
V_{oc}	El punto de voltaje de circuito abierto (V_{oc}) es el punto en el cual los terminales de la celda fotovoltaica están en circuito abierto, por lo que la corriente es cero.



M_{pp}	El punto de máxima potencia (M_{pp}) es el punto en el cual se tiene la máxima potencia eléctrica (P_{mpp}) que la celda fotovoltaica puede generar bajo ciertas condiciones ambientales.
V_{mpp}	Es el voltaje medido en M_{pp} .
I_{mpp}	Es la corriente medida en M_{pp} .
P_{mpp}	Es el valor de potencia más alto y se calcula como $P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp}$

En la curva P-V se puede apreciar claramente el punto de máxima potencia (M_{pp}), en tanto que en curva I-V el punto M_{pp} se encuentra en la “rodilla” de la curva, siendo (V_{mpp}, I_{mpp}) las coordenadas del punto. El valor de voltaje más alto del generador fotovoltaico es el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y el valor de corriente más alta es la corriente de cortocircuito (I_{sc}). Se observa claramente que la potencia a la salida de la celda solar fotovoltaica es cero en las condiciones de circuito abierto y de cortocircuito [11].

La forma de las curvas depende del tipo de tecnología de las celdas fotovoltaicas y del proceso de fabricación [11]. Además, estas curvas se pueden usar también para representar las características a la salida de módulos, cadenas y matrices fotovoltaicas. En la siguiente sección se abordará con mayor amplitud el estudio de estas curvas.

2.3 Análisis de las curvas I–V

2.3.1 Definición de las curvas I–V

Las curvas corriente-voltaje o curvas I-V permiten conocer la relación entre la corriente y el voltaje a la salida de una celda, módulo, cadena o matriz fotovoltaica de tal modo que permiten comprender a detalle su capacidad y la eficiencia en la conversión de energía solar en energía eléctrica. Así, las curvas I-V son esencialmente una representación gráfica del funcionamiento de un generador fotovoltaico puesto que contienen todos sus posibles puntos de operación, cuyo intervalo va desde la corriente de cortocircuito hasta el voltaje de circuito abierto [17]; esto en condiciones existentes de temperatura e irradiancia. Además, las curvas I-V brindan información muy importante para evaluar el rendimiento del generador fotovoltaico en lo que respecta a la producción de energía, la degradación del dispositivo y los efectos causados por el envejecimiento [3].

2.3.2 Curvas I-V de celdas, módulos y matrices fotovoltaicas

Existen dos tipos de interconexiones entre las celdas fotovoltaicas: serie y paralelo. Cuando las celdas se conectan en serie el voltaje se incrementa y la corriente permanece constante; en tanto que cuando las celdas se conectan en paralelo el voltaje permanece constante mientras que la corriente se incrementa [18]. Las curvas I-V correspondientes para los dos tipos de conexión antes mencionado se aprecian en la [Figura 2.12](#).

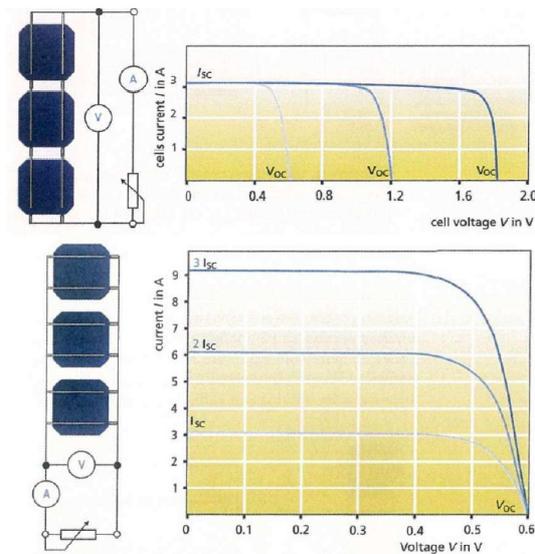


Figura 2.12. Curvas I-V de a) 3 celdas conectadas en serie y b) 3 celdas conectadas en paralelo [18].

De igual manera que el caso anterior, los módulos fotovoltaicos pueden conectarse en serie y en paralelo y las curvas I-V correspondientes dependerán del tipo de conexión. Además, las curvas I-V de los módulos fotovoltaicos son una versión escalonada de las curvas I-V de las celdas fotovoltaicas que lo conforman. Las curvas I-V correspondientes de la conexión en serie y en paralelo de tres módulos fotovoltaicos se presentan en la [Figura 2.13](#).

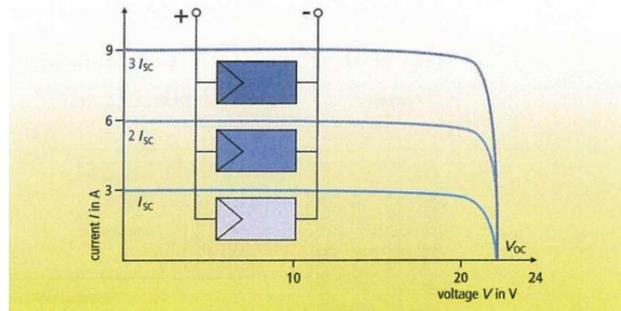
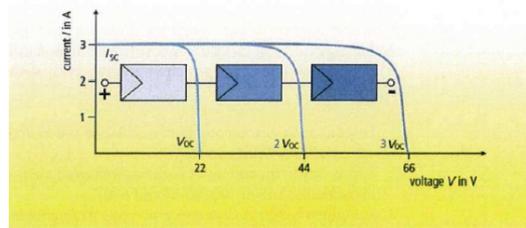


Figura 2.13. Curvas I-V de a) 3 módulos conectados en serie y b) 3 módulos conectados en paralelo [18].

Finalmente, una matriz fotovoltaica consiste de la agrupación en serie y en paralelo de módulos fotovoltaicos, los cuales a su vez están formados por celdas fotovoltaicas, por lo cual la curva I-V de una matriz fotovoltaica es una versión amplificadora de la curva I-V de un módulo o de una celda solar fotovoltaica. Dicho de otro modo, la curva I-V de un módulo fotovoltaico se puede escalar para obtener la curva I-V de una matriz solar fotovoltaica, en donde el voltaje de la curva I-V de la matriz fotovoltaica se escala de acuerdo con el número de módulos conectados en serie y la corriente se escala de acuerdo con el número de cadenas conectadas en paralelo. El punto de máxima potencia se escala de acuerdo con el producto de las celdas conectadas en serie y del número de cadenas conectadas en paralelo [19].

La curva I-V de una matriz fotovoltaica se aprecia en la [Figura 2.14](#), en donde la matriz está conformada por la conexión en paralelo de tres cadenas, cada una de las cuales está formada por la conexión de tres módulos en serie.

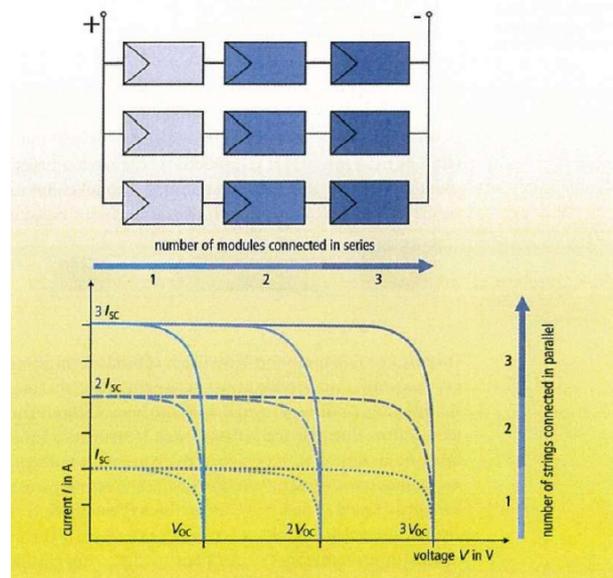


Figura 2.14. Escalado de una curva I-V de una celda fotovoltaica a una matriz fotovoltaica [18].

2.3.3 Condiciones estándar de medida o STC

Las características I-V y los parámetros importantes de los módulos fotovoltaicos se especifican bajo ciertas condiciones ambientales determinadas denominadas condiciones estándar de medida o STC [3]. Bajo estas condiciones uniformes las distintas celdas o módulos fotovoltaicos se evalúan en cuanto a capacidad energética y eficiencia [11]. En la [Tabla 2.3](#) se especifica las condiciones estándar de medida:

Tabla 2.3. Condiciones Estándar de Medida STC [18]

STC
Irradiancia Solar 1000 W/m ²
Temperatura del Dispositivo 25 °C (tolerancia ± 2°C)
Espectro de Luz definido con una masa de aire AM = 1.5

2.3.4 Variación de las curvas I-V debido a la Temperatura e Irradiancia

Un sistema fotovoltaico opera bajo condiciones de temperatura y de irradiancia que varían constantemente por lo cual estas difícilmente coinciden con las condiciones estándar de medida. Las características de corriente y voltaje a la salida de una celda o un módulo fotovoltaico pueden reflejarse



mediante las curvas I-V correspondientes, que a su vez dependen de las condiciones de irradiancia y temperatura a las cuales se encuentre operando la celda o modulo fotovoltaico [18].

A menudo se considera que la temperatura es constante en relación a la variación de irradiancia, esto debido a que las variaciones de temperatura a lo largo del día generalmente son mucho más lentas que las de irradiancia. Así, para aplicaciones fotovoltaicas estacionarias la pendiente de irradiancia es usualmente de $30 \text{ W/m}^2/\text{s}$ [20].

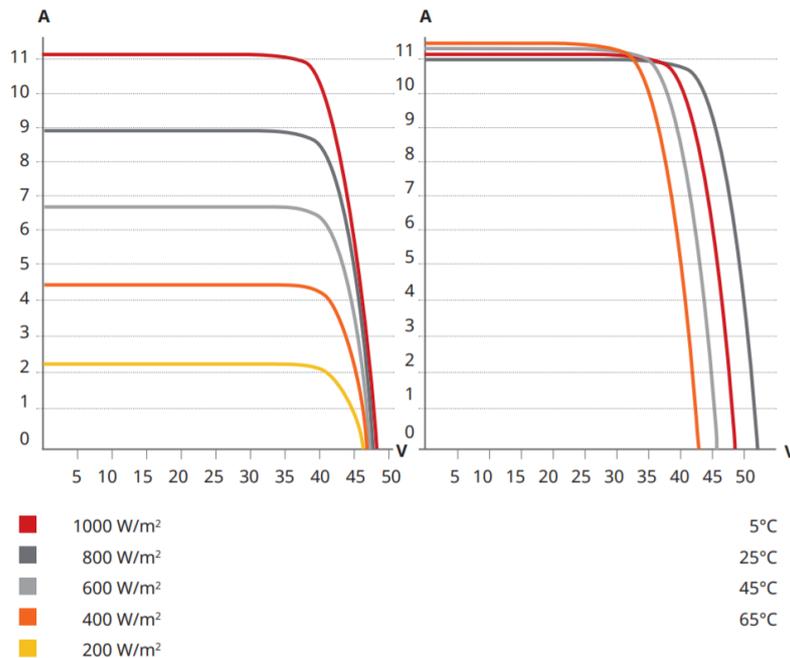


Figura 2.15. Conjunto de curvas I-V del módulo fotovoltaico CS3W-420P [21].

Por ejemplo, en la [Figura 2.15](#) se presenta las curvas I-V correspondientes al módulo fotovoltaico CS3W-420P de la marca CanadianSolar. En dicha figura se presenta dos conjuntos de curvas I-V, el primer conjunto corresponde a las curvas I-V bajo condiciones de temperatura constante e irradiancia variable y el segundo conjunto corresponde a las curvas bajo condiciones de irradiancia constante y temperatura variable.

En base a la [Figura 2.15](#), se observa los efectos que tienen la irradiancia y la temperatura en las curvas I-V, así:

- La irradiancia tiene un efecto significativo en la corriente del módulo fotovoltaico, puesto que esta última es directamente dependiente de la irradiancia. En cuanto al voltaje de circuito abierto, se aprecia que no existen grandes variaciones debido a la irradiancia.



- La temperatura afecta principalmente al voltaje del módulo fotovoltaico. A temperaturas bajas se obtienen mayores voltajes y por ende a temperaturas más elevadas el voltaje disminuye. En cuanto a la corriente, se aprecia que las variaciones debidas a la temperatura son pequeñas, produciéndose ligeros aumentos al elevar la temperatura.

A temperaturas bajas ocurre un problema relacionado específicamente con la luz solar, ya que esta tiende a generar calor por lo cual afecta a la producción de energía. Sin embargo, a pesar de aquello, es mejor que el sistema fotovoltaico opere en un día soleado caliente que en un día oscuro frío, puesto la pérdida de voltaje ocasionada debido a la producción de calor se compensa con el aumento de la luz solar. Así pues, se recomienda que los generadores fotovoltaicos se instalen en lugares que tengan una adecuada ventilación de tal manera que esta permita disipar el calor de manera fácil [22].

2.3.5 Especificaciones técnicas de una de una celda o módulo fotovoltaico

Para analizar el rendimiento de los módulos fotovoltaicos es necesario comparar las curvas I-V obtenidas con respecto a una curva I-V estándar, de tal manera que las desviaciones que existen entre ambas curvas puedan ser examinadas. Dicha curva estándar es obtenida mediante un modelo matemático que cuantifica la curva bajo distintas condiciones de temperatura e irradiancia [3]. Los modelos que se emplean se describen en la [sección 2.2.3.4](#).

Las especificaciones técnicas están reflejadas mediante la hoja de datos de un módulo fotovoltaico provista por el fabricante, la cual contiene información relevante para poder realizar el análisis de las curvas I-V, puesto que permite identificar los valores de los parámetros del modelo empleado. Así, las características a la salida del modelo deben coincidir con los datos presentados en la hoja de datos que generalmente se brindan en STC [11]. La información proporcionada en la hoja de datos, dada en STC, incluye los siguientes valores:

- Corriente de cortocircuito I_{sc}
- Voltaje de circuito abierto V_{oc}
- Corriente en el punto de máxima potencia I_{mpp}
- Voltaje en el punto de máxima potencia V_{mpp}
- Potencia nominal del módulo, la cual es el valor de potencia máxima del módulo P_{mpp}

Generalmente en la hoja de datos también se incluye los coeficientes de temperatura α , β y γ , y el rango de temperatura de funcionamiento del módulo fotovoltaico. Los símbolos α , β y γ son los coeficientes de temperatura para la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto y la potencia máxima respectivamente. Estos coeficientes permiten la corrección de las características eléctricas del módulo fotovoltaico a cualquier temperatura [11]. Además, en las hojas de datos de los



módulos fotovoltaicos se adjuntan las curvas I-V para distintos valores de irradiancia y temperatura, tales como las mostradas en la [Figura 2.15](#), e información adicional relevante en cuanto a las especificaciones eléctricas y mecánicas del módulo. A manera de ejemplo, en la [Tabla 2.4](#) se muestra las especificaciones del módulo fotovoltaico CS3W-425P.

Tabla 2.4. Especificaciones del módulo fotovoltaico CS3W-425P [21]

Información Básica					
<i>Modelo</i>	<i>Tipo de Celda</i>	<i>Dimensiones</i>			
CS3W-425P	Policristalino	2108 X1048 X40 mm			
Características Eléctricas en STC					
I_{SC}	V_{OC}	I_{MPP}	V_{MPP}	P_{MPP}	<i>Eficiencia</i>
11.29 A	48.2 V	10.71 A	39.7 V	425 W	19.2 %
Características Térmicas					
α	β		γ		
0.05 % / °C	-0.28 % / °C		-0.36 % / °C		

2.3.6 Normativas Internacionales

Existen varias normativas internacionales dadas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en cuanto a sistemas de energía fotovoltaicos. Entre esas normativas existen algunas que guardan relación justamente con las curvas I-V, así:

- IEC 60904-1: 2006: En esta normativa se describe los procedimientos para la medición de la curva I-V de los dispositivos fotovoltaicos en distintas condiciones, así como también los requisitos generales de medición [23].
- IEC 60891: 2009: En esta normativa se define los procedimientos empleados para la corrección de temperatura e irradiancia de las curvas características corriente-voltaje [24].
- IEC 62446-1: En esta normativa se define la documentación que deberá ser proporcionada al cliente una vez que se haya instalado un sistema fotovoltaico conectado a la red, así como también los requisitos para la realización de ensayos y para el mantenimiento del sistema [25]. Además, en el anexo D de esta normativa se presenta la interpretación de las variaciones en la forma de las curvas I-V.



2.3.7 Corrección de Temperatura e Irradiancia a STC según la norma IEC 60891:2009

Como se mencionó anteriormente, las características corriente-voltaje obtenidas a la salida de un módulo fotovoltaico deben compararse con respecto a una curva estándar. Existen dos diferentes enfoques para aquello, el primero consiste en comparar la curva I-V medida con respecto a una curva I-V obtenida mediante un modelo matemático. El otro enfoque consiste en realizar la traslación de la curva I-V medida a valores de temperatura e irradiancia nominales de tal manera que pueda compararse con la curva I-V estándar, que generalmente viene dada en STC; es decir se necesita que la curva obtenida este corregida a STC.

En la norma IEC 60891:2009 se define tres procedimientos para realizar la corrección de temperatura e irradiancia de las curvas I-V medidas bajo distintas condiciones. Para la aplicación de esta norma, todas las mediciones de las curvas I-V deben realizarse de acuerdo a los procedimientos establecidos en la normativa IEC 60904-1 [24].

El primer procedimiento empleado para la corrección es principalmente un método de translación empírico, en tanto que el segundo procedimiento emplea el modelo matemático simplificado de un diodo, por lo cual se lo considera un método semiempírico [26]. Tanto para la aplicación del primer y segundo procedimiento es necesario conocer los parámetros de corrección del dispositivo fotovoltaico [24]. Estos parámetros de corrección incluyen los coeficientes de temperatura α y β antes descritos, los cuales se relacionan con las variaciones ocasionadas por la temperatura, en la corriente de cortocircuito y en el voltaje de circuito abierto del dispositivo respectivamente. Los otros parámetros empleados se denominan R_S , κ y a , siendo este último empleado únicamente para el segundo procedimiento. Los parámetros R_S y κ hacen referencia a la resistencia interna del dispositivo y al factor de corrección de la curva respectivamente, y toman en cuenta los cambios en la forma de la curva I-V ocasionados debido a las condiciones distintas de irradiancia y temperatura. El parámetro a es el factor de corrección de la irradiancia y guarda relación con el número de celdas conectadas en serie en el respectivo módulo y con el voltaje térmico del diodo [26]. Además, acorde con [24] y [26] el segundo procedimiento produce mejores resultados que el primer procedimiento, ya que permite obtener mejores estimaciones en la “rodilla” de la curva I-V (punto de máxima potencia) y es más efectivo cuando se tienen que hacer correcciones en irradiancia grandes (>20%). Si alguno de los parámetros anteriores no es conocido, en la misma norma se establece los métodos para calcularlos.

El tercer procedimiento hace referencia a un método de interpolación entre dos o más curvas I-V previamente medidas, las cuales cubren todo el rango de corrección de temperatura e irradiancia deseado. Para este procedimiento no se necesita ningún parámetro de ajuste y la corrección se realiza interpolando las características I-V a una condición distinta basada en una constante, la cual se relaciona con la temperatura e irradiancia [24].



Las ecuaciones correspondientes para la corrección en temperatura e irradiancia de las curvas I-V se presentan a continuación, así como también un método para calcular el valor de la irradiancia, denominada G , a la cual se realiza el ensayo [24]:

Irradiancia

El valor de la irradiancia G viene dado por la ecuación (2.9).

$$G = \frac{1000 \text{ Wm}^{-2} \cdot I_{RC}}{I_{RC,STC}} \cdot [1 - \alpha_{RC} \cdot (T_{RC} - 25^{\circ}\text{C})] \quad (10) \quad (2.9)$$

Donde:

- G : Valor de irradiancia calculada en Wm^{-2} .
- I_{RC} : Corriente de cortocircuito del dispositivo fotovoltaico medida.
- $I_{RC,STC}$: Corriente de cortocircuito del dispositivo fotovoltaico dada en STC.
- α_{RC} : Coeficiente de temperatura para la corriente de cortocircuito en STC.
- T_{RC} : Temperatura del dispositivo fotovoltaico medida en $^{\circ}\text{C}$.

Primer Procedimiento

Las ecuaciones empleadas para la corrección de las características corriente-voltaje obtenidas en el ensayo a valores en STC u otros valores de temperatura e irradiancia vienen dadas por (2.10) y (2.11).

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.10)$$

$$V_2 = V_1 - R_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.11)$$

Donde:

- I_1, V_1 : Coordenadas de puntos en la curva I-V medida.
- I_2, V_2 : Coordenadas de puntos en la curva I-V corregida.
- G_1 : Valor de la irradiancia medida.
- G_2 : Valor de la irradiancia en STC o en otra condición deseada.
- T_1 : Temperatura medida del dispositivo fotovoltaico.



- T_2 : Temperatura en STC o en otra condición deseada.
- I_{sc} : Corriente de cortocircuito del dispositivo fotovoltaico medida en G_1 y T_1 .
- α : Coeficiente de temperatura para la corriente de cortocircuito en STC o en otra condición de irradiancia deseada.
- β : Coeficiente de temperatura para el voltaje de circuito abierto en STC o en otra condición de irradiancia deseada.
- R_S : Resistencia interna del dispositivo fotovoltaico bajo prueba.
- κ : Factor de corrección de la curva.

Segundo Procedimiento

El segundo procedimiento mostrado en la norma IEC 60891:2009 se basa en el modelo simplificado de diodo único, siendo este un método semiempírico para la corrección de las características corriente-voltaje obtenidas en el ensayo a valores en STC u otros valores de temperatura e irradiancia. Este procedimiento emplea cinco parámetros de corrección, y las ecuaciones empleadas vienen dadas por (2.12) y (2.13).

$$I_2 = I_1 \cdot [1 + \alpha_{rel} \cdot (T_2 - T_1)] \cdot \frac{G_2}{G_1} \quad (2.12)$$

$$V_2 = V_1 + V_{OC1} \cdot \left[\beta_{rel} \cdot (T_2 - T_1) + a \cdot \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) \right] - R'_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa' \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.13)$$

Donde:

- I_1, V_1 : Coordenadas de puntos en la curva I-V medida.
- I_2, V_2 : Coordenadas de puntos en la curva I-V corregida.
- G_1 : Valor de la irradiancia medida.
- G_2 : Valor de la irradiancia en STC o en otra condición deseada.
- T_1 : Temperatura medida del dispositivo fotovoltaico.
- T_2 : Temperatura en STC o en otra condición deseada.
- V_{OC1} : Voltaje de circuito abierto del dispositivo fotovoltaico medido en G_1 y T_1 .
- α : Coeficiente de temperatura para la corriente de cortocircuito en STC.



- β : Coeficiente de temperatura para el voltaje de circuito abierto en STC.
- a : Factor de corrección de la irradiancia para el voltaje de circuito abierto.
- R'_S : Resistencia interna del dispositivo fotovoltaico bajo prueba.
- κ' : Factor de corrección de la curva que se interpreta como el coeficiente de temperatura de R'_S .

Tercer Procedimiento

En este procedimiento, para la corrección de las características corriente-voltaje obtenidas en el ensayo a valores en STC u otros valores de temperatura e irradiancia, no se emplea parámetros de ajuste o parámetros de corrección, siendo las ecuaciones empleadas la (2.14) y (2.15).

$$I_3 = I_1 + a \cdot (I_2 - I_1) \quad (2.14)$$

$$V_3 = V_1 + a \cdot (V_2 - V_1) \quad (2.15)$$

Donde:

- I_1, V_1 : Coordenadas de puntos en la curva I-V medida en G_1 y T_1 .
- I_2, V_2 : Coordenadas de puntos en la curva I-V medida en G_2 y T_2 .
- I_3, V_3 : Coordenadas de puntos en la curva I-V corregida a G_3 y T_3 .
- a : Contante de interpolación.

Los valores de (I_1, V_1) y de (I_2, V_2) deben escogerse de tal forma que se satisfaga la siguiente relación:

$$I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1} \quad (2.16)$$

Donde:

- I_{SC2}, I_{SC1} : Corrientes de cortocircuito medidas en G_2, T_2 y en G_1, T_1 respectivamente.

La constante de interpolación a guarda relación con la temperatura e irradiancia, así:

$$a = \frac{G_3 - G_1}{G_2 - G_1} = \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1} \quad (2.17)$$



2.3.8 Desviaciones de la curva I-V de acuerdo a la norma IEC 62446-1

Las tres partes que conforman una curva I-V normal, la cual presenta una forma fluida, sin escalones y con una tendencia suave [25], guardan relación con la división de la curva I-V en tres diferentes regiones, en función de la pendiente de la curva, mencionadas en [3]. Esas tres partes claramente diferenciadas son las siguientes [25]:

- **Región de fuente de corriente:** En esta zona la curva presenta una forma horizontal, con una tendencia ligeramente descendente.
- **Región de fuente de voltaje:** En esta zona la curva presenta una forma casi vertical.
- **Región de fuente de potencia:** En esta zona se encuentra la curvatura de la curva, la cual se ubica entre las dos regiones antes mencionadas. A esta zona también se le denomina “rodilla” o “codo” de la curva.

En la [Figura 2.16](#) se pueden apreciar las tres regiones antes mencionadas:

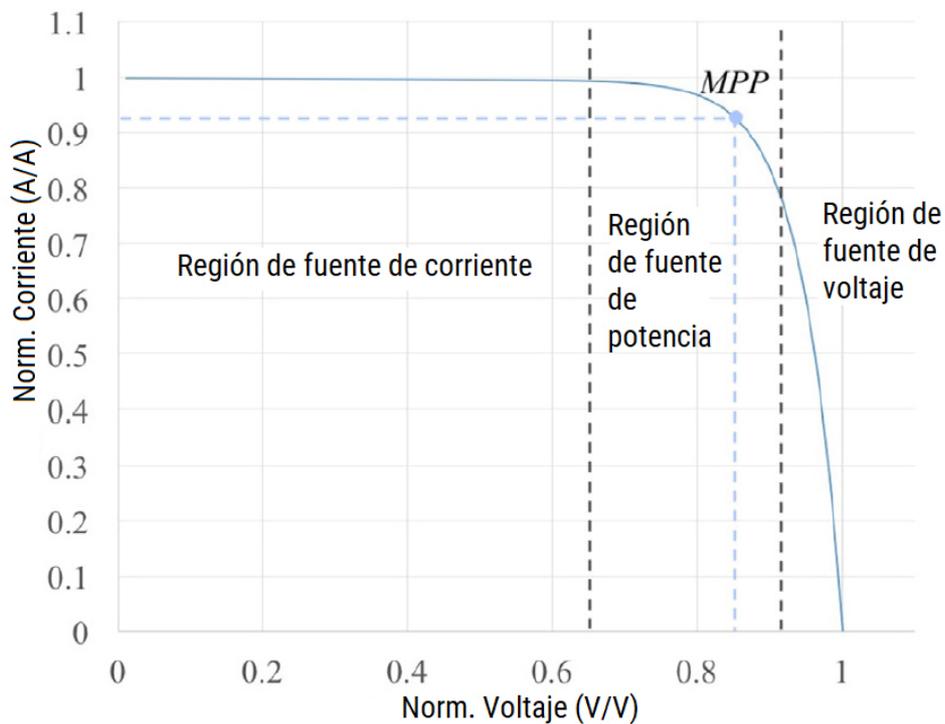


Figura 2.16. Tres regiones en la curva I-V [3].

Si la curva I-V presenta alguna variación en su forma con respecto a la curva estándar, puede deberse a la presencia de algún defecto, como por ejemplo celdas dañadas, sombreado local, incremento de la resistencia en serie y de derivación, puntos calientes o PID, entre otras. Así, analizar la forma de la

curva I-V es de gran importancia puesto que proporciona información relevante para analizar las deficiencias en los dispositivos fotovoltaicos [3]. En el anexo D de la norma IEC 62446-1 se presenta una clasificación de las seis variaciones en la forma de la curva I-V que pueden estar presentes, las cuales se pueden apreciar en la Figura 2.17, donde dichas variaciones tienen más de una causa posible, y pueden estar presentes ya sea en forma individual o en conjunto [25].

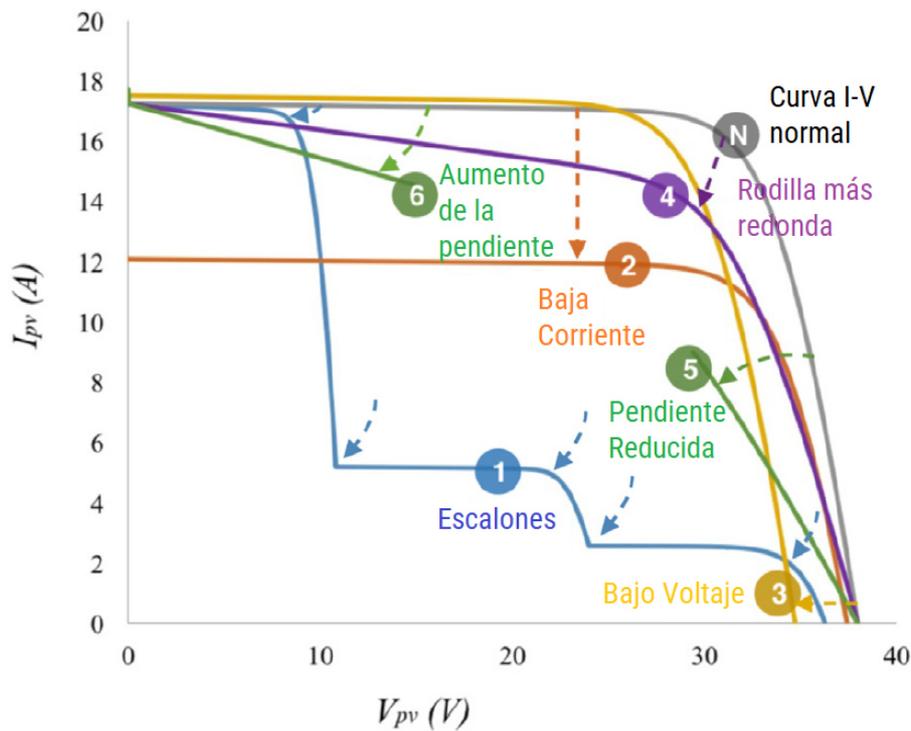


Figura 2.17. Variaciones en la forma de la curva I-V de acuerdo a la norma IEC 62446-1 [3].

Es importante mencionar que pequeñas desviaciones entre la curva I-V ideal y la curva I-V medida pueden estar presentes, esto debido a las incertidumbres asociadas a la medición y a las variaciones que existen entre los módulos, incluso siendo estos del mismo modelo y del mismo fabricante [25].

De igual manera, pueden existir desviaciones en la forma de la curva I-V ocasionadas por emplear modelos incorrectos, errores en las conexiones de medición o errores en la configuración de los instrumentos de prueba [19]. Por lo tanto, al observar desviaciones en la forma de la curva I-V se debe comprobar que estas no sean debido a los errores antes mencionados.

2.3.8.1 Variación 1 – Presencia de escalones o cortes en curva I-V

Las variaciones de forma de escalones en una curva I-V, indican que los módulos fotovoltaicos no están operando en condiciones homogéneas, lo que ocasiona que los diodos de bypass se activen [25], permitiendo una circulación de corriente alrededor de las celdas menos iluminadas o las celdas más débiles [27]. Esta variación puede ser ocasionada debido a las siguientes causas [25]:

- *Una parte del módulo está sombreada, sucia u oscurecida.*

Si una celda se encuentra sombreada, su capacidad de corriente disminuye y, por ende, la capacidad de corriente de toda la cadena de celdas. Entonces, si la corriente de operación del circuito excede a la capacidad de dicha cadena, el diodo de bypass se activará para evitar fallas en puntos calientes en la celda sombreada a causa de la polarización inversa. El número de escalones y su ancho varían según la extensión y densidad del sombreado. Es conveniente solucionar estos problemas para evitar dificultades en la evaluación del rendimiento del circuito de generación [27].

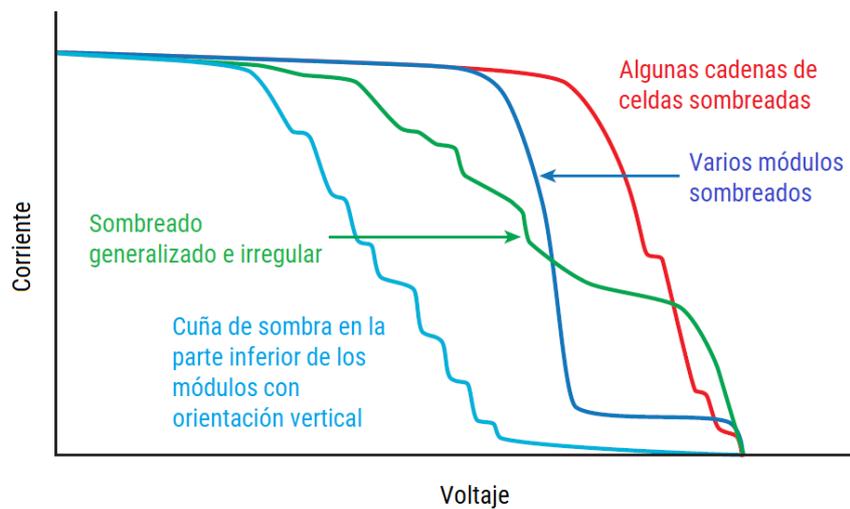


Figura 2.18. Diferentes tipos de escalonado en las curvas I-V [27].

En la [Figura 2.18](#) se muestran varias curvas I-V con distintos tipos de escalonados. El escalonado de la curva roja se debe a un sombreado puntual en algunas cadenas de celdas. El escalonado de la curva azul puede ser ocasionado cuando varios módulos se encuentran sombreados. El escalonado de la curva verde es típica del sombreado o suciedad irregular extendida a lo largo del circuito fuente. El escalonado celeste es característica de un sombreado en forma de cuña que se extiende desde la parte inferior de varios módulos orientados en posición vertical [27].

- *Daño en alguna celda fotovoltaica.*

Una de las causas más comunes del escalonado en las curvas I-V son las celdas fotovoltaicas agrietadas. Una grieta puede ocasionar que una parte de la celda se encuentre aislada eléctricamente. Esto ocasiona un fenómeno similar al sombreado o suciedad localizado en una celda normal. Entonces, dependiendo del grado de daño en la celda fotovoltaica puede producirse una curva I-V escalonada [19].



- *El diodo de bypass se encuentra cortocircuitado.*

Generalmente, el ancho de la curva I-V se ve reducido al estar cortocircuitado el diodo de bypass; esto se profundizará al analizar la variación 3 (Bajo voltaje). Sin embargo, la presencia de escalones en la curva I-V de un sistema fotovoltaico, con 2 o más cadenas en paralelo, puede indicar un desajuste de voltaje ocasionado porque el diodo de bypass se encuentra cortocircuitado [27].

2.3.8.2 Variación 2 – La curva I-V medida, muestra un valor de I_{SC} menor que la prevista

La baja corriente en la medición de la curva I-V puede deberse a [25]:

- *Capa de suciedad homogénea*

La presencia de una capa de suciedad homogénea causa que la corriente medida sea menor a la esperada, Esto debido a que la irradiancia que llega a las celdas no es la misma que la medida por el sensor; en otras palabras, hay una reducción de la irradiancia real [19].

- *Condiciones puntuales de sombreado o suciedad no homogéneas*

Ciertas condiciones no uniformes de sombreado o de suciedad en el módulo pueden provocar esta desviación, como por ejemplo el sombreado homogéneo de una o más filas en un módulo en posición vertical o la banda de suciedad uniforme que se crea generalmente en la parte inferior de los módulos con poca inclinación ($<5^\circ$) [27].

- *Degradación de los Módulos*

La degradación de los módulos fotovoltaicos, ocasionada por el paso del tiempo y por el estrés ambiental, puede derivar en este tipo de desviación [19]. El proceso de degradación es generalmente lento y puede presentarse como una delaminación o un descoloramiento del encapsulante [27].

- *Problemas en el modelado*

Errores en el modelado pueden ocasionar que la altura de la curva I-V obtenida sea mayor o menor a la del modelo. Estos errores pueden ser la introducción errónea de los datos del módulo o del número de cadenas en paralelo [25].

- *Problemas causados en la medición de la irradiancia.*

La irradiancia se relaciona con la corriente del módulo, por lo cual una falla en la medición de esta ocasionará que se produzca este tipo de desviación en la forma de la curva I-V. Entre



dichas fallas se encuentran errores relacionados a la calibración y medición, errores en el montaje del sensor, efecto albedo, irradiancia muy baja y variación de valor de irradiancia al momento de obtener la curva [25].

2.3.8.3 Variación 3 – La curva I-V medida, muestra un valor de V_{OC} menor que el previsto

El bajo voltaje obtenido en la medición de la curva I-V puede deberse a [25]:

- *Diodo de bypass cortocircuitado o en estado de conducción.*

Algunas fallas pueden causar que uno o varios diodos de bypass se encuentren en estado de conducción, aun en ausencia de sombra u homogeneidad, o cortocircuitados. Ante esta situación la forma general de la curva I-V será correcta, aunque el voltaje de circuito abierto del módulo será más bajo que lo previsto en el modelo. Se debe prestar especial atención en caso de que la reducción del voltaje de circuito abierto sea aproximadamente igual a un múltiplo del voltaje de circuito abierto de una cadena de celdas [19]. Este tipo de desviación es muy habitual. Algunas de las causas que provocan el daño de los diodos son los transitorios eléctricos, las tensiones eléctricas y térmicas, y el dimensionamiento inadecuado de los mismos [27].

- *Cadena fotovoltaica con un número incorrecto de módulos.*

Si al momento de cablear la cadena fotovoltaica se omite uno o más módulos, la curva I-V obtenida no coincidirá con la curva modelada en lo que respecta al voltaje. Esta desviación es fácil de identificar, ya que el voltaje de circuito abierto obtenido será mucho menor que el del modelo [19].

- *Un sombreado considerable y homogéneo sobre toda la celda, modulo o cadena fotovoltaica.*

Si la celda o el módulo fotovoltaico se encuentran bajo circunstancias de un gran sombreado uniforme, el diodo de derivación se activará, ocasionando que el voltaje obtenido sea menor al esperado. Esta condición es similar a la variación 1 (escalonado de la curva), sin embargo, el escalonado puede ser difícil de diferenciar debido al bajo valor de corriente en el que se produce [19].

- *Degradación Inducida por Potencial (PID).*

La degradación inducida por potencial (PID) puede ser la causa de la disminución del voltaje de circuito abierto. PID es el producto de reacciones electroquímicas producidas por voltaje en un electrolito (agua e iones metálicos). Inicialmente, la PID ocasiona una disminución de la resistencia de derivación, seguido por la disminución del voltaje de circuito abierto. En la



Figura 2.19 se muestra este tipo de desviación, en donde todas las curvas mostradas son del mismo módulo fotovoltaico y fueron capturadas en diferentes momentos una de otra, empezando por la curva de color verde hasta llegar a la de color rojo. Esta variación es más frecuente en sistemas de alto voltaje que se encuentran operando en condiciones elevadas y con variaciones de temperatura y humedad. Si una matriz fotovoltaica no presenta conexión a tierra, es más probable que esta desviación ocurra en módulos hacia el extremo negativo de la cadena [27].

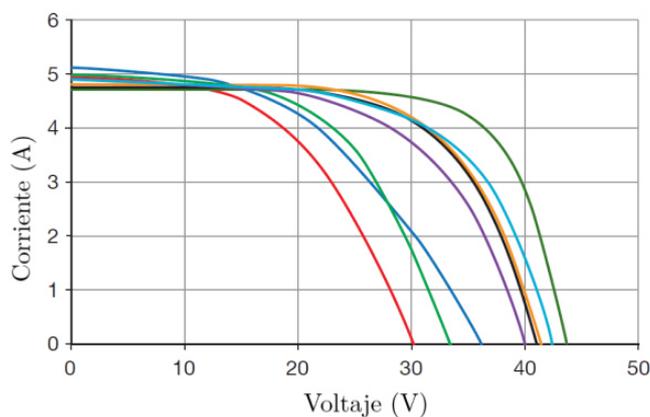


Figura 2.19. Efectos de la degradación inducida por voltaje PID a lo largo del tiempo en las curvas I-V [27].

- *Problemas en el modelado*

De igual manera que en la variación 2 “Baja Corriente”, errores en el modelado del sistema pueden ocasionar que el voltaje de circuito abierto obtenido sea mayor o menor que el voltaje modelado. Entre los errores del modelado se incluyen la introducción errónea de los datos de los módulos o del número de módulos por cada cadena [25].

- *Errores en la medición de la temperatura de la celda fotovoltaica.*

De acuerdo a lo mencionado previamente, la temperatura tiene una gran incidencia en el voltaje del módulo fotovoltaico (relación inversa), por lo cual un error en la medición de la misma provocará que se produzca este tipo de desviación en la forma de la curva. Al percatarse de este error es necesario verificar que el método de medición de la temperatura se esté realizando correctamente [25], principalmente la conexión entre el dispositivo de medición de temperatura y la parte posterior del módulo [27]. Además, pueden existir variaciones en la medición de temperatura cuando se trabaja con varios circuitos de generación, esto debido a la variación de la irradiancia y al viento no uniforme [27].



2.3.8.4 Variación 4 – Curvatura de la rodilla o codo de la curva

Las variaciones en la curvatura de la curva pueden deberse a [25]:

- *Degradación ocasionada por el envejecimiento.*

Este tipo de variación es ocasionado por el proceso de envejecimiento. La identificación de esta variación resulta difícil ya que la ilusión de una rodilla más redondeada puede deberse a otras desviaciones, como por ejemplo el cambio en la pendiente de la curva. Por esta misma razón, el sistema fotovoltaico deberá supervisarse a lo largo del tiempo para buscar y reconocer tendencias. Dichas tendencias pueden compararse con la información de la garantía provista por el fabricante [27].

2.3.8.5 Variación 5 – Pendiente menos pronunciada en la región de fuente de voltaje

La pendiente en la región de fuente de voltaje se relaciona con la resistencia interna en serie del dispositivo fotovoltaico, ya que un aumento de la resistencia hará que la pendiente sea menos pronunciada en esa parte de la curva. Esta variación puede deberse a [25]:

- *El cableado empleado se encuentra dañado, con fallos o no es el correcto.*

En sistemas fotovoltaicos que incorporan una extensión considerable de cableado, la resistencia de los mismos influirá en la forma de la curva tal como se ha detallado. Para solucionar este inconveniente es necesario ajustar el modelo, realizando las correcciones correspondientes debido al uso de estos cables, o bien realizar las pruebas mucho más cerca del generador [25].

- *Existen fallas en las conexiones del módulo o del sistema.*

Al detectar este error es muy importante revisar la calidad de las conexiones y del cableado, puesto que la presencia de este error significaría que el sistema está siendo afectado por un problema relevante de cableado, o un daño derivado o la existencia de corrosión [25].

- *Aumento de la resistencia en serie.*

Este problema puede ocasionarse por las altas resistencias de las conexiones entre las celdas fotovoltaicas o dentro de la caja de conexiones. Lo anterior es el resultado de procesos de degradación, corrosión o errores en la fabricación [25].



2.3.8.6 Variación 6 – Mayor pendiente en la región de fuente de corriente

La pendiente en la región de fuente de corriente se relaciona con la resistencia de derivación o resistencia shunt, ya que una disminución de la resistencia hará que la pendiente sea más pronunciada [19]. La variación en de la pendiente puede deberse a [25]:

- *Existencia de caminos “shunt” o de derivación en las celdas fotovoltaicas.*

La corriente de derivación es toda corriente que puentea a las celdas fotovoltaicas sin producir energía. Este inconveniente es causado por la manera en la que las celdas están conectadas o por defectos puntuales en las mismas, lo que puede derivar en la aparición de puntos calientes [25].

- *Corriente de cortocircuito no uniforme en el módulo.*

La variación en el valor de la corriente de cortocircuito de los diferentes módulos fotovoltaicos es ocasionada por diferencias en el proceso de fabricación; sin embargo, puede que no se presenten variaciones muy pronunciadas en la pendiente de la curva en caso de que dichas perturbaciones no sean muy grandes [25].

- *Presencia de polvo o de un sombreado estrecho y alargado.*

La presencia de un sombreado leve o un sombreado estrecho y alargado ocasionará un cambio ligero en la pendiente de la curva I-V en la región de fuente de corriente, en contraposición con el escalonado que puede observarse en la curva ante una condición de un sombreado parcial significativo [25].

- *Variación de la Irradiancia durante la medición [27]*

La parte horizontal de la curva I-V medida puede verse afectada en caso de que existan variaciones en la irradiancia durante el proceso de medición. Es por esta razón que la obtención de los datos de la curva I-V debe realizarse en periodos de tiempo cortos (< 1 segundo) [27].

2.3.9 Índices de Rendimiento

Los índices de rendimiento se utilizan para evaluar las condiciones en las que se encuentran los módulos fotovoltaicos y como indicadores de rendimiento de los trazadores de curvas I-V [3]. Entre algunos de estos índices se encuentran:



2.3.9.1 Factor de Rendimiento PF

El factor de rendimiento PF se utiliza para calcular el grado de coincidencia que existe entre la curva I-V medida y la curva I-V modelada [27]. Este factor viene dado por la ecuación (2.18).

$$PF = \frac{P_{m\acute{a}xima} (medida)}{P_{m\acute{a}xima} (predicha)} \quad (2.18)$$

Si el valor de este factor es mayor a 0.9 y la forma de la curva I-V es normal, se puede decir que los circuitos de generación fotovoltaicos están operando de manera adecuada [27].

2.3.9.2 Factor de Forma FF

El factor de forma o fill factor (FF) es un factor muy importante que se utiliza para evaluar el rendimiento de un generador fotovoltaico de manera rápida [19]. Se lo utiliza para describir la cuadratura de las curvas I-V y su valor viene expresado por la ecuación (2.19).

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (2.19)$$

De acuerdo a la ecuación (2.19), se aprecia que el factor de relleno es la relación entre dos áreas dentro de la curva I-V, las cuales se aprecian en la Figura 2.20.

El factor de relleno de un módulo fotovoltaica ideal es $FF = 1$, por lo cual la curva I-V sera perfectamente rectangular, pero obtener dicha forma de curva a la salida de un módulo fotovoltaico es físicamente imposible. El valor de este factor depende de la tecnología empleada en la fabricación del módulo y de su diseño [19]; por ejemplo, los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino tienen factores de relleno típicos entre 0.7 y 0.8 [27].

Mientras más cuadrada sea la curva, el módulo tendra una mayor potencia a la salida, y por lo tanto será más eficiente. Los factores de relleno de los módulos deben coincidir con los parámetros dados por el fabricante, esto en condiciones similares; por lo que cualquier variación en este factor indicaria la presencia de un problema [3].

Finalmente, una vez identificado los circuitos con fallas, se debe analizar las formas de sus curvas I-V para determinar las posibles causas del bajo rendimiento [27].

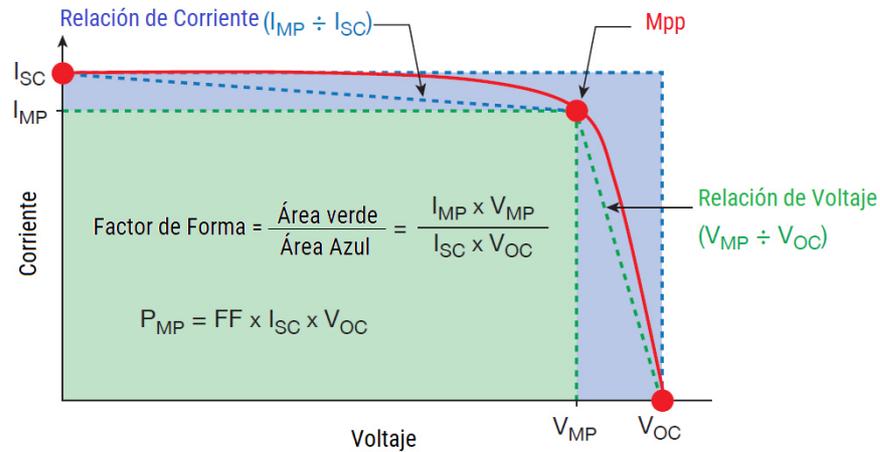


Figura 2.20. Representación gráfica del Factor de Relleno, Relación de Corriente y Relación de Voltaje [27].

2.3.9.3 Relación de Voltaje y Corriente

De acuerdo con la Figura 2.20, la relación de corriente y la relación de voltaje vienen dados por (2.20) y (2.21).

$$\text{Relación de Corriente} = \frac{I_{MPP}}{I_{SC}} \quad (2.20)$$

$$\text{Relación de Voltaje} = \frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \quad (2.21)$$

En base a lo anterior, se observa que la relación de voltaje y la relación de corriente son aproximaciones de las pendientes de las secciones horizontal y vertical de la curva I-V respectivamente [3], por lo cual constituyen excelentes índices para identificar variaciones atípicas de la curva en la región de fuente de voltaje y en la región de fuente de corriente (variación 5 y 6 respectivamente de acuerdo a la norma IEC 62446-1) [27].

2.3.10 Trazadores de Curvas I-V

Básicamente un trazador de curvas I-V hace referencia a la capacidad tecnológica para obtener las características corriente-voltaje a la salida de una celda, modulo, cadena o matriz fotovoltaica de manera eficiente, esto bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura. La obtención de las curvas I-V es un procedimiento muy importante, puesto que las curvas I-V se utilizan para analizar



la eficiencia y rendimiento de los circuitos de generación fotovoltaicos [3], por lo cual son de gran interés para instaladores, operadores, consumidores e investigadores, puesto que constituyen instrumentos esenciales para el mantenimiento, investigación, diagnóstico y detección de fallas, examinar los efectos de la degradación y ciclo de vida funcional de los sistemas fotovoltaicos [28].

De acuerdo con [29] el uso de los trazadores de curvas I-V constituye una técnica invasiva, dado que, para la obtención de las curvas, es necesario la desconexión del sistema de generación fotovoltaico durante el periodo de adquisición de los datos de corriente y de voltaje; es decir, el sistema deberá estar aislado durante el proceso, por lo cual no suministrará energía.

Las tres partes esenciales durante la operación de los trazadores son las siguientes [3]:

1) Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)

El DAQ hace referencia a la obtención de los datos de voltaje y corriente a la salida del sistema de generación fotovoltaico. El DAQ tiene que ser rápido y poseer una buena memoria para el almacenamiento de la información.

2) Acondicionador de Energía

El acondicionador de energía se emplea para variar la carga en los terminales del generador fotovoltaico, esto con el objeto de adquirir una curva I-V completa. La eficiencia y el desempeño dinámico del trazador se asocian con el tipo de topología empleada en esta parte.

3) Estrategia de Control

El control del DAQ y del acondicionador de energía se logra por medio de la estrategia de control. Para el correcto funcionamiento del trazador, es necesario tener una buena estrategia de control.

En la [Figura 2.21](#) se muestra la operación característica de un trazador de curvas I-V.

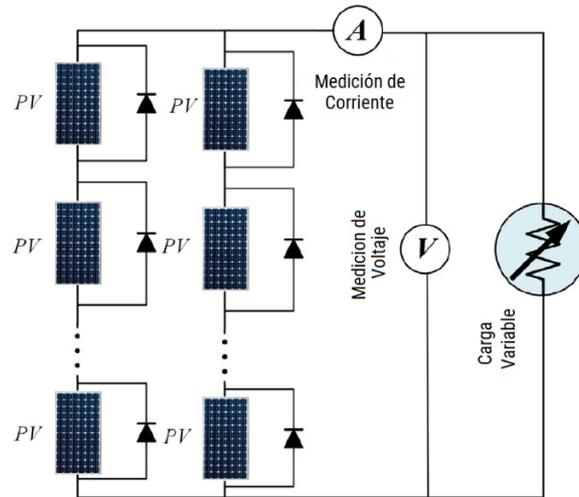


Figura 2.21. Operación típica de un trazador de curvas I-V [3].

El principio básico de los trazadores de curvas I-V es obtener todos los puntos de operación del sistema de generación fotovoltaico, desde la condición de voltaje de circuito abierto hasta la condición de cortocircuito. Esto se logra mediante la utilización de una carga variable. Existen varios métodos que pueden emplearse para variar la carga en los terminales del generador fotovoltaico. Dichos métodos pueden emplear una carga resistiva, una carga capacitiva, una carga electrónica, una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes o usar convertidores DC-DC [3].

2.3.10.1 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 [30], tal como se puede apreciar en la [Figura 2.22](#).

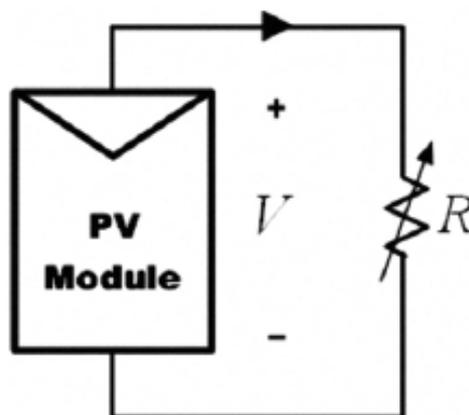


Figura 2.22. Método de carga resistiva [30].



Idealmente, el valor de la resistencia deberá variar en pasos desde cero hasta infinito de tal manera que la curva I-V se obtenga desde la condición de cortocircuito hasta la condición de circuito abierto. Además, debido a que las resistencias de gran capacidad no están disponibles en el mercado este método es aplicable únicamente a módulos de baja potencia [30].

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 [3].

Existen varias investigaciones en las cuales se utiliza este método para obtener las curvas I-V, por ejemplo, en [31] se emplea un esquema binario para obtener las curvas I-V. En la [Figura 2.23](#) se puede apreciar dicho esquema, en donde una matriz de resistencias se combina con interruptores, los cuales son controlados por un microcontrolador, permitiendo tener una gran cantidad de valores de resistencias y de esta manera conseguir curvas I-V suaves. [3].

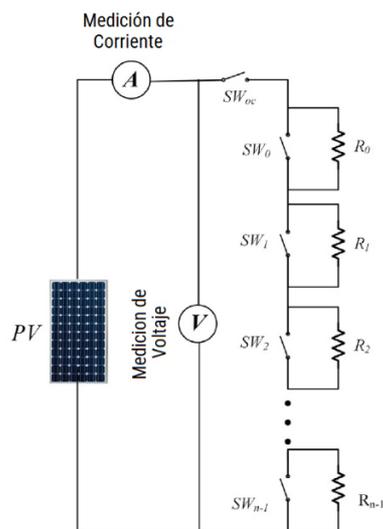


Figura 2.23. Método de carga resistiva que emplea un esquema binario [3].

En [32] se emplea otro método basado en una carga resistiva y se puede apreciar en la [Figura 2.24](#). En este esquema, el proceso de obtención de los puntos de la curva I-V se produce por la conmutación secuencial y de corta duración de varias resistencias, de tal manera que los puntos obtenidos permitan representar la curva.

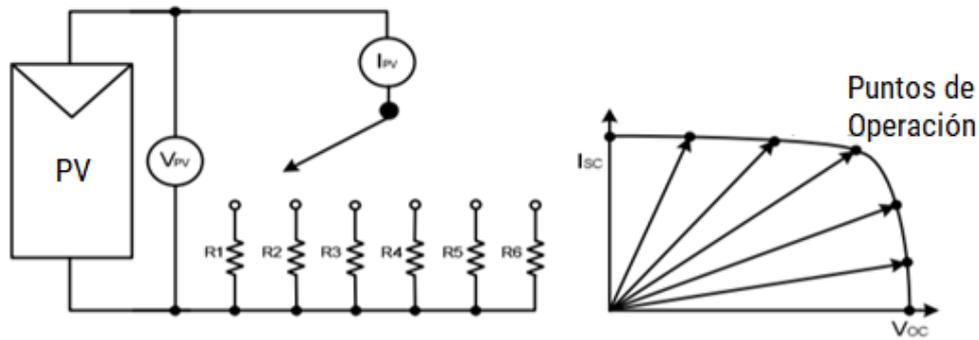


Figura 2.24. Método de carga resistiva propuesto en [32].

2.3.10.2 Método de carga capacitiva

Como su nombre lo indica, el método de carga capacitiva emplea un capacitor para obtener las curvas I-V del módulo fotovoltaico, desde la condición de cortocircuito hasta la condición de circuito abierto [3]. En la [Figura 2.25](#) se puede apreciar el circuito esquemático empleado en este método.

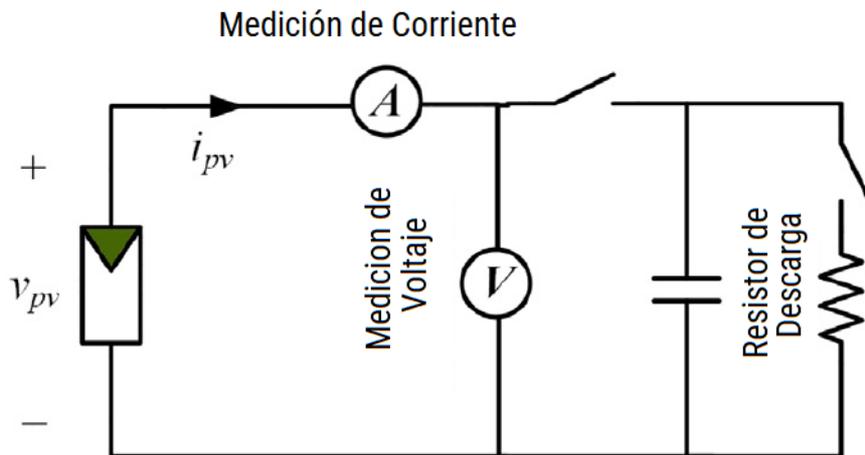


Figura 2.25. Circuito esquemático del método de carga capacitiva [3].

De acuerdo a la [Figura 2.25](#), 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. Las mediciones de voltaje y corriente se realizan en los terminales del módulo [16]. 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. El banco de capacitores empleado debe ser de alta calidad, es decir, los capacitores deben tener pequeñas pérdidas y una baja resistencia serie equivalente [30].

La expresión matemática que describe la relación entre voltaje y corriente en los terminales del capacitor se muestra en (2.22).

$$V_C = \frac{1}{C} \int_0^{t_c} i(t) dt \quad (2.22)$$

Donde:

- V_C : Voltaje en los terminales del condensador [V].
- $i(t)$: Corriente que atraviesa el condensador [A]
- t_c : Tiempo de carga del condensador [s]
- C : Capacitancia [F]

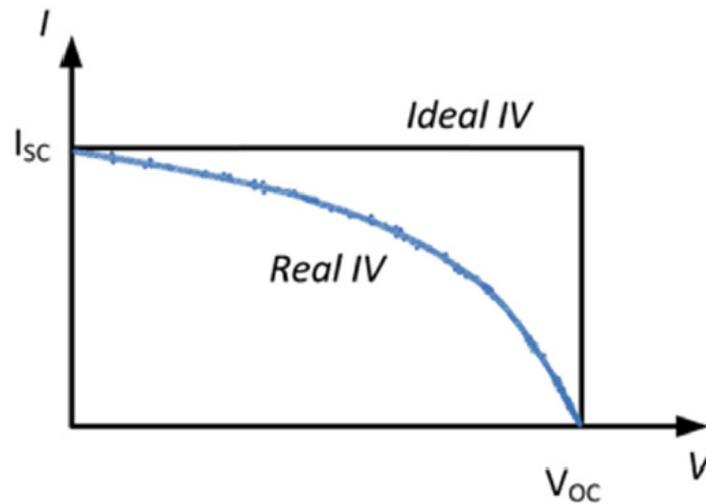


Figura 2.26. Curva I-V real y curva I-V ideal [28]

Al considerar una curva I-V ideal (Figura 2.26), el tiempo de carga del condensador y, por ende, el tiempo de obtención de la curva se aproximan a la expresión (2.23).

$$t_c = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \cdot C \quad (2.23)$$

De acuerdo con la ecuación (2.23), el tiempo de carga del condensador depende únicamente de los valores de V_{OC} , I_{SC} y C . Sin embargo, el tiempo de carga del condensador en condiciones reales es



superior al valor que se obtiene de (2.23), por lo cual se debe considerar un margen extra de tiempo para la carga del condensador, esto con el objetivo de controlar de mejor manera el tiempo de muestro durante de la medición [28]. En la literatura se menciona que el tiempo de carga del condensador deberá estar dentro del intervalo de 20ms - 100ms, puesto que esto permite que las condiciones ambientales (irradiancia 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, el tiempo de carga del condensador puede ser superior al rango estipulado, obteniéndose tiempos de carga de varios cientos de milisegundos, los cuales continúan siendo adecuados [33]. Así, el tiempo de medición de la curva se pueden ajustar de acuerdo al valor de la capacitancia del banco de capacitores [3], y de acuerdo con [30], el tamaño de los capacitores debe ser directamente proporcional a la corriente de cortocircuito e inversamente proporcional al voltaje de circuito abierto del módulo fotovoltaico.

Si bien el principio de operación de este método es sencillo y los tiempos de medición pueden ser cortos, el principal inconveniente es el volumen, tamaño y costos de los capacitores requeridos, en particular para los grandes sistemas fotovoltaicos; puesto que los capacitores empleados deberán cubrir un extenso rango de capacitancia, voltaje y corriente de entrada para medir las diferentes curvas I-V requeridas [3].

2.3.10.3 Método de carga electrónica

Los trazadores de curvas I-V que emplean el método de carga electrónica utilizan un transistor (MOSFET, IGBT o BJT) como carga; es decir, 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 [3]. En la [Figura 2.27](#) se aprecia el circuito esquemático de un trazador I-V que emplea un MOSFET como carga electrónica.

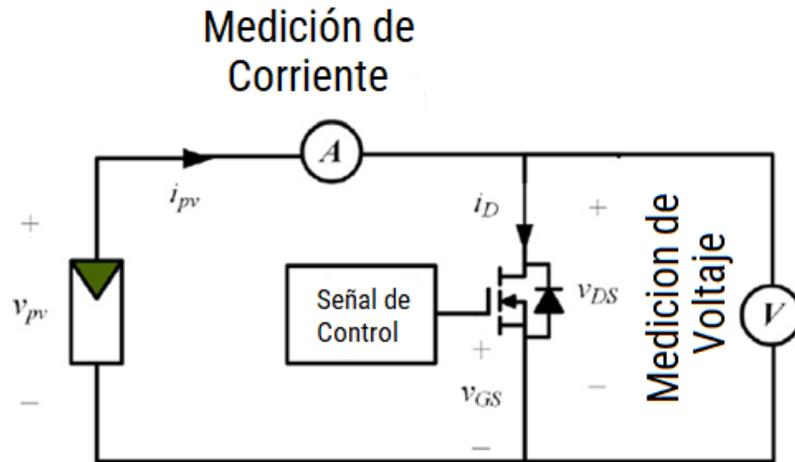


Figura 2.27. Circuito esquemático de un trazador I-V que emplea un MOSFET como carga electrónica [3].

Generalmente, un transistor MOSFET se usa como carga electrónica y se requiere que este funcione en la región de corte, en la región lineal u óhmica y en la región activa o de saturación [30]. Así, 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, por lo cual la utilización de circuitos de control resulta de gran importancia [3].

En la [Figura 2.28](#) se aprecia todo lo antes mencionado, ya que en esta figura se muestra las características corriente-voltaje de un módulo fotovoltaico y de un transistor MOSFET, en donde se observa como al variar V_{GS} se obtienen distintos puntos de la curva I-V del módulo fotovoltaico.

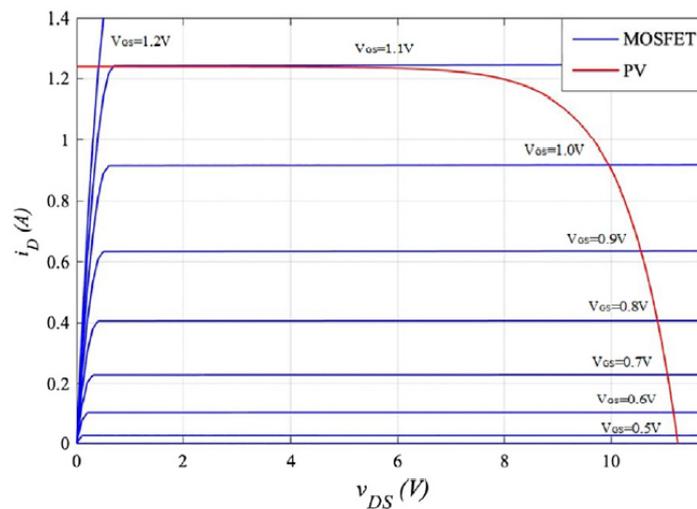


Figura 2.28. Características I-V de un módulo fotovoltaico y de un transistor MOSFET [3].



La utilización de este método se ha limitado a aplicaciones de media potencia, esto debido a que los transistores deben disipar toda la potencia suministrada por el generador fotovoltaico [30]. Además, el costo elevado de los transistores de alta calidad hace que este método no se utilice en sistemas fotovoltaicos de gran tamaño [3].

2.3.10.4 Método de suministro de energía de cuatro cuadrantes

El método de suministro de energía de cuatro cuadrantes se emplea para obtener las curvas I-V de los generadores fotovoltaicos. Una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes es un equipo que permite entregar y disipar energía. Dicho equipo puede operar en los cuatro cuadrantes. Si bien los generadores fotovoltaicos operan en el primer cuadrante, los valores alrededor del segundo y cuarto cuadrante permiten diagnosticar desajustes en la operación [3]. En la [Figura 2.29](#) se puede apreciar una curva I-V obtenida con este método y en la [Figura 2.30](#) se aprecia el circuito esquemático de un trazador I-V que emplea una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes.

A pesar de que la obtención de las curvas I-V con este método es fácil, su aplicación se ha limitado a ensayos en laboratorios debido a su elevado costo y volumen [3].

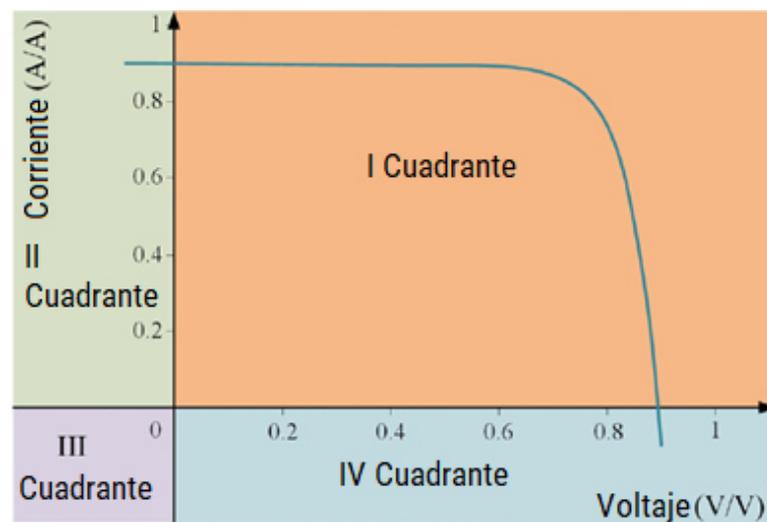


Figura 2.29. Curva I-V obtenida con una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes [3].

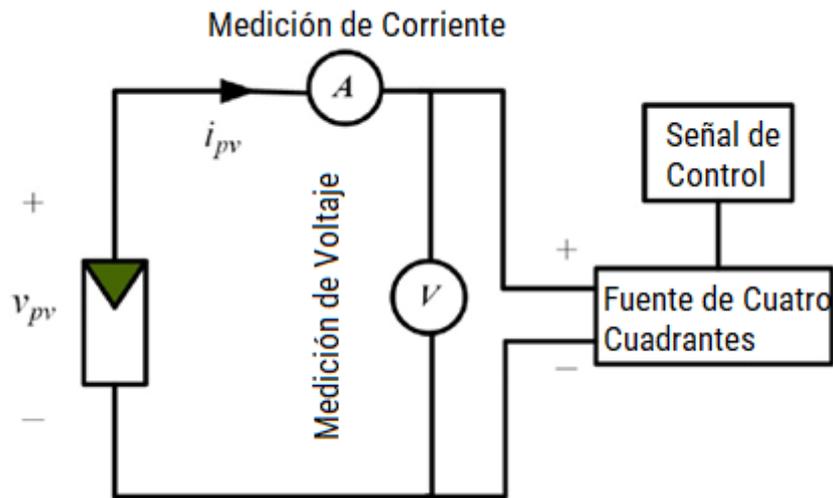


Figura 2.30. Circuito esquemático del método de suministro de energía de cuatro cuadrantes [3].

2.3.10.5 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 [30]. En la [Figura 2.31](#) se muestra el circuito esquemático de los trazadores I-V que emplean convertidores DC-DC y en la [Figura 2.32](#) se muestra las principales topologías de convertidores que se emplean para este propósito, siendo estos los convertidores Buck-Boost, Cuk, Zeta y SEPIC. 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 [3].

Los convertidores Buck y los convertidores Boost no son adecuados para trazar las curvas I-V, esto debido a que los convertidores Buck no permiten medir valores cercanos a la corriente de cortocircuito y los convertidores Boost no permiten medir puntos que se encuentren cercanos al voltaje de circuito abierto [3].

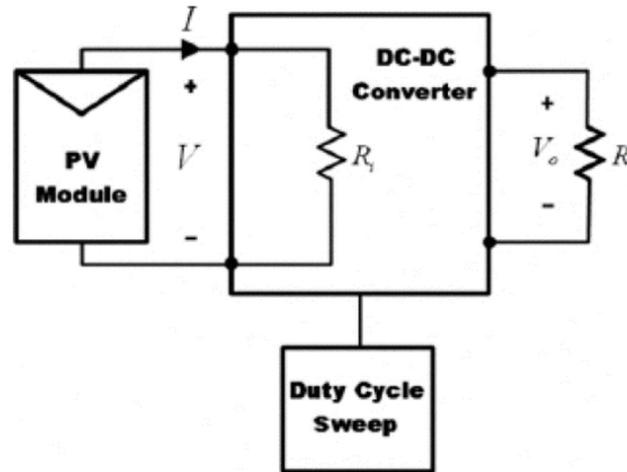


Figura 2.31. Circuito esquemático de los trazadores I-V que emplean convertidores DC-DC [30].

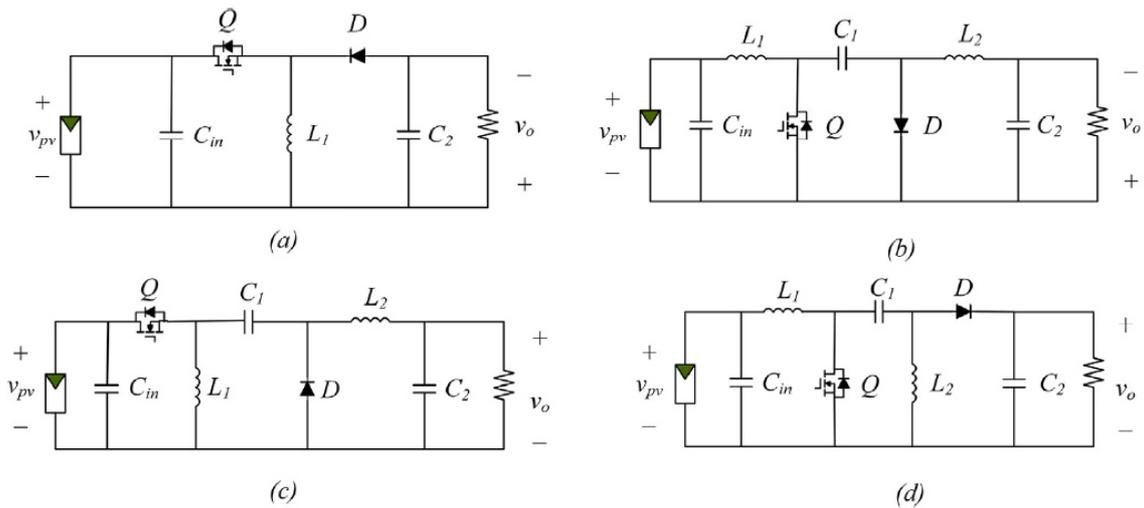


Figura 2.32. Principales topologías de convertidores DC-DC empleadas para la obtención de las curvas I-V (a) Buck-Boost (b) Cuk (c) Zeta (d) SEPIC [3].



Capítulo 3

Diseño y Construcción del Trazador de Curvas I-V

3.1 Justificación del método seleccionado: Método de Carga Capacitiva

De acuerdo a la sección anterior, existen varios métodos que se pueden emplear para obtener las curvas características I-V de los generadores fotovoltaicos, y para el desarrollo de este trabajo se ha elegido emplear el método de carga capacitiva para la construcción del trazador de curvas I-V. El uso de esta topología se debe a que esta es una de las mejores en cuanto a presión, velocidad de barrido, resolución y clasificación máxima de acuerdo a una comparación realizada en [3] entre los diferentes métodos de obtención de curvas I-V. Así, las curvas obtenidas con este método pueden tener desviaciones de $\pm 1\%$ con respecto a la curva real [3]. Además, este método es el más usado en los trazadores de curvas I-V comerciales, y según [34], es un método de bajo costo que 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.

3.2 Descripción general del sistema propuesto

El sistema propuesto del trazador de curvas I-V que emplea el método de carga capacitiva se basa en la medición y obtención de los valores de corriente y voltaje del módulo bajo análisis; así como también de los valores de irradiancia y temperatura a los cuales se realiza la prueba.

Todas las mediciones antes mencionadas se las realiza a través de sensores, los cuales estarán previamente calibrados para su uso, y los valores obtenidos de los mismos se almacenan gracias a un

sistema de adquisición de datos DAQ. Una vez finalizado el proceso de medición y los datos sean almacenados, se procede a graficar la curva I-V correspondiente y a la descarga del condensador para que el sistema quede listo para una próxima medición. Los valores obtenidos se guardan para realizar un análisis posterior de la condición del módulo. Todo el proceso es controlado por un ordenador. Se emplea una Tablet o PC como interfaz gráfica, la cual se comunica con el ordenador mediante un protocolo RDP (Remote Desktop Protocol), o en su defecto una pantalla con conexión HDMI. Las salidas analógicas de los sensores empleados son digitalizadas mediante la utilización de un convertidor de señal analógica a digital (ADC) y luego transmitidas al ordenador mediante una comunicación I2C. Además, el sistema propuesto emplea tres capacitores y un juego de conexión, con lo cual se puede obtener cuatro valores distintos de capacitancia, haciendo de esta manera que el sistema desarrollado sea escalable. La selección del valor de capacitancia depende de las características del sistema de generación fotovoltaico del cual se quiere obtener la curva I-V y del tiempo de medición requerido. Para la alimentación de todos los componentes del sistema, se emplea una conexión a la red eléctrica de 110V, y varias fuentes de voltaje de corriente continua.

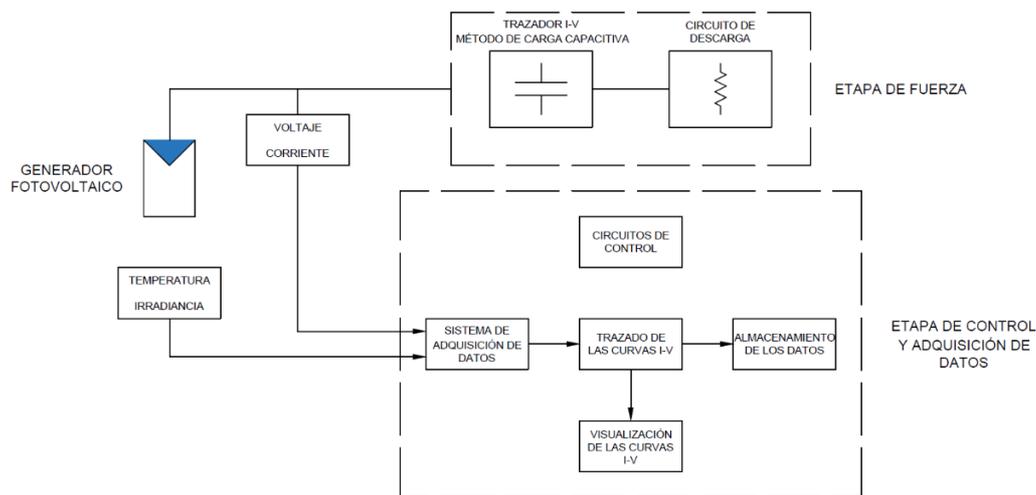


Figura 3.1. Diagrama de Bloques del Trazador I-V propuesto.

El diagrama de bloques del trazador de curvas I-V propuesto se observa en la [Figura 3.1](#), en donde se puede apreciar que el trazador de curvas I-V consta de dos partes principales:

- Etapa de Fuerza
- Etapa de Control y Adquisición de Datos

La etapa de fuerza, consiste en los circuitos de carga y descarga del condensador; en tanto que la etapa de control y adquisición de datos, permite obtener los valores de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia provenientes de los sensores, graficar la curva I-V correspondiente para su visualización, guardar los datos obtenidos para realizar un análisis posterior y controlar adecuadamente todo el funcionamiento del sistema. En la [sección 3.3](#) se profundiza en el estudio de estas dos etapas.

3.3 Diseño Eléctrico

En esta sección se describe el diseño eléctrico para el trazador de curvas I-V propuesto, el cual, como se dijo previamente, consta de dos etapas a) Etapa de Fuerza y b) Etapa de Control y Adquisición de Datos.

3.3.1 Etapa de Fuerza

El circuito esquemático de la Etapa de Fuerza empleado en el trazador de curvas I-V propuesto se aprecia en la [Figura 3.2](#).

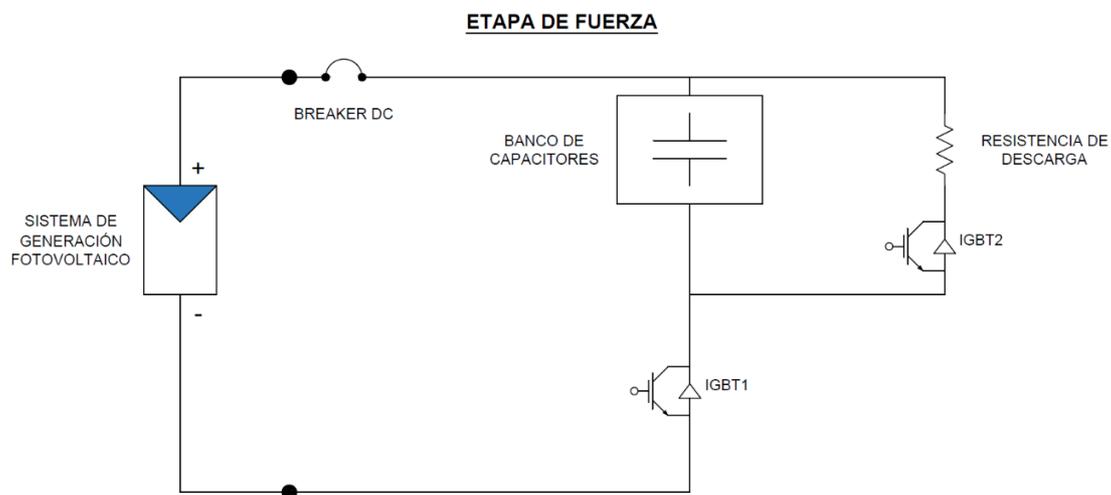


Figura 3.2. Circuito Esquemático del circuito de fuerza.

En base a la figura anterior, se aprecia que los elementos que conforman la etapa de fuerza son: sistema de generación fotovoltaico, banco de capacitores, resistencia de descarga, transistores IGBT y un breaker DC. Además, se observa que el circuito de fuerza presentado es similar al expuesto en la [Figura 2.25](#), siendo la principal diferencia entre ellos el uso de transistores IGBT como interruptores en el circuito propuesto. El uso de transistores IGBT como interruptores controlados por voltaje es adecuado cuando se requiere obtener las curvas I-V de sistemas de generación fotovoltaico de gran tamaño [35], es por esta razón que estos dispositivos se emplean en el diseño del trazador de curvas I-V. A continuación, se detalla las funciones de cada uno de los elementos que conforman la etapa de fuerza.

3.3.1.1 Sistema de Generación Fotovoltaico

El sistema de generación fotovoltaico hace referencia al módulo, cadena o matriz fotovoltaica del cual se desea obtener la curva característica I-V. Se debe prestar especial atención a la hora de conectar

los terminales del sistema de generación al trazador de curvas I-V, por lo cual estos deben conectarse del mismo modo que se presenta en la [Figura 3.2](#).

3.3.1.2 Breaker o Disyuntor DC

Se emplea un breaker o disyuntor DC para proteger al equipo de prueba de sobrecorrientes o cortocircuitos cuyos valores superen las especificaciones para las cuales está diseñado. El breaker DC empleado es de la marca TOMZN, siendo su modelo el TOB7Z-63 con una capacidad nominal de 16 A. El breaker está diseñado para operar a un voltaje máximo de 1000 V DC y es capaz de interrumpir corrientes de cortocircuito de hasta 6 kA. El dispositivo está diseñado para operar en el rango de temperatura desde $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, y tiene una vida eléctrica de al menos 8000 operaciones [36]. En la [Figura 3.3](#) se puede apreciar este dispositivo.



Figura 3.3. Breaker DC TOB7Z-63 [36].

3.3.1.3 Transistores IGBT

En la etapa de fuerza se emplean dos transistores IGBT, el primero es el encargado de controlar la carga del capacitor y el segundo es el encargado de controlar la fase de descarga del condensador. A continuación, se describe más detalladamente la función de cada uno de estos dispositivos.

- IGBT1

El transistor IGBT1 es el encargado de controlar el circuito de carga del condensador, ya que permite que el sistema de generación fotovoltaico se conecte con el banco de condensadores. De esta manera, al activarse el transistor IGBT1, el banco de condensadores se cargará desde cero hasta el voltaje de circuito abierto, esto en un periodo corto de tiempo.

- IGBT2

El transistor IGBT2 es el encargado de controlar el circuito de descarga del banco de capacitores. Este transistor se activa una vez finalizado el proceso de carga y permite que los



capacitores se descarguen, lo cual se realiza por razones de seguridad y para que el equipo quede listo para una nueva medición. El proceso de descarga dura varios segundos y concluye cuando el voltaje del banco de capacitores es inferior a un nivel de voltaje determinado ($<1V$).

Los transistores IGBT empleados en el trazador de curvas I-V diseñado son los G30N135HR. En cuanto a las características principales de estos transistores, se puede mencionar que el voltaje máximo colector-emisor es de 1350 V y la corriente máxima del colector es de 60 A, esta última a una temperatura de 25 °C. Estos dispositivos pueden operar en el rango de temperatura desde -40 °C hasta +175 °C. Además, el voltaje umbral puerta-emisor típico es de 5.5 V [37]. Se emplean estos transistores debido a que sus características son adecuadas para el trazador de curvas I-V propuesto, ya que el equipo desarrollado permite obtener las curvas I-V de los sistemas de generación fotovoltaica con voltajes de circuito abierto de hasta 500 V y con corrientes de cortocircuito inferiores a los 16 A. En la [Figura 3.4](#) se puede apreciar una imagen del transistor G30N135HR.



Figura 3.4. Transistor IGBT G30N135HR [37].

3.3.1.4 Banco de Capacitores

En el diseño eléctrico, se considera emplear un banco de tres capacitores de las mismas características e igual capacitancia para el trazador de curvas I-V, de tal manera que el sistema sea escalable y el valor de la capacitancia se elija de acuerdo a las características del sistema de generación fotovoltaico. Los capacitores empleados se denominan C1, C2 y C3 respectivamente. Como se señala en la [sección 3.2](#), se puede obtener cuatro valores distintos de capacitancia con el esquema de conexión empleado (ver [Figura 3.5](#) y [Figura 3.6](#)). En la [Tabla 3.1](#) se puede apreciar los valores de la capacitancia de acuerdo a cada configuración.

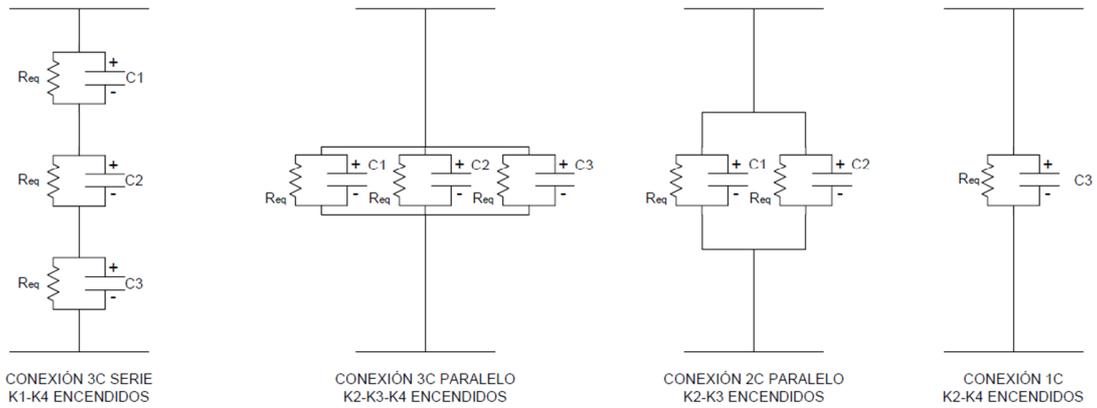
**DISTINTAS CONFIGURACIONES DEL BANCO DE CAPACITORES**C1 - C2 - C3 : Capacitores
Req: Resistencia de Equilibrio

Figura 3.5. Distintas configuraciones del banco de capacitores.

Tabla 3.1. Configuración del banco de capacitores.

CONFIGURACIÓN DEL BANCO DE CAPACITORES		
$C_1 = C_2 = C_3$		
Nombre de la Configuración	Significado	Capacitancia C_T
3C Serie	3 capacitores en Serie	$C_T = \frac{C_1}{3}$
3C Paralelo	3 capacitores en Paralelo	$C_T = 3C_1$
2C Paralelo	2 capacitores en Paralelo	$C_T = \frac{C_1}{2}$
1C	1 capacitor	$C_T = C_1$



BANCO DE CAPACITORES

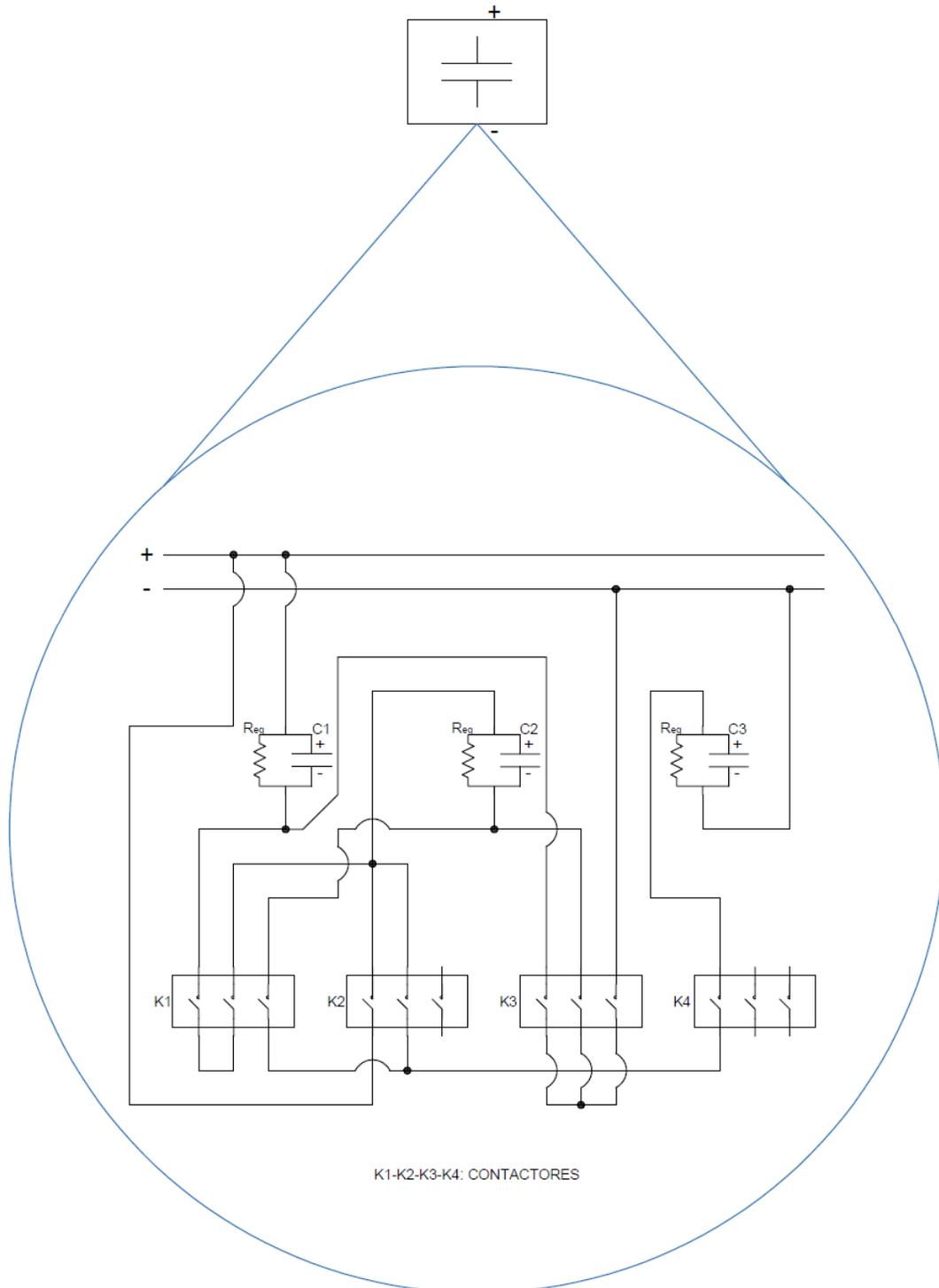


Figura 3.6. Esquema de Conexión del Banco de Capacitores.



Los componentes que conforman el banco de capacitores para el trazador propuesto son los siguientes:

- *Capacitores*

Son los componentes fundamentales del trazador 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-voltaje. Los capacitores que se emplean son de la marca BHC, modelo ALS31A1276MF, con una capacitancia de 4400 uF ($\pm 20\%$). Cada uno de los capacitores está diseñado para operar a un voltaje máximo de 450 V. En la [Figura 3.7](#) se muestra la fotografía de uno de los capacitores.



Figura 3.7. Capacitor BHC de 4400 uF.

- *Contactores*

Mediante el uso de estos dispositivos, el sistema es escalable, de tal manera que el equipo propuesto es capaz de tener distintos arreglos o configuraciones empleando los cuatro capacitores (ver [Tabla 3.1](#)). Los contactores que se emplean son cuatro y son de la marca Siemens, siendo su modelo SIRIUS 3RT2024-1AG20. Estos contactores de potencia poseen tres contactos principales normalmente abiertos, cuyo voltaje de empleo máxima es de 690 V. Para el circuito de control, un voltaje de 110 V AC en la bobina es necesaria para accionar los contactos [38]. En la [Figura 3.8](#) se muestra la imagen de los contactores empleados.



Figura 3.8. Contactor SIRIUS 3RT2024-1AG20 [38].

- *Resistencias de Equilibrio*

Las resistencias de equilibrio son resistencias de que se conectan en paralelo con cada capacitor. Estas se emplean cuando se usa una combinación en serie de capacitores para aumentar el voltaje nominal del banco, ya que permiten equilibrar el voltaje a través de cada capacitor. En el sistema propuesto se conecta una resistencia de equilibrio a cada uno de los condensadores empleados. Debido al alto valor de las resistencias de equilibrio, estas no generan ningún efecto adverso que pueda perjudicar la obtención de la curva I-V. Además, el uso de estas resistencias constituye un mecanismo de seguridad para el usuario del equipo, puesto que, en caso de alguna falla en la fase de descarga de los condensadores, estos se descargan a través de estas resistencias, aunque de manera mucho más lenta.

Las resistencias de equilibrio que se emplean son las ATE 10SR-27k-J. Estas resistencias tienen un valor óhmico de $27\text{ k}\Omega \pm 5\%$, una potencia nominal de 13 W y su temperatura de funcionamiento va desde los -55°C hasta los 350°C . El voltaje de operación de cada una de estas resistencias es máximo de 940 V DC [39]. En la [Figura 3.9](#) se muestra una imagen de estas resistencias.



Figura 3.9. Resistencia de equilibrio ATE 10SR-27k-J [39].



3.3.1.5 Resistencia de Descarga

La resistencia de descarga permite disipar la energía almacenada en los capacitores durante el proceso de obtención de la curva I-V (fase de carga). Para el equipo propuesto, se emplea una resistencia de tubo fijo de 100 W y 500 Ω para la descarga de los condensadores. El modelo de la resistencia es L100J500E, y esta puede operar en voltajes de hasta 2845 V y con sobrecargas de hasta diez veces su potencia nominal (durante 5 segundos) [40]. En la [Figura 3.10](#) se muestra una imagen de esta resistencia



Figura 3.10. Resistencias L100J500E [40].

3.3.1.6 Lista de Materiales empleados en la Etapa de Fuerza

Un resumen de las características de los componentes que se utilizan en la etapa de fuerza se presenta en la [Tabla 3.2](#).

Tabla 3.2. Lista de componentes empleados en la etapa de fuerza.

Descripción	Componente	Cantidad	Características Eléctricas	
<i>Sistema de Generación Fotovoltaico</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Módulo Atersa A-250P 2) Módulo Atersa A-250M 3) Módulo Jinko JKM275PP 	-	Se describen en el capítulo 4	
<i>Breaker DC</i>	TOMZN TOB7Z-63	1	Voltaje DC	1000 V
			Corriente Nominal	16 A
			Capacidad de Interrupción	6 kA
	G30N135HR	2	Voltaje V_{CE}	1350 V



<i>Transistores IGBT</i>			Corriente I_C	60 A
<i>Capacitores</i>	Condensadores electrolíticos de aluminio BHC ALS31A1276MF	3	Capacitancia (-20+20%)	4400 uF
			Voltaje Nominal	450 V DC
<i>Contactores</i>	SIRIUS 3RT2024-1AG20	4	Voltaje Bobina	110 V AC
			Voltaje Máximo de empleo	690 V
<i>Resistencias de Equilibrio</i>	ATE 10SR-27k-J	3	Resistencia	27 k Ω
			Potencia	13 W
			Voltaje	940 V DC
<i>Resistencia de Descarga</i>	L100J500E	1	Resistencia	500 Ω
			Potencia	100 W
			Voltaje	2845 V

3.3.2 Etapa de Control y Adquisición de Datos

Para que el trazador de curvas I-V funcione correctamente, es necesario tener un buen sistema de control y adquisición de datos. La selección apropiada de un controlador es fundamental en los sistemas de monitoreo y para el manejo de la información proveniente de los sensores [1]. De esta manera, para el trazador I-V desarrollado se emplea un Raspberry Pi 3 modelo B como ordenador, el cual maneja toda la etapa de control y adquisición de datos. El Raspberry Pi es un mini ordenador compatible con varios sistemas operativos, entre ellos NOOBS y Raspbian. La alimentación del ordenador es a través de una fuente de 5 V, con una corriente de entrada de 2.5 A. Una tarjeta SD es empleada para el almacenamiento. Entre las características más relevantes de este dispositivo es que se puede conectar a la red por medio de un cable Ethernet, posee cuatro puertos USB 2.0 y 40 pines (conectores tipo macho) con GPIO (General Purpose Input Output). Además, estos pines pueden emplearse como una interfaz de comunicación en serie (I2C, UART, SPI) [1].

Así, esta mini computadora registra las señales provenientes de los sensores de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia; manda las señales para iniciar los procesos de carga y descarga de los capacitores; controla la configuración del banco de capacitores, traza las curvas I-V correspondientes y almacena la información obtenida; todo esto al mismo tiempo que genera una interfaz gráfica con el usuario. Se emplea un programa desarrollado en Python e implementado en Raspberry Pi para realizar todas las tareas antes mencionadas de manera adecuada. En la [sección 3.7](#) se detalla todo el proceso de obtención de las curvas I-V. En la [Figura 3.11](#) se aprecia el modelo del Raspberry Pi empleado en el sistema desarrollado.

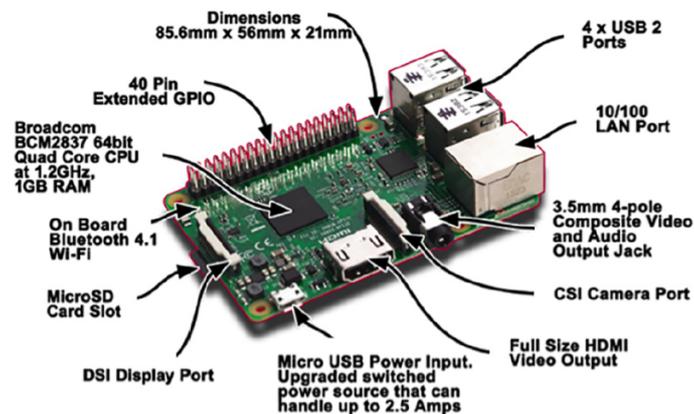


Figura 3.11. Ordenador empleado para el trazador de curvas I-V: Raspberry Pi 3B [1].

En la [Figura 3.11](#) se pueden observar algunas características que posee el Raspberry Pi, como por ejemplo conexión Wi-Fi y Bluetooth, un puerto LAN 10/100, una salida de video HDMI, etc. En cuanto a los pines GPIO, se puede mencionar que estos son un conjunto de conexiones que se pueden emplear, ya sea como entradas o salidas, para varios propósitos. El sistema GPIO constituye una de las partes más importantes de la etapa de control y adquisición de datos, puesto que las señales de control para los circuitos de disparo de los transistores y para el circuito de selección de la configuración del banco de capacitores provienen de ciertos pines que se han configurado como salidas digitales. Además, el sistema GPIO permite que las señales de salida de los sensores empleados sean transmitidas al Raspberry Pi, ya que ciertos pines permiten una comunicación I2C con el convertidor analógico-digital empleado. Asimismo, la alimentación del Raspberry Pi se la realiza por los pines del sistema GPIO. En la [Figura 3.12](#) se puede apreciar el sistema GPIO del Raspberry Pi empleado.

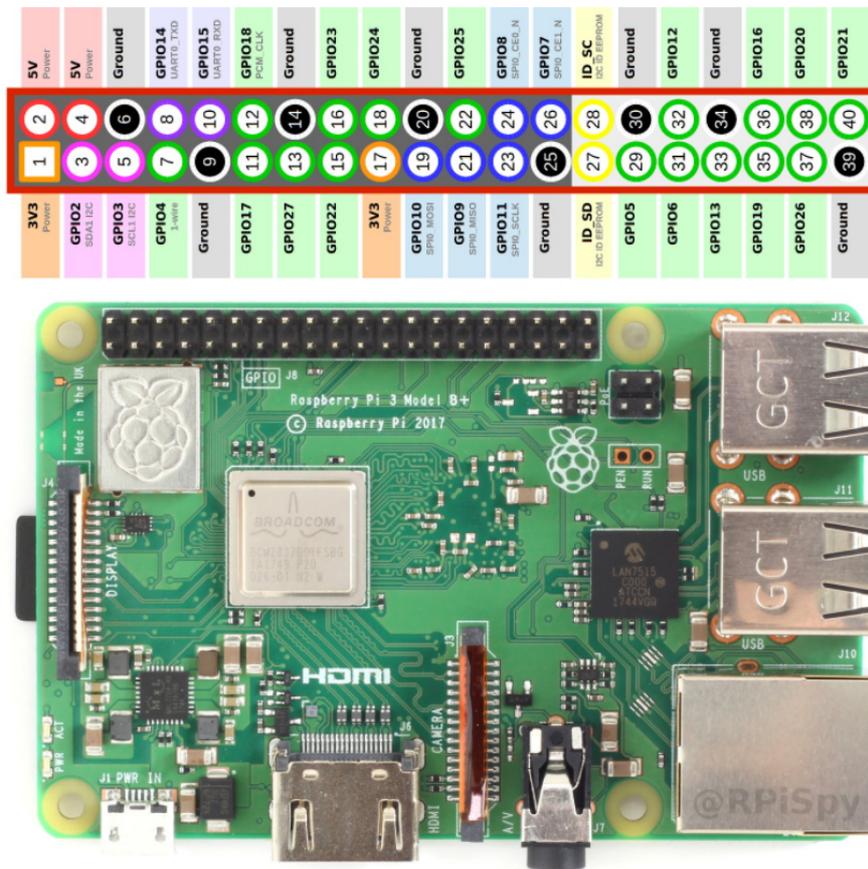


Figura 3.12. Pines GPIO del Raspberry Pi 3B [41].

Para la descripción de la Etapa de Control y Adquisición de Datos, se ha dividido la etapa en tres partes, tal como se muestra a continuación:

1) Circuitos de Control

- Circuito de Disparo de los transistores IGBT
- Circuito de selección de la configuración del banco de capacitores

2) Sistema de Adquisición de Datos DAQ

- Medición de Voltaje
- Medición de Corriente
- Medición de Temperatura e Irradiancia
- Adquisición de Datos

- Trazado de las curvas I-V y Almacenamiento de la Información

3) Circuitos de Alimentación

A continuación, se describen cada una de las partes antes mencionadas.

3.3.2.1 Circuitos de Control

Los circuitos de control empleados en el trazador I-V desarrollado son básicamente dos. El primer circuito controla el disparo del transistor IGBT, en tanto que el segundo circuito controla la configuración del banco de capacitores.

3.3.2.1.1 Circuito de Disparo de los Transistores IGBT

Los transistores IGBT deben activarse y apagarse de manera adecuada, permitiendo de esta manera un control adecuado de la fase de carga del banco de capacitores y de su posterior descarga; así, el circuito de disparo de estos transistores cobra gran importancia. En la [Figura 3.13](#) se muestra el esquema del circuito empleado.

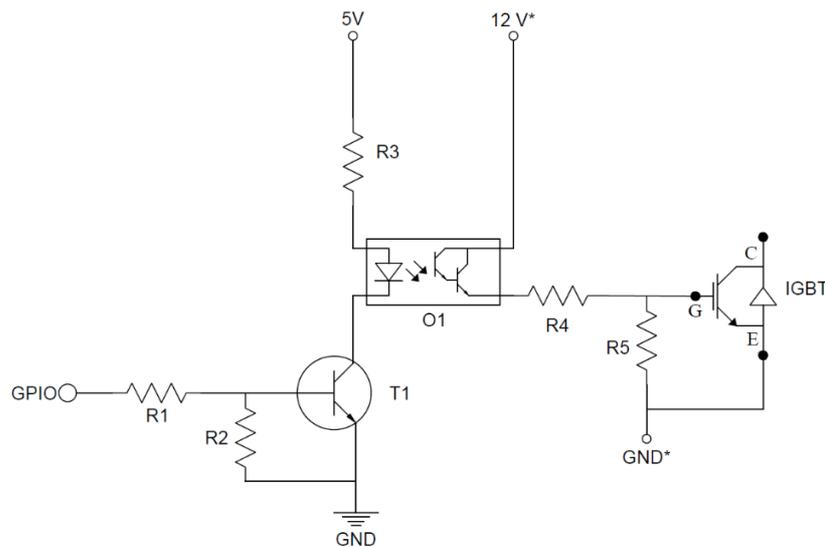


Figura 3.13. Circuito Esquemático empleado para el disparo de los transistores IGBT.

De acuerdo a la [Figura 3.13](#), se puede apreciar como todo el proceso para que el transistor pase del estado de encendido al estado de apagado, y viceversa, es controlado por la señal proveniente de un pin del GPIO del Raspberry Pi. Así, cuando la señal proveniente del GPIO está en “0”, el IGBT se encuentra apagado; en tanto que cuando la señal proveniente del GPIO está en “1”, el IGBT se encuentra encendido. Para aislar eléctricamente el circuito de control de la etapa de fuerza, se emplea un optoacoplador del tipo fototransistor con configuración Darlington, al cual se lo ha denominado O1.



Es de suma importancia indicar que las señales de provenientes del GPIO que activan los transistores IGBT deben estar programadas adecuadamente, para evitar fallos o condiciones indeseadas al momento de realizar el trazado de las curvas I-V.

Si bien los circuitos empleados para el disparo de los transistores IGBT1 e IGBT2 son los mismos que se presentan en la [Figura 3.13](#), la diferencia entre ellos radica en la señal proveniente del GPIO, ya que para activar el transistor IGBT1, el usuario pulsa un botón ubicado en la parte externa del equipo para iniciar el proceso de carga del banco de capacitores. Al pulsar el botón se activa un optoacoplador, ocasionando que la señal de entrada de un pin del GPIO cambie de “1” a “0”. Esta variación en el valor de la entrada es detectada por el controlador, el cual emite la señal correspondiente para activar el transistor IGBT1. El circuito correspondiente se muestra en la [Figura 3.14](#).

En el caso del IGBT2, la señal de activación está programada para emitirse luego de que haya finalizado el proceso de carga.

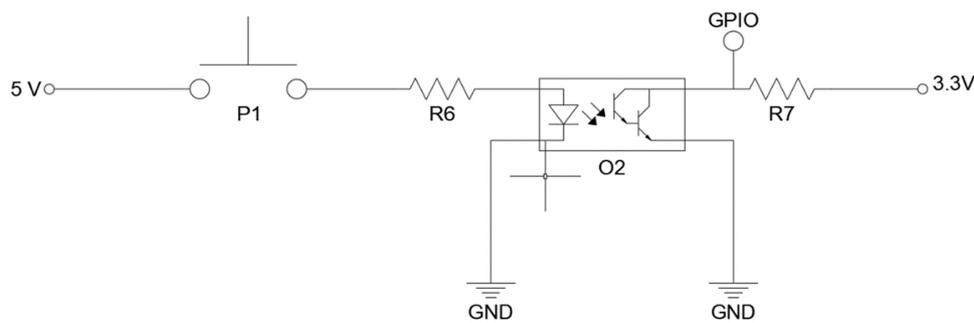


Figura 3.14. Circuito Esquemático empleado para iniciar el proceso de obtención de la curva I-V.

3.3.2.1.2 Circuito de selección de la configuración del banco de capacitores

Acorde con lo mencionado previamente, el trazador de curvas I-V propuesto tiene distintas configuraciones para el banco de capacitores, por lo cual un adecuado sistema de control es implementado para la selección adecuada de la capacitancia. Para dicho propósito, se emplean contactores y el circuito de activación cada uno de ellos se presenta en la [Figura 3.15](#).

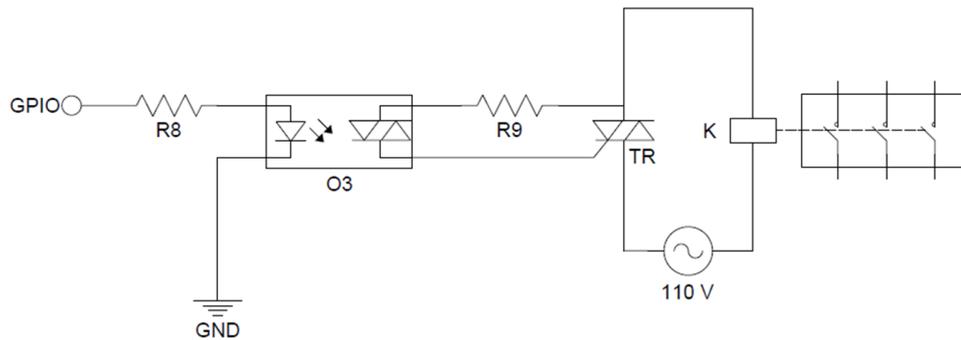


Figura 3.15. Circuito Esquemático empleado para activar el contactor.

De acuerdo a la [Figura 3.15](#), se puede apreciar que el circuito de accionamiento de los contactores que permite elegir la configuración del banco de capacitores es controlado por una señal proveniente del GPIO del Raspberry Pi. En el diagrama esquemático a los contactores se les denomina con la letra K. Este circuito de control es el mismo para los cuatro contactores empleados en el equipo propuesto.

Se emplea un optoacoplador del tipo fototriac para aislar este circuito de control de la etapa de fuerza. La utilización de este tipo de optoacoplador se debe a que la bobina del contactor se activa con corriente alterna.

El proceso para configurar el banco de capacitores es el siguiente. Inicialmente, la señal proveniente del GPIO es “0”, por lo cual los contactos permanecen abiertos. Cuando el usuario decide que configuración emplear para el banco de capacitores, las señales correspondientes de los pines GPIO cambian al valor de “1” activando todo el sistema. Así, la corriente alterna circula a través de la bobina del contactor, lo cual hace que se cierren sus contactos. Al cerrarse los contactos, las conexiones necesarias para obtener la configuración del banco de capacitores deseada son realizadas. En la [Tabla 3.3](#) se muestra la configuración del banco de capacitores de acuerdo a los contactores que están activados.

Tabla 3.3. Configuración del banco de capacitores de acuerdo a los contactores activados.

Nombre de la Configuración	Contactores Activados
3C Serie	K1 - K4
3C Paralelo	K2 – K3 – K4
2C Paralelo	K2 – K3
1C	K2 – K4



Los componentes empleados en los dos circuitos de control previamente descritos se muestran en la sección 3.3.2.4.

3.3.2.2 Sistema de Adquisición de Datos

El sistema de adquisición de datos es otra de las partes fundamentales del trazador de curvas I-V propuesto. Para el análisis de este sistema se estudia los circuitos para la medición de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia; el método empleado para la adquisición de los datos de los sensores, el trazado de la curva I-V y el almacenamiento de la información obtenida de todo el proceso de obtención de la curva.

3.3.2.2.1 Medición de Voltaje

Para la medición de voltaje del generador fotovoltaico al momento del trazado de la curva I-V se emplea el transductor de voltaje LV25-P. En la Figura 3.16a) se observa una imagen del transductor y en la Figura 3.16b) se puede apreciar el circuito esquemático de este dispositivo. La Tabla 3.4 contiene información relacionada a las características principales del transductor LV25-P.

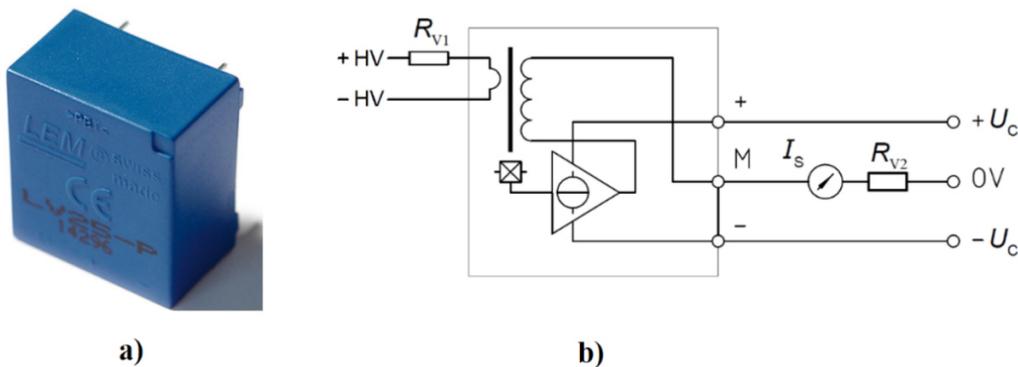


Figura 3.16. a) Transductor LV25-P y b) Circuito Esquemático [42].

Tabla 3.4. Características Principales del dispositivo LV 25-P

Símbolo	Definición	Valor
I_{PN}	Corriente Primaria Nominal	10 mA
I_{SN}	Corriente Secundaria Nominal	25 mA
I_{PM}	Rango de medición corriente primaria	[0 mA - 14 mA]
U_C	Fuente de voltaje	$\pm 12V, \pm 15 V$
$V_{P_{max}}$	Voltaje Primario Máximo	500 V



R_{V1}	Resistencia Primaria	-		
R_{V2}	Resistencia de Medida	con U_C	$\pm 10 \text{ mA}_{\text{max}}$	[30 Ω - 190 Ω]
		$\pm 12 \text{ V}$	$\pm 14 \text{ mA}_{\text{max}}$	[30 Ω - 100 Ω]
		con U_C	$\pm 10 \text{ mA}_{\text{max}}$	[100 Ω - 350 Ω]
		$\pm 15 \text{ V}$	$\pm 14 \text{ mA}_{\text{max}}$	[100 Ω - 190 Ω]

En base a la [Figura 3.16b](#)), se puede apreciar como el transductor de voltaje tiene dos circuitos, el circuito primario conformado por los terminales del generador fotovoltaico y por la resistencia primaria; en tanto que el circuito secundario está conformado por la resistencia de medida y las fuentes de voltaje. El uso del transductor de voltaje permite aislar galvánicamente el circuito primario del circuito secundario. Para medir el voltaje en los terminales del generador fotovoltaico, una corriente proporcional a dicho voltaje debe circular por R_{V1} , la cual está conectada en serie con el transductor. Esto genera un voltaje de menor magnitud en la resistencia R_{V2} , que es proporcional al voltaje del generador. Esta salida analógica se conecta al convertidor analógico-digital, el cual se comunica con el ordenador mediante una comunicación I2C, permitiendo que los datos sean almacenados.

Para calcular el voltaje en los terminales del generador fotovoltaico, se emplea la expresión [\(3.1\)](#).

$$V_1 = V_2 \cdot \left(\frac{R_{V1}}{R_{V2}} \right) \cdot \left(\frac{I_{PN}}{I_{SN}} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

- V_1 : Voltaje en los terminales del generador fotovoltaico [V].
- V_2 : Voltaje medido en R_{V2} [V].
- R_{V1} : Resistencia primaria [Ω].
- R_{V2} : Resistencia de medida [Ω].
- I_{PN} : Corriente Primaria Nominal LV 25-P[A].
- I_{SN} : Corriente Secundaria Nominal LV-25P [A].

3.3.2.2.2 Medición de Corriente

Para la medición de la corriente del generador fotovoltaico al momento del trazado de la curva I-V se emplea el transductor de corriente LAH 25-NP. En la [Figura 3.17a](#)) se observa una imagen del transductor, en la [Figura 3.17b](#)) se puede apreciar el circuito esquemático de este dispositivo y en la

Figura 3.17c) se observa la configuración empleada. La Tabla 3.5 contiene información relacionada a las características principales de este dispositivo.

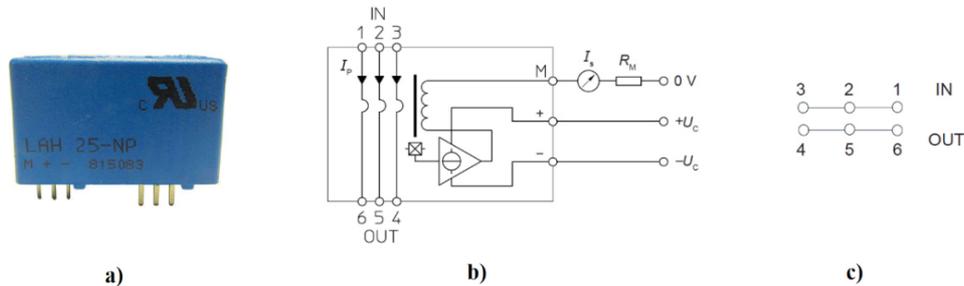


Figura 3.17. a) Transductor LAH 25-NP b) Circuito Esquemático y c) Conexión empleada [43].

Tabla 3.5. Características Principales del dispositivo LAH 25-P

Símbolo	Definición	Valor		
I_{PN}	Corriente Primaria Nominal	25 A		
I_{SN}	Corriente Secundaria Nominal	25 mA		
I_{PM}	Rango de medición corriente primaria	[0 A - 55 A]		
U_C	Fuente de voltaje	$\pm 12V, \pm 15 V$		
R_M	Resistencia de Medida	con U_C $\pm 12 V$	$T_A = 70 \text{ }^\circ\text{C, DC}$	[0 Ω - 284 Ω]
			$T_A = 80 \text{ }^\circ\text{C, DC}$	[0 Ω - 280 Ω]
		con U_C $\pm 15 V$	$T_A = 70 \text{ }^\circ\text{C, DC}$	[67 Ω - 398 Ω]
			$T_A = 80 \text{ }^\circ\text{C, DC}$	[70 Ω - 394 Ω]

En base a la Figura 3.17b), se puede apreciar como el transductor de corriente permite aislar galvánicamente el circuito primario del circuito secundario. El circuito primario debe estar en serie con el banco de capacitores de la etapa de fuerza, de tal manera que la corriente que circula a través del transductor sea la misma que la que atraviesa el banco de condensadores. Al circular la corriente por el lado primario, se produce una señal de voltaje proporcional a dicha corriente en el circuito secundario del transductor, específicamente en la resistencia de medida denominada R_M . Dicha señal de voltaje se conecta con el convertidor analógico-digital y de ahí con el ordenador, permitiendo que los datos sean almacenados. De esta manera se puede obtener la corriente para el trazado de la curva I-V del generador.



Para obtener el valor de la corriente que produce el generador fotovoltaico, se debe convertir la señal de voltaje obtenida del transductor en el valor correspondiente de corriente, para lo cual se emplea la expresión (3.2).

$$I_1 = V_2 \cdot \left(\frac{1}{R_M}\right) \cdot \left(\frac{I_{PN}}{I_{SN}}\right) \quad (3.2)$$

Donde:

- I_1 : Corriente producida por el generador fotovoltaico [A].
- V_2 : Voltaje medido en R_M [V].
- R_M : Resistencia de medida [Ω].
- I_{PN} : Corriente Primaria Nominal LAH 25-NP [A].
- I_{SN} : Corriente Secundaria Nominal LAH 25-NP [A].

3.3.2.2.3 Medición de Temperatura e Irradiancia

La medición de las condiciones ambientales (temperatura, irradiancia) al momento de trazar la curva I-V es de gran importancia para evaluar el rendimiento del sistema de generación fotovoltaico, esto independientemente del método empleado para el trazador [27]. Así, para que las curvas I-V obtenidas durante las pruebas puedan ser interpretadas de manera correcta, es necesario medir adecuadamente los valores de temperatura e irradiancia bajo las que se encuentra el módulo al momento de la obtención de las características corriente-voltaje, ya que, de acuerdo a lo mencionado previamente, estas condiciones tienen influencia en la forma de la curva y una medición incorrecta de las mismas puede introducir errores.

- *Medición de Irradiancia*

La medición de este parámetro suele ser la más grande fuente de error al momento de los análisis de rendimiento de los generadores fotovoltaicos. Es por esta razón que la medición de la irradiancia debe ser lo más precisa posible. Así, el sensor de irradiancia debe estar ubicado en el mismo plano que el generador fotovoltaico [27].

Para la medición de la irradiancia se emplea un piranómetro de la marca Apogee, específicamente el modelo SP-110. Este piranómetro emplea una tecnología de celda de silicio, y sus principales características se muestran en la [Tabla 3.6](#). Si bien las celdas solares de referencia permiten obtener mejores resultados en cuanto a la medición de la irradiancia en el trazado de la curva I-V [1], se emplea el piranómetro antes mencionado debido a que este



se encontraba disponible para su uso. En la [Figura 3.18a](#)) se muestra la imagen del sensor empleado.

Para obtener el valor de la irradiancia al momento de la obtención de la curva I-V, se debe convertir la señal de voltaje obtenida del sensor SP-110 en el valor correspondiente de irradiancia, para lo cual se emplea la expresión (3.3).

$$G = 5000 \cdot V_G \quad (3.3)$$

Donde:

- G : Irradiancia [W/m^2].
 - V_G : Voltaje del sensor de irradiancia SP-110 [V].
- *Medición de Temperatura*

Las características de la curva I-V medida y la eficiencia del módulo fotovoltaico son influenciadas directamente por la temperatura de operación del módulo [1], por lo cual la medición de este parámetro es de gran importancia. El sensor de temperatura debe estar ubicado en la parte posterior del módulo bajo análisis y con un excelente contacto térmico en el punto de conexión (módulo-sensor), para lo cual se usa cinta adhesiva térmica [1]; esto con el objetivo de que el sensor permita obtener la temperatura promedio trasera del generador fotovoltaico [27].

Para la medición de la temperatura del módulo fotovoltaico se emplea el dispositivo LM35 y sus principales características se muestran en la [Tabla 3.6](#). En la [Figura 3.18b](#)) se muestra la imagen del sensor empleado.

Para obtener el valor de la temperatura al momento de la obtención de la curva I-V, se debe convertir la señal de voltaje obtenida del sensor LM35 en el valor correspondiente de temperatura, para lo cual se emplea la expresión (3.4).

$$T = 100 \cdot V_{Temp} \quad (3.4)$$

Donde:

- T : Temperatura [$^{\circ}\text{C}$].
- V_{temp} : Voltaje del sensor de temperatura LM35 [V].

Puesto que las salidas del sensor de irradiancia y del sensor de temperatura son analógicas, estas se conectan a un convertidor analógico-digital antes de ser almacenados por el ordenador.

Tabla 3.6. Características Principales de los dispositivos SP-110 y LM-35.

SENSOR DE IRRADIANCIA SP-110	
Sensibilidad	0.2 mV/Wm ⁻²
Factor de calibración	5 Wm ⁻² /mV
Rango de salida calibrado	0 – 400 mV
SENSOR DE TEMPERATURA LM35	
Resolución	10 mV/°C
Rango de Temperatura	-55°C – 150°C
Precisión asegurada	0.5 °C (a 25 °C)
Precisiones típicas	± 1/4 °C a temperatura ambiente ± 3/4 °C en el rango -55°C – 150°C



Figura 3.18. a) Sensor de Irradiancia SP-110 b) Sensor de Temperatura LM35

3.3.2.2.4 Adquisición de Datos

Acorde con lo mencionado previamente, el Raspberry Pi es el ordenador del sistema propuesto, el cual permite recopilar las señales provenientes de los sensores para su análisis y almacenamiento. Sin embargo, debido a que el Raspberry Pi no admite señales analógicas, se usa convertidor analógico-digital ADC externo para digitalizar las señales de los sensores y de ahí transmitir las al Raspberry Pi. EL trazador I-V propuesto utiliza el ADS1015. Este ADC admite cuatro señales analógicas, lo que coincide con las salidas de los cuatro sensores empleados, y se comunica con el ordenador para la



adquisición de los datos por medio de una comunicación I2C. Una imagen del ADS1015 en la [Figura 3.19](#).

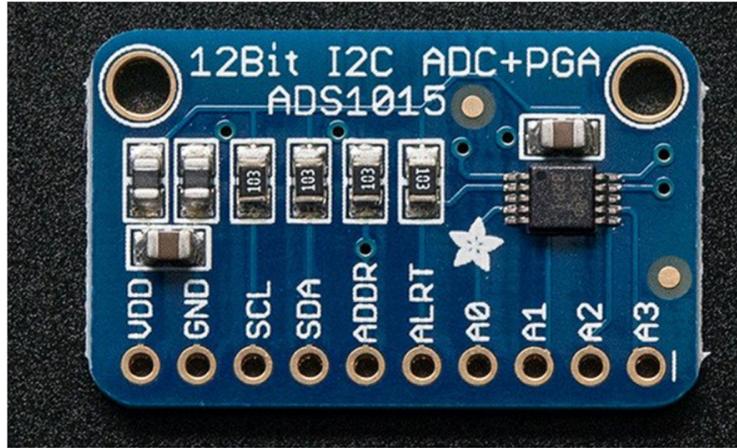


Figura 3.19. Convertidor Analógico-Digital ADS1015 [44].

El ADS1015 es un ADC de 12 bits que tiene diferentes frecuencias de muestreo programables, por lo cual permite controlar el número de muestras por segundo (sps); así el ADC tiene siete frecuencias de muestreo diferentes que van desde 128 sps hasta 3300 sps. Además, este dispositivo 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. Toda la programación de este dispositivo se hace en el script desarrollado en Python ([sección 3.7](#)).

Las frecuencias de muestreo programables de este convertidor se presentan en la [Tabla 3.7](#), así como también el tiempo de obtención por cada muestra. En el caso del trazador de curvas I-V construido, siempre se emplea el valor máximo de frecuencia de muestreo del ADC (3300 sps), de tal manera que exista una mayor cantidad de puntos para caracterizar las curvas I-V. En la [Tabla 3.8](#) se muestra los distintos voltajes de referencia que pueden programarse y el correspondiente tamaño del bit menos significativo LSB de cada ADC.

Tabla 3.7. Frecuencias de Muestreo y Tiempo por muestra del ADS1115 y del ADS1015.

ADS1015	
Frecuencia de Muestreo (sps)	Tiempo por muestra (ms)
128	7.8125
250	4
490	2.0408
920	1.0870



1600	0.6250
2400	0.4167
3300	0.3030
-	-

Tabla 3.8. Voltaje de Referencia y tamaño del LSB de los ADC ADS1115 y del ADS1015.

Voltaje de Referencia	ADS1015
	LSB [mV]
± 6.144 V	3
± 4.096 V	2
± 2.048 V	1
± 1.024 V	0.5
± 0.512 V	0.25
± 0.256 V	0.125

3.3.2.2.5 Trazado de la curva I-V y almacenamiento de la información

El ordenador (Raspberry Pi) es el encargado de trazar la curva I-V correspondiente y de almacenar la información obtenida durante el proceso de medición. Esta fase es controlada por un programa desarrollado en Python. Dicho programa se detalla con mayor profundidad en la [sección 3.7](#).

3.3.2.3 Circuitos de Alimentación

La etapa de alimentación está conformada por una conexión a la red eléctrica de 110V AC, una fuente de voltaje de 5V/5A y cuatro fuentes de voltaje de 12V/0.25 A. La conexión de 110V AC permite la alimentación de todas las fuentes de voltaje del equipo y forma parte del circuito de selección de la configuración del banco de capacitores, puesto que las bobinas de los contactores operan a ese voltaje. La fuente de 5V alimenta todos los componentes electrónicos de los circuitos de control, incluido el Raspberry Pi. Dos de las cuatro fuentes de 12 V son necesarias para los sensores de voltaje y corriente, ya que estos necesitan una alimentación de 0V, +12 V y -12 V para su funcionamiento. Así, se emplean dichas fuentes para obtener los valores de voltaje requeridos. Las restantes fuentes de 12 V se emplean para el disparo de los transistores IGBT1 e IGBT2 respectivamente, puesto que se requiere que las fuentes de voltaje empleadas para este propósito sean independientes de los demás circuitos de alimentación.



3.3.2.4 Lista de materiales empleados en la Etapa de Control y Adquisición de Datos

Los componentes empleados en la Etapa de Control y Adquisición de Datos se muestran en la [Tabla 3.9](#).

Tabla 3.9. Lista de componentes empleados en la etapa de control y adquisición de datos.

CIRCUITOS DE CONTROL		
Controlador		
Descripción	Componente	Cantidad
Controlador	Raspberry Pi 3 Modelo B	1
Circuitos de Disparo de los Transistores IGBT		
Descripción	Componente	Cantidad
R1	Resistencia 1 k Ω	2
R2	Resistencia 10 k Ω	2
R3	Resistencia 330 Ω	2
R4	Resistencia 220 Ω	2
R5	Resistencia 10 k Ω	2
T1	Transistor NPN 2N4401	2
O1	Optoacoplador 4N33	2
Circuito para iniciar el proceso de obtención de la curva I-V		
Descripción	Componente	Cantidad
P1	Pulsante	1
R6	Resistencia 560 Ω	1
R7	Resistencia 1 k Ω	1
O2	Optoacoplador 4N33	1
Circuito de selección de la configuración del banco de capacitores		
Descripción	Componente	Cantidad
R8	Resistencia 470 Ω	4
R9	Resistencia 220 Ω	4
O3	Optoacoplador MOC3063	4
TR	Triac	4
SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS		
Medición de Voltaje		
Descripción	Componente	Cantidad



Sensor de Voltaje	LV25-P	1
Rv1	MPC108503J 50 k Ω (Resistencia Total 100 k Ω)	2
Rv2	Resistencia 270 Ω (Resistencia Total 135 Ω)	2
Medición de Corriente		
Descripción	Componente	Cantidad
Sensor de Corriente	LAH 25-NP	1
RM	Resistencia 220 Ω	1
Medición de Temperatura e Irradiancia		
Descripción	Componente	Cantidad
Sensor de Irradiancia	SP-110	1
Sensor de Temperatura	LM35	1
Adquisición de Datos		
Descripción	Componente	Cantidad
ADC	ADS1015	1
CIRCUITOS DE ALIMENTACIÓN		
Descripción	Componente	Cantidad
Fuente de 5V	RS-25-5 5V/5A	1
Fuente de 12V	HLK-PM12 12V/0.25A	4

3.4 Construcción del prototipo

3.4.1 Diagrama Electrónico

Una vez finalizado el diseño eléctrico presentado en la [sección 3.3](#), se realiza el diagrama electrónico en el software Altium Designer. De la [Figura 3.20](#) a la [Figura 3.23](#) se muestran los diagramas desarrollados.

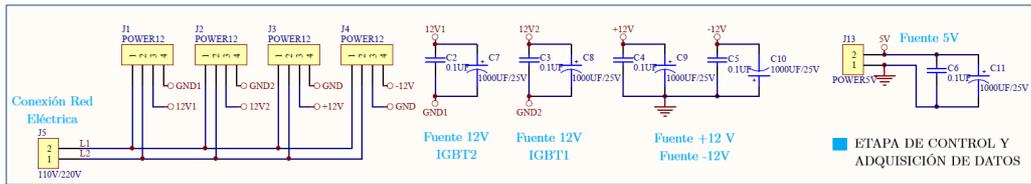


Figura 3.20. Diagrama Electrónico. Parte 1.

En la Figura 3.20 se muestra todos los circuitos de alimentación del trazador de curvas I-V propuesto. Se puede observar como las fuentes de 5V,+12V y -12V tienen la misma referencia, en tanto que las fuentes de 12V empleadas para el disparo de los IGBT son independientes. Se emplea capacitores a la salida de las fuentes para mantener los niveles de voltaje constantes.

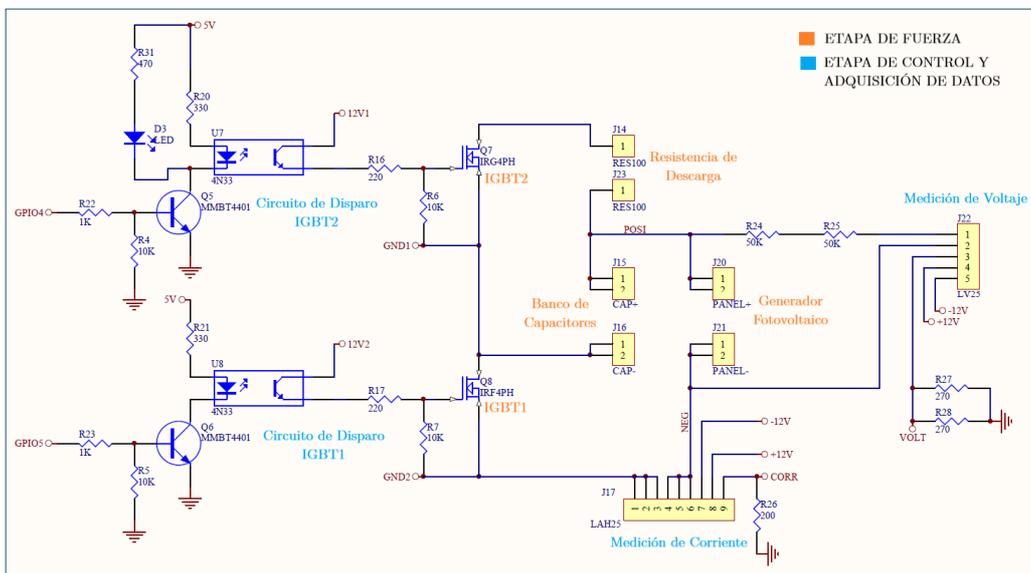


Figura 3.21. Diagrama Electrónico. Parte 2.

En la Figura 3.21 se muestra el diagrama electrónico de los circuitos de disparo de los transistores IGBT y de los circuitos de medición de voltaje y corriente. De igual manera, se muestra las conexiones de los componentes de la etapa de fuerza como lo son los transistores IGBT, el generador fotovoltaico, el banco de capacitores y la resistencia de descarga. Se coloca un led en el circuito de disparo del IGBT2 que indica cuando el proceso de descarga de los capacitores está activado, esto como una medida de seguridad.

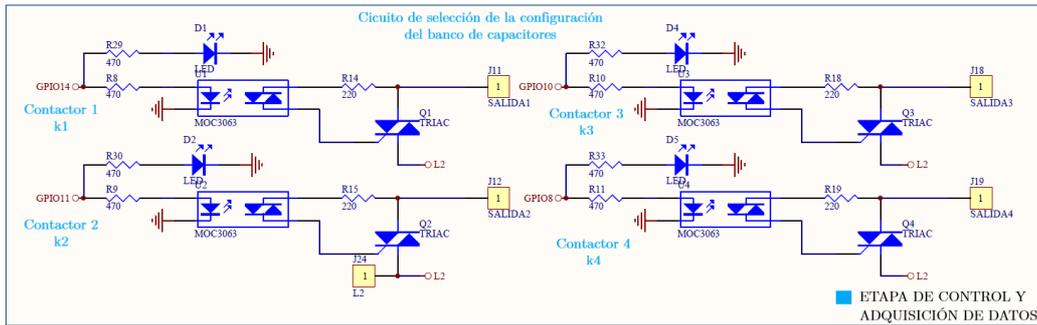


Figura 3.22. Diagrama Electrónico. Parte 3.

En la [Figura 3.22](#) se observa el diagrama electrónico de los circuitos de control de los cuatro contactores empleados en el trazador de curvas I-V propuesto, los cuales en conjunto conforman el circuito de selección de la configuración del banco de capacitores. Se emplea diodos led que indican que contactores están activos.

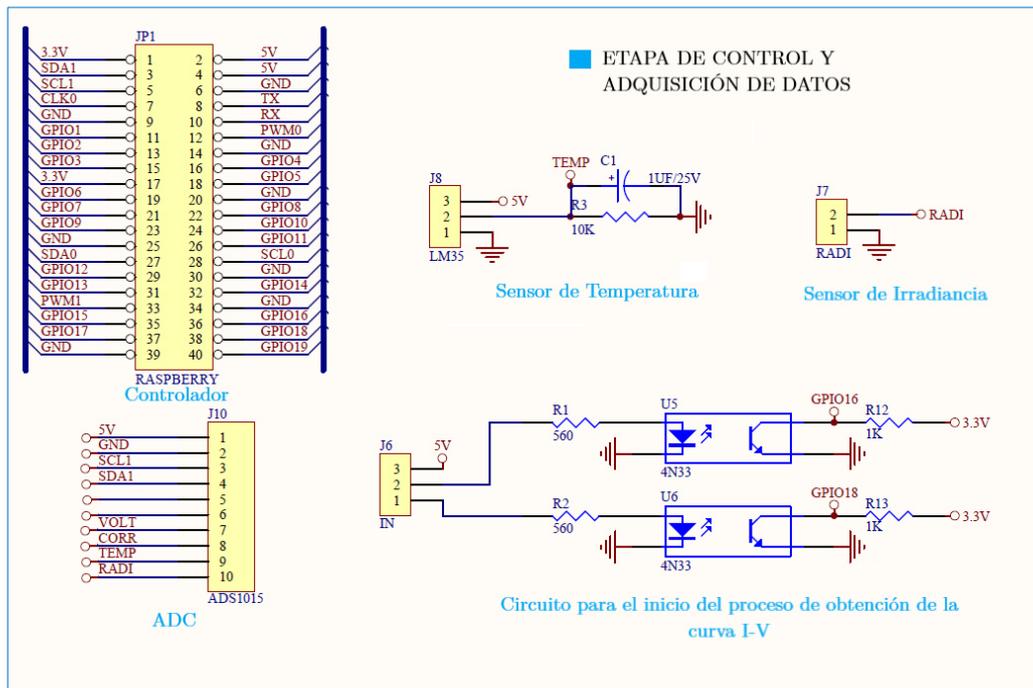


Figura 3.23. Diagrama Electrónico. Parte 4.

En la [Figura 3.23](#) se observa el diagrama electrónico del Raspberry Pi (controlador), del ADC, de los sensores de temperatura e irradiancia, y del circuito de inicio del proceso de obtención de la curva I-V.



3.4.2 Construcción del Trazador de curvas I-V

Una vez realizado del diagrama electrónico del trazador de curvas I-V propuesto, se precede a la construcción del prototipo.

Se construye la placa de circuito impreso PCB. En los [Anexos 1 - 3](#) se presentan imágenes relacionadas al proceso de construcción de la PCB; así, en el [Anexo 1](#) se muestra el esquema de la placa de circuito impreso PCB, en el [Anexo 2](#) se muestra la PCB construida y en el [Anexo 3](#) se muestra la PCB con los componentes ya ensamblados. Una vez terminada la construcción de la PCB, esta placa junto con los otros componentes (breaker DC, contactores, fuente de 5V, capacitores, tablet, etc.) se colocan en un gabinete eléctrico plástico ([Anexo 4](#) y [Anexo 5](#)), se distribuyen adecuadamente y finalmente, se realizan todas las conexiones necesarias. El equipo final construido se puede apreciar en la [Figura 3.24](#).

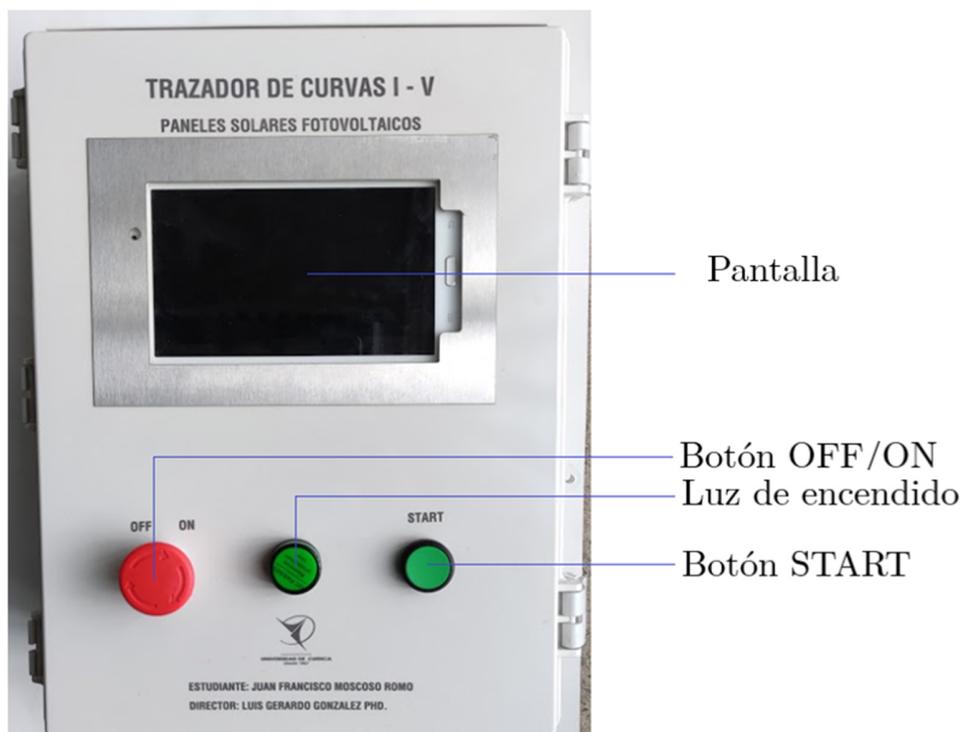


Figura 3.24. Trazador de curvas I-V construido. Parte exterior superior.

En la [Figura 3.24](#) se puede observar la parte exterior superior del trazador de curvas I-V construido junto con sus componentes. La pantalla acoplada al equipo es una tablet, la cual sirve como medio de visualización. La luz de encendido sirve como un indicador de que el equipo está conectado a la red eléctrica (110 V). El botón START sirve para iniciar el proceso de obtención de la curva I-V, una vez iniciado el programa correspondiente desarrollado en Python. Además, se agrega el botón OFF/ON como mecanismo de seguridad, ya que permite desconectar rápidamente la alimentación del equipo



en caso de alguna falla, con lo cual se apagan todas las fuentes de alimentación internas, y por ende todo el equipo (IGBT, contactores, etc.).

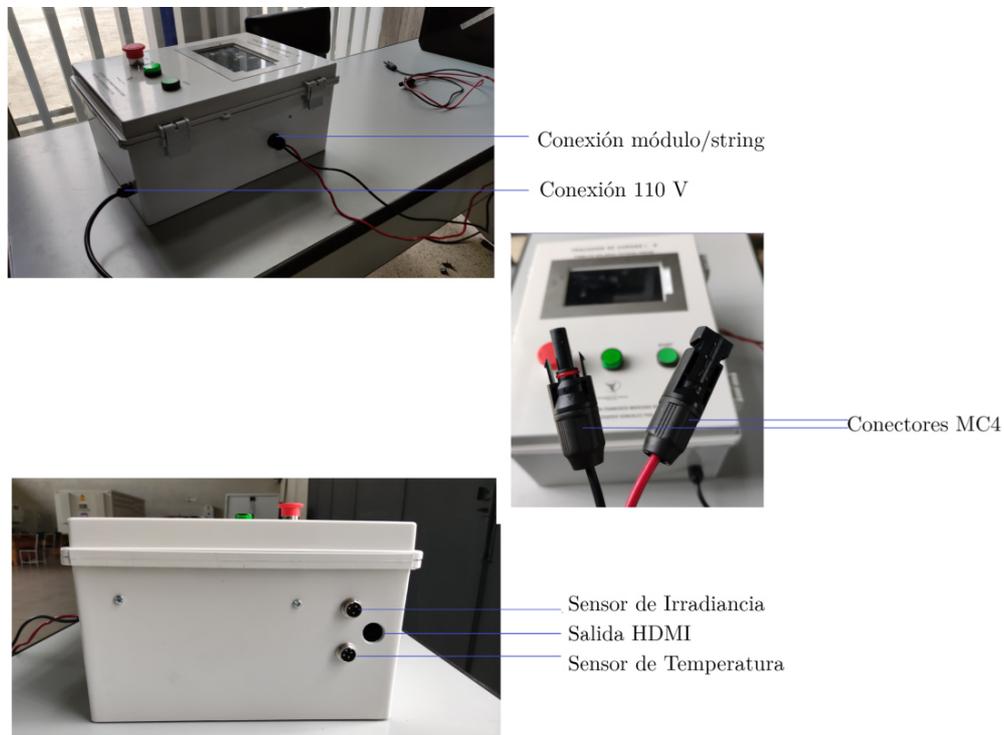


Figura 3.25. Trazador de curvas I-V construido. Partes exteriores laterales.

En la [Figura 3.25](#) se puede observar imágenes de las partes laterales del trazador de curvas I-V construido. La conexión del panel/string fotovoltaico se lo realiza por medio de conectores MC4, de tal manera que no existan errores al conectar los terminales del generador fotovoltaico al equipo. Puesto que el sensor de temperatura e irradiancia se ubican junto al panel/string bajo prueba (parte exterior del equipo), se emplea conectores ubicados en la parte lateral, de tal manera que las señales correspondientes de los sensores se conecten con el ADC para que puedan ser captadas. Además, se dispone de una salida para un cable HDMI en caso de emplear una pantalla con este tipo de conexión.



Figura 3.26. Trazador de curvas I-V construido. Parte Interior.

En la [Figura 3.26](#) se observa la parte interior del equipo construido, la cual contiene el banco de capacitores, contactores, resistencias de equilibrio, breaker DC, resistencia de descarga, PCB, fuente de 5 V y el Raspberry Pi 3B. Todos los componentes están distribuidos y conectados de manera adecuada para que el trazador opere correctamente.

3.5 Características del trazador de curvas I-V desarrollado

En esta sección se revisa las propiedades del trazador de curvas I-V construido. Las propiedades del equipo que se analizan son las siguientes: capacitancia, velocidad de barrido, tiempo de descarga, rangos de operación, resolución y tamaño.

3.5.1 Capacitancia

Se puede obtener cuatro valores distintos de capacitancia de acuerdo a la configuración empleada del banco de condensadores ([Tabla 3.1](#)). Entonces, al emplear los capacitores BHC de 4400 μF , los valores de capacitancia del trazador I-V construido son los que se presentan en la [Tabla 3.10](#).

Tabla 3.10. Valores de la capacitancia total de acuerdo a la configuración del banco de capacitores.

Nombre de la Configuración	Capacitancia Equivalente C_T	Voltaje Máximo de Operación
3C Serie	$C_T = 1466.667 \mu\text{F}$	500 V
1C	$C_T = 4400 \mu\text{F}$	450 V



2C Paralelo	$C_T = 8800 \text{ uF}$	450 V
3C Paralelo	$C_T = 13200 \text{ uF}$	450 V

La elección de la configuración del banco de capacitores depende de las características del generador fotovoltaico del cual se pretende obtener la respectiva curva I-V y del tiempo en el cual se quiere obtener la curva.

3.5.2 Rangos de Operación

El rango de operación hace referencia a los valores máximos de voltaje y corriente que el trazador de curvas I-V es capaz de medir. En el caso del equipo construido, el voltaje máximo que puede ser medido es de 500 V y la corriente máxima que puede ser medida es de 16 A.

El valor máximo de 500 V se debe a que el sensor de voltaje LV 25-P está diseñado para medir voltajes nominales de hasta 500 V. El resto de los equipos de la etapa de fuerza pueden operar normalmente a dicho voltaje, ya que los valores máximos de operación de los mismos se encuentran en valores superiores, tal como se muestran en la [Tabla 3.2](#). Si bien los capacitores empleados tienen una clasificación máxima de voltaje de 450 V, el arreglo en serie de los mismos (Configuración 3C Serie), permite operar tranquilamente a voltajes de 500 V. De igual manera, los cables empleados para las conexiones tienen un aislamiento de 600 V, por lo cual pueden operar sin ningún problema al voltaje máximo para el cual está diseñado el equipo.

La corriente máxima de 16 A se debe a que esta es la corriente nominal del breaker DC empleada en el equipo construido. Los demás equipos de la etapa de fuerza pueden operar normalmente a este nivel de corriente. Además, al tener tiempos de obtención de la curva pequeños (<1 segundo) se evita el calentamiento de los dispositivos del equipo.

3.5.2.1 Rango Máximo de Voltaje y Corriente del ADC

Es muy importante mencionar la relación que existe entre el rango máximo de medición del ADC y su configuración, ya que, dependiendo del voltaje de referencia escogido, se tiene diversos valores máximos que es capaz de medir el ADC. Así, de acuerdo a las ecuaciones (3.1) y (3.2); y a los valores mostrados en las [Tablas 3.4, 3.5, 3.8, 3.9](#), se puede calcular el rango máximo de voltaje y corriente que puede medir el ADC dependiendo de su voltaje de referencia.

3.5.2.1.1 Rango Máximo de Voltaje del ADC

Para calcular el rango máximo de voltaje del ADC, se reemplaza el valor de V_2 de la ecuación (3.1) por el valor del voltaje de referencia V_{ref} del ADC, teniéndose así la ecuación (3.5).



$$\text{Rango M\u00e1ximo de Voltaje} = (V_{ref}) \cdot \left(\frac{R_{V1}}{R_{V2}}\right) \cdot \left(\frac{I_{PN}}{I_{SN}}\right) \quad (3.5)$$

Empleando los valores de I_{PN} , I_{SN} de la [Tabla 3.4](#), R_{V1} , R_{V2} de la [Tabla 3.9](#), y reemplazando los valores de V_{ref} de la [Tabla 3.8](#) en la ecuaci\u00f3n (3.5), se tiene los distintos rangos m\u00e1ximos de voltaje del trazador de curvas I-V construido. Dichos rangos m\u00e1ximos se muestran en la [Tabla 3.11](#).

Tabla 3.11. Rango M\u00e1ximo de Voltaje de acuerdo a la configuraci\u00f3n del ADC

Voltaje de Referencia ADC	ADS1015
	Rango M\u00e1ximo de Voltaje [V]
± 6.144 V	1820.444
± 4.096 V	1213.630
± 2.048 V	606.815
± 1.024 V	303.407
± 0.512 V	151.704
± 0.256 V	75.852

3.5.2.1.2 Rango M\u00e1ximo de Corriente del ADC

Para calcular el rango m\u00e1ximo de corriente del ADC, se reemplaza el valor de V_2 de la ecuaci\u00f3n (3.2) por el valor del voltaje de referencia V_{ref} del ADC, teni\u00e9ndose as\u00ed la ecuaci\u00f3n (3.6).

$$\text{Rango M\u00e1ximo de Corriente} = V_{ref} \cdot \left(\frac{1}{R_M}\right) \cdot \left(\frac{I_{PN}}{I_{SN}}\right) \quad (3.6)$$

Empleando los valores de I_{PN} , I_{SN} de la [Tabla 3.5](#), R_M de la [Tabla 3.9](#), y reemplazando los valores de V_{ref} de la [Tabla 3.8](#) en la ecuaci\u00f3n (3.6), se tiene los distintos rangos m\u00e1ximos de corriente del trazador de curvas I-V construido. Dichos rangos m\u00e1ximos se muestran en la [Tabla 3.12](#).

Tabla 3.12. Rango M\u00e1ximo de Corriente de acuerdo a la configuraci\u00f3n del ADC

Voltaje de Referencia ADC	ADS1015
	Rango M\u00e1ximo de Corriente [A]
± 6.144 V	27,927
± 4.096 V	18,618
± 2.048 V	9,309



± 1.024 V	4,655
± 0.512 V	2,327
± 0.256 V	1,164

3.5.2.1.3 Rango Máximo de Voltaje/Corriente del ADC empleados en el equipo

En el caso del equipo construido, se emplea únicamente dos valores de voltajes de referencia del rango total del ADC, siendo estos los voltajes de $+4.096$ V y $+2.048$ V. Los dos voltajes de referencia empleados permiten medir sistemas de generación fotovoltaicos con voltajes de circuito abierto iguales o inferiores a las especificaciones máximas del equipo (500 V); y en el caso de la corriente, al emplear $V_{ref}=+4.096$ V se puede medir sistemas con corrientes de cortocircuito iguales o inferiores a las especificaciones máximas del equipo (16 A) o corrientes de cortocircuito iguales o inferiores a 9.309 A con $V_{ref}=+2.048$ V. La utilización del voltaje de referencia de $+2.048$ V permite obtener una mejor resolución en las mediciones de voltaje y corriente, sin embargo, se debe tomar en consideración la limitación de la medición de la corriente de cortocircuito.

3.5.3 Resolución

La resolución hace referencia a las variaciones más pequeñas de voltaje y corriente que pueden ser captadas por el trazador de curvas I-V [3]. En el caso del equipo construido, la resolución depende del ADC empleado y de la configuración de su voltaje de referencia ($+4.096$ V o $+2.048$ V). Así, de acuerdo a las ecuaciones (3.1) y (3.2); y de los valores mostrados en las Tablas 3.4, 3.5, 3.8, 3.9, se puede calcular la resolución en la medición de voltaje y en la medición de corriente respectivamente.

3.5.3.1 Resolución en la Medición de Voltaje

Para calcular la resolución en la medición de voltaje, se reemplaza el valor de V_2 de la ecuación (3.1) por el valor del LSB del ADC, teniéndose así la ecuación (3.7).

$$\text{Resolución Voltaje} = LSB \cdot \left(\frac{R_{V1}}{R_{V2}} \right) \cdot \left(\frac{I_{PN}}{I_{SN}} \right) \quad (3.7)$$

Empleando los valores de I_{PN} , I_{SN} de la Tabla 3.4, R_{V1} , R_{V2} de la Tabla 3.9, y reemplazando los valores de LSB de la Tabla 3.8 en la ecuación (3.7), se tiene las distintas resoluciones en la medición de voltaje del trazador de curvas I-V construido. Dichas resoluciones se muestran en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Resolución de Voltaje de acuerdo a la configuración del ADC

Voltaje de Referencia ADC	ADS1015
	Resolución Voltaje [mV]
± 4.096 V	592,593
± 2.048 V	296,296



3.5.3.2 Resolución de la medición de Corriente

Para calcular la resolución en la medición de corriente, se reemplaza el valor de V_2 de la ecuación (3.2) por el valor del LSB del ADC, teniéndose así la ecuación (3.8).

$$\text{Resolución Corriente} = \text{LSB} \cdot \left(\frac{1}{R_M}\right) \cdot \left(\frac{I_{PN}}{I_{SN}}\right) \quad (3.8)$$

Empleando los valores de I_{PN} , I_{SN} de la Tabla 3.5, R_M de la Tabla 3.9, y reemplazando los valores de LSB de la Tabla 3.8 en la ecuación (3.8), se tiene los distintos rangos máximos de corriente del trazador de curvas I-V construido. Dichas resoluciones se muestran en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14. Resolución de Voltaje de acuerdo a la configuración del ADC

Voltaje de Referencia ADC	ADS1015
	Resolución Corriente [mA]
± 4.096 V	9,091
± 2.048 V	4,545

3.5.4 Velocidad de Barrido

La velocidad de barrido hace referencia al tiempo en el cual se obtiene toda la curva I-V, desde la condición de cortocircuito hasta la condición de circuito abierto. Es muy importante que la velocidad de barrido sea rápida, esto con el objetivo de que todos los puntos de la curva I-V se obtengan bajo las mismas condiciones de temperatura e irradiancia [3]. Además, se menciona que el tiempo de obtención de la curva I-V es superior al valor que se obtiene empleando la ecuación (2.23), por lo cual se emplea para este trabajo la ecuación desarrollada por [45] para el cálculo de la capacitancia, de la cual se deriva el tiempo de obtención de la curva. La ecuación desarrollada por [45] es la (3.9).

$$C = 0.55 \cdot t_C \cdot \frac{I_{SC}}{V_{OC}} \quad (3.9)$$

C corresponde al valor de la capacitancia, t_C corresponde al tiempo de carga del condensador (tiempo de obtención de la curva I-V), I_{SC} es la corriente de cortocircuito y V_{OC} es el voltaje de circuito abierto del módulo/string fotovoltaico bajo análisis. Despejando t_C de la ecuación (3.9) se tiene:

$$t_C = \frac{1}{0.55} \cdot C \cdot \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (3.10)$$



La ecuación (3.10) se emplea en este trabajo para calcular el tiempo de obtención de la curva I-V. De acuerdo con la ecuación (3.10), se observa como el tiempo de obtención de la curva es influenciado directamente por el valor de la capacitancia C . El valor de C puede ser de cuatro valores diferentes de acuerdo a la configuración del banco de capacitores (ver Tabla 3.10). Así, mientras más alto sea el valor C , mayor será el tiempo de obtención de la curva; y mientras más pequeño sea el valor de C , el tiempo de obtención de la curva será menor. Asimismo, se puede apreciar como el tiempo de obtención de la curva guarda relación con los valores de V_{OC} y de I_{SC} ; y, de acuerdo con [46], es aconsejable emplear condensadores con capacitancias pequeñas para cadenas fotovoltaicas grandes, en tanto que para módulos fotovoltaicos individuales es aconsejable emplear condensadores con capacitancias más elevadas.

3.5.5 Tiempo de Descarga

Una vez finalizada la obtención de la curva, es necesario descargar los condensadores, para que el equipo quede listo para una próxima medición. Asimismo, si se quiere realizar algún ajuste en el interior del equipo, es necesario que los condensadores estén completamente descargados, esto por razones de seguridad. Por lo tanto, resulta muy importante determinar el tiempo de descarga de los condensadores, el cual debe estar programado de manera correcta de acuerdo al valor de la capacitancia empleada y al valor de la resistencia de descarga. El circuito de descarga es prácticamente un circuito RC, por lo cual el tiempo de descarga puede aproximarse a la expresión (3.11).

$$t_{descarga} \geq 5 \cdot R_{descarga} \cdot C \quad (3.11)$$

Donde:

- $t_{descarga}$: Tiempo de descarga del banco de capacitores [s].
- $R_{descarga}$: Resistencia de descarga [Ω].
- C : Capacitancia [F]

La expresión “ \geq ” en la ecuación (3.11) se debe a que, si bien el banco de capacitores se descarga un 99.33% de su valor inicial luego de cinco periodos de tiempo o 5τ ($\tau = R_{descarga} \cdot C$), se debe considerar un margen extra de tiempo cuando se trabajan con strings fotovoltaicos con $V_{OC} \geq 148V$, esto para garantizar que el voltaje del banco de condensadores siempre sea menor a 1V al finalizar la descarga.

Con el valor de $R_{descarga} = 500 \Omega$ y con los valores de C mostrados en la Tabla 3.10, se procede a calcular los tiempos de descarga del banco de condensadores de acuerdo a su configuración. Los resultados de estos cálculos se presentan en la Tabla 3.15.



Tabla 3.15. Tiempos de Descarga del Banco de Capacitores de acuerdo a su configuración.

Nombre de la Configuración	Capacitancia C_T	Resistencia de Descarga	Tiempo de Descarga ($\geq 5 \cdot R_{descarga} \cdot C$)
3C Serie	1466.667 μ F	500 Ω	$\geq 3,67$ s
1C	4400 μ F		$\geq 11,00$ s
2C Paralelo	8800 μ F		$\geq 22,00$ s
3C Paralelo	13200 μ F		$\geq 33,00$ s

Como se observa en la [Tabla 3.15](#), el mayor tiempo de descarga se obtiene con la configuración 3C Paralelo, en tanto que el menor tiempo de descarga se obtiene con la configuración 3C Serie.

3.5.6 Tamaño y Costo del Equipo

Los tamaños de los trazadores de curvas I-V deben ser pequeños, de tal manera que estos puedan transportarse al sitio de pruebas de manera fácil [3]. Así, el trazador de curvas I-V construido está diseñado justamente para ser un equipo de fácil transporte, de tal manera que pueda ser empleado sin ninguna complicación en sitios que tienen generación fotovoltaica. Un resumen de las dimensiones del equipo y su peso se presenta en la [Tabla 3.16](#).

Tabla 3.16. Dimensiones y Peso del Trazador de curvas I-V construido.

Dimensiones del Equipo	50 cm×40 cm×29 cm
Peso del Equipo	7 kg

En cuanto al costo total del equipo, un resumen de los costos de los materiales empleados para la construcción del trazador de curvas I-V se presenta en la [Tabla 3.17](#). De acuerdo a esa tabla, se puede observar como el costo total del equipo es de \$1069. Al comparar este valor con respecto al precio del trazador de curvas I-V comercial Solmetric PVA-600 (\$3895), que tiene características similares a las del equipo construido (600 V, 20 A), se puede apreciar que el trazador de curvas I-V construido es más económico.

Tabla 3.17. Costo de los Materiales Empleados para la construcción del.

Componente	Precio (\$)
1 gabinete Eléctrico	70
1 breaker DC	10
2 transistores IGBT	12



3 capacitores Electrolíticos de Aluminio	210
4 contactores	120
3 resistencias de Equilibrio	18
1 Resistencia de Descarga	13
1 Raspberry Pi 3 Modelo 3B	70
1 sensor LV 25-P	70
1 sensor LAH 25-NP	20
1 piranómetro SP-110	300
1 ADC 1015	16
1 Fuente de 5V/5A	12
4 Fuente de 12V/3W	28
Otros	100
TOTAL	1069

3.6 Simulación del sistema propuesto

Para ejemplificar el funcionamiento del trazador de curvas I-V construido, se realiza una simulación en el software PSIM. En la [Figura 3.27](#) se puede apreciar el circuito desarrollado en PSIM.

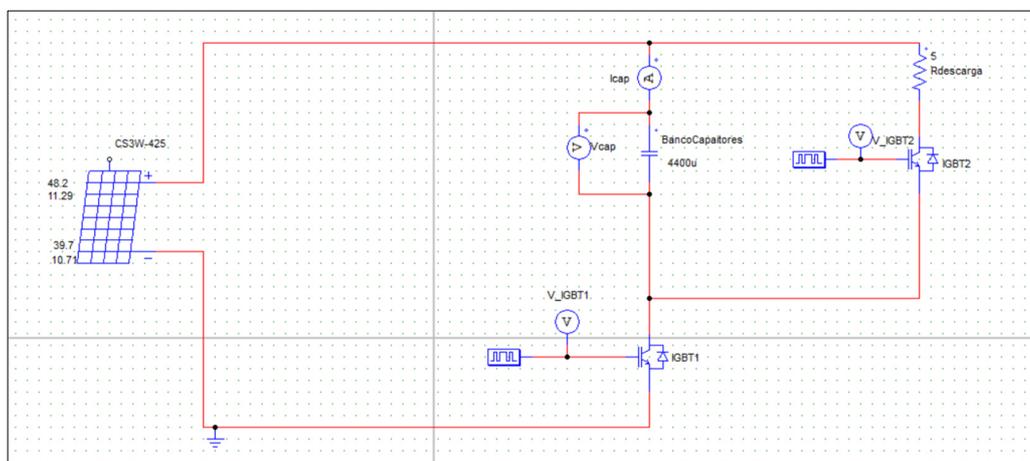


Figura 3.27. Simulación del Funcionamiento del Trazador de curvas I-V realizada en PSIM.

Se emplea los datos del módulo fotovoltaico CS3W-420P, presentados en la [Tabla 2.4](#), para la simulación del generador fotovoltaico. Además, por simplicidad del modelo, se omite el circuito de selección del banco de capacitores y se simplifica los circuitos de disparo de los transistores IGBT. Así, para el circuito modelado se emplea la configuración 1C ($C_T = 4400 \mu\text{F}$) para el banco de



capacitores. Empleando las ecuaciones (3.10) y (3.11) para calcular los tiempos de carga y de descarga del banco de capacitores, se obtuvieron los siguientes resultados:

- *Tiempo de carga del banco de capacitores*

Reemplazando los valores de $C = 4400 \text{ uF}$, $V_{OC} = 48.2 \text{ V}$ e $I_{SC} = 11.29 \text{ A}$ en la ecuación (3.10), se obtuvo el tiempo de carga del banco de capacitores, y por ende el tiempo de obtención de la curva I-V. Así:

$$t_C = \frac{1}{0.55} \cdot C \cdot \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$
$$t_C = \frac{1}{0.55} \cdot (4400 \text{ uF}) \cdot \frac{(48.2 \text{ V})}{(11.29 \text{ A})} = 34.1541 \text{ ms}$$

- *Tiempo de Descarga del banco de capacitores*

En la Tabla 3.15 se muestra el tiempo de descarga del banco de capacitores al emplear la configuración 1C, el cual es el resultado de reemplazar los valores de $C = 4400 \text{ uF}$ y $R_{descarga} = 500 \text{ } \Omega$ en la ecuación (3.11). Así, se tiene:

$$t_{descarga} \geq 11 \text{ s}$$

En la simulación, se atenúa la resistencia de descarga 100 veces, de tal manera que exista una mejor visualización de las curvas obtenidas en la simulación, por lo tanto, se emplea $R_{descarga} = 5 \text{ } \Omega$, con lo cual se tiene:

$$t_{descarga} \geq 110 \text{ ms en PSIM.}$$

Una vez calculados los tiempos de carga y descarga del banco de condensadores, se procede a coordinar los tiempos de disparo de los dos transistores IGBT. Así:

- *Tiempo de disparo del transistor IGBT₁*

Para el transistor IGBT₁, se asume que el transistor conduce durante un tiempo igual al tiempo de carga del banco de condensadores. Además, se asume que este transistor empieza a conducir a partir de un tiempo $t_1 = 10 \text{ ms}$, y, por lo tanto, finaliza su estado de conducción en el tiempo $t_2 = 44.1541 \text{ ms}$.

- *Tiempo de disparo del transistor IGBT₂*

Para el transistor IGBT₂, se asume que el transistor conduce durante un tiempo igual al tiempo mínimo de descarga del banco de condensadores (110 ms). Además, se asume que este



transistor empieza a conducir a partir de un tiempo $t_3 = 100 \text{ ms}$, y, por lo tanto, finaliza su estado de conducción en el tiempo $t_4 = 210 \text{ ms}$.

Con todos los valores calculados, se efectúa la simulación correspondiente en PSIM y se obtiene las curvas voltaje-tiempo y corriente-tiempo correspondientes al banco de condensadores.

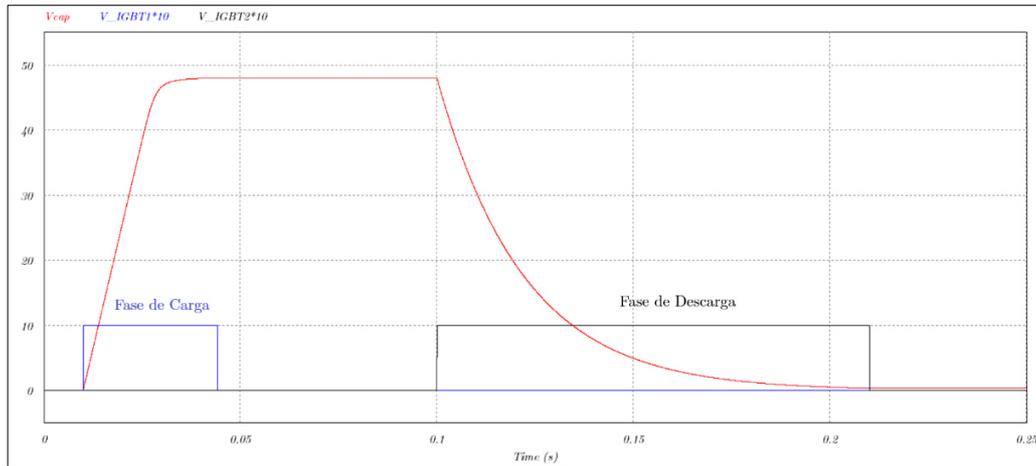


Figura 3.28. Curva voltaje vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM.

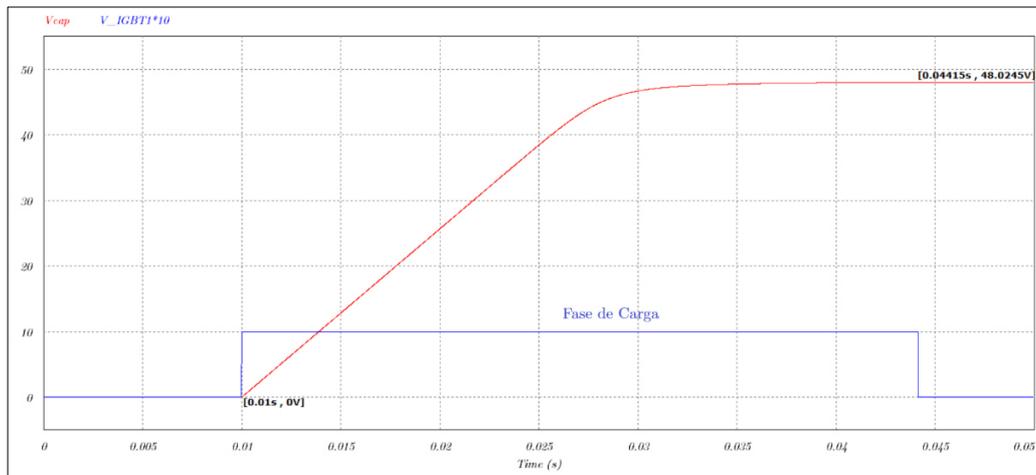


Figura 3.29. Curva voltaje vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM – Fase de Carga.

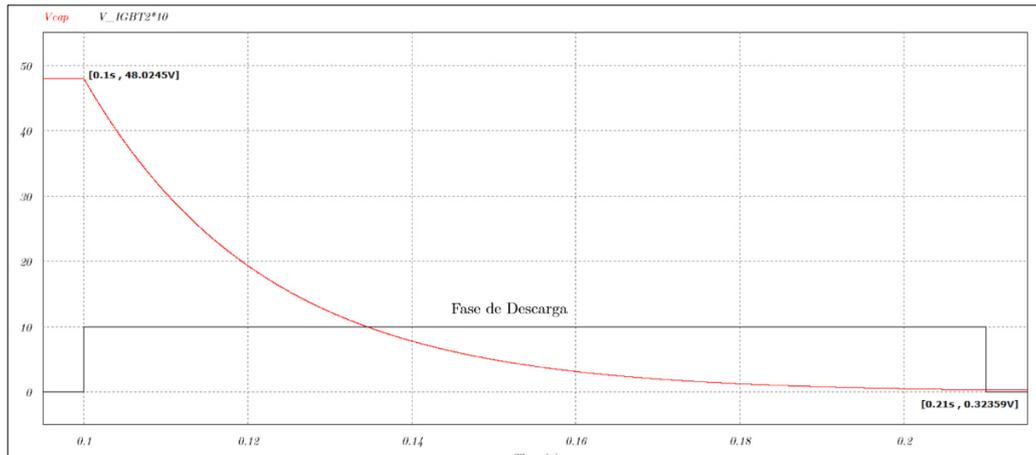


Figura 3.30. Curva voltaje vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM – Fase de Descarga.

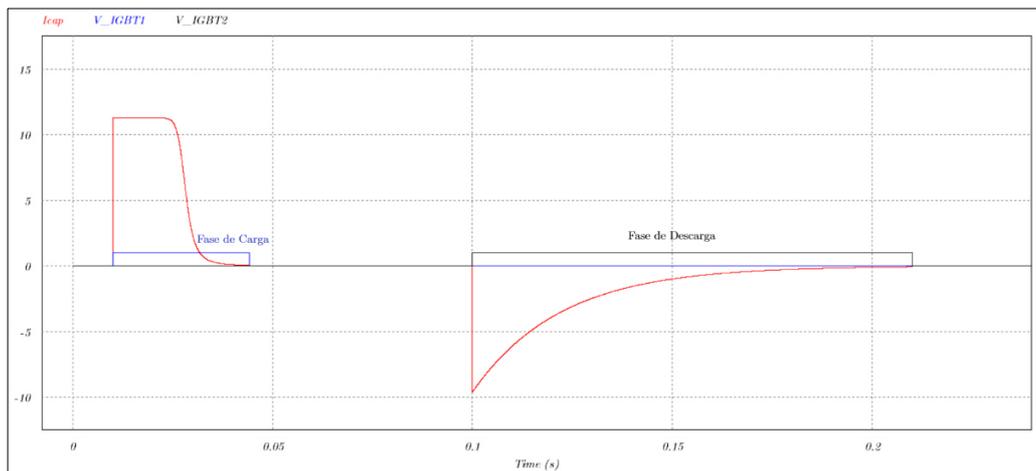


Figura 3.31. Curva corriente vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM

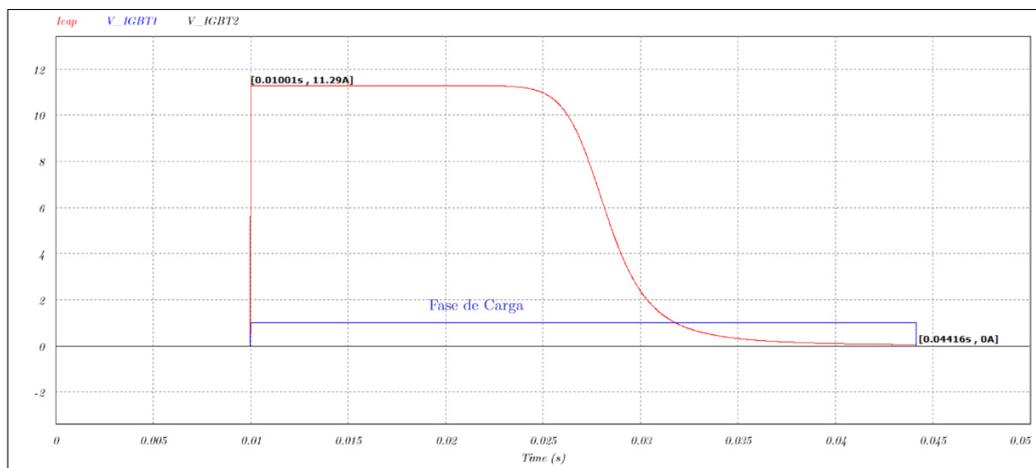




Figura 3.32. Curva corriente vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM – Fase de Carga.

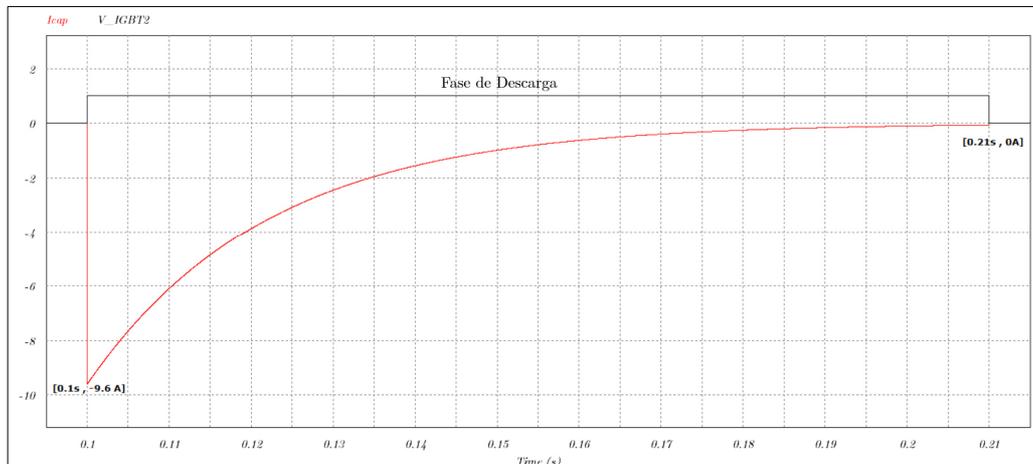


Figura 3.33. Curva corriente vs tiempo del banco de capacitores obtenida en PSIM – Fase de Carga.

Las [figuras 3.28 – 3.30](#) muestran las gráficas voltaje-tiempo del banco de capacitores obtenidas en PSIM. De acuerdo a los resultados obtenidos de la simulación, el voltaje del banco de capacitores (voltaje del módulo fotovoltaico) al inicio del proceso de carga es 0 V, en tanto que el voltaje al finalizar el proceso de carga es aproximadamente el 100% del valor de voltaje de circuito abierto del módulo, siendo el valor obtenido de 48.0245 V; es decir, el voltaje final del banco de capacitores constituye el 99,64% del voltaje de circuito abierto del módulo. Además, el voltaje del banco de capacitores al finalizar el proceso de descarga es de 0.32359 V (< 1 V), lo que representa justamente una disminución del 99.33% del voltaje de circuito abierto del módulo.

De igual manera, las [figuras 3.31 – 3.33](#) corresponden a las gráficas corriente-tiempo del banco de capacitores obtenidas en PSIM. La corriente del banco de capacitores (corriente del módulo fotovoltaico) al inicio del proceso de carga es de 11.29 A, lo que representa el 100% de la corriente de cortocircuito del módulo. La corriente del banco de capacitores al finalizar el proceso de carga y de descarga es de 0 A en ambos casos, esto debido a que los transistores IGBT ya no se encuentran en estado de conducción. Además, la corriente del banco de capacitores al iniciar el proceso de descarga está limitada justamente por la resistencia de descarga, la cual opera sin ninguna complicación dentro de sus límites de funcionamiento.

De esta manera se demuestra el funcionamiento del equipo construido y de acuerdo a los resultados de la simulación en PSIM, se puede apreciar como los tiempos de carga y de descarga calculados con las ecuaciones (3.10) y (3.11) son válidos para describir el comportamiento de los módulos/cadenas fotovoltaicas en el momento de la obtención de la curva I-V empleando el método de carga capacitiva.



3.7 Proceso de obtención de la curva I-V y Aplicación desarrollada en Python

En esta sección se describe detalladamente todo el proceso de obtención de la curva junto con la aplicación desarrollada en Python.

3.7.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Obtención de la curva

Para la obtención de las curvas características I-V de un panel/cadena fotovoltaica, se sigue el procedimiento presentado en la [Figura 3.34](#).

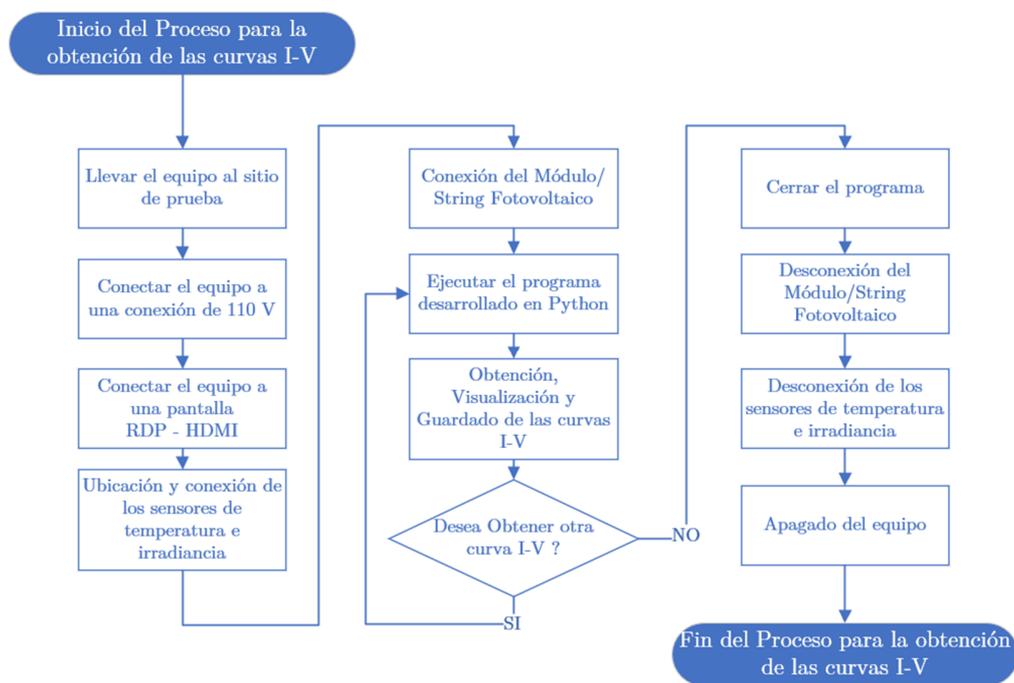


Figura 3.34. Diagrama de Flujo del Proceso de Obtención de la curva I-V.

De acuerdo a la [Figura 3.34](#), el proceso para la obtención de la curva I-V es el siguiente:

1) *Llevar el equipo al sitio de pruebas*

Puesto que el equipo está diseñado para ser portátil, este puede ser transportado de manera fácil al sitio de pruebas en donde se requiera la obtención de las curvas I-V.

2) *Conectar el equipo a una conexión de 110 V*

La conexión a la red eléctrica de 110 V permite energizar todo el equipo, con lo cual este se encuentra listo para el proceso de obtención de las curvas I-V.



3) Conectar el equipo a una pantalla (RDP o HDMI)

El equipo incorpora una tablet Android como pantalla, la cual se conecta con la Raspberry Pi (ordenador) mediante una conexión RDP; sin embargo, también puede funcionar con una pantalla con conexión HDMI, siendo necesario la utilización de otros dispositivos (teclado, mouse) al emplear esta última opción.

Para la conexión RDP entre la tablet y el ordenador, es necesario realizar ciertas acciones que permitan establecer la conexión. Así, es necesario habilitar el protocolo SSH (Secure Shell) y tener el software RDP instalado en la Raspberry Pi, tener una aplicación RDP en la tablet y asegurarse que tanto el ordenador como la tablet estén conectados a la misma red. Con todos los requisitos cumplidos, se dispone de la tablet como pantalla para el equipo.

4) Ubicación y conexión de los sensores de temperatura e irradiancia

Una vez que los sensores de temperatura e irradiancia se ubican de manera correcta de acuerdo a lo mencionado en la [sección 3.3.2.2.3](#), las salidas correspondientes deben conectarse con los conectores ubicados en la parte lateral del equipo, quedando listo el equipo para la medición de las condiciones ambientales a las cuales se realizará la prueba.

5) Conexión del módulo/string fotovoltaico

El módulo/string fotovoltaico, del cual se pretende obtener la curva I-V, se conecta al equipo mediante los conectores MC4, con lo cual el equipo se encuentra listo para la obtención de las características corriente-voltaje del generador fotovoltaico.

6) Ejecución del Programa Desarrollado en Python

Una vez que los sensores de temperatura e irradiancia estén ubicados correctamente y se encuentren conectados al equipo junto con el módulo/string fotovoltaico, se ejecuta el programa desarrollado en Python, el cual controla todo el proceso de obtención de la curva. Aquí, el usuario elige la configuración del banco de capacitores, el nombre del documento en el cual se guarda toda la información obtenida del proceso y los rangos máximos de voltaje y corriente que el sistema puede medir. Justo a continuación, el usuario da inicio al proceso de obtención de la curva I-V.

7) Obtención, Visualización y Guardado de las curvas I-V

Una vez que el programa haya terminado la obtención de la curva I-V, se presenta en la interfaz gráfica del programa las características relevantes de la curva junto con las condiciones ambientales al momento de la obtención. Además, el usuario puede elegir visualizar la curva I-V obtenida, o visualizar la curva P-V. Una vez terminada la visualización de las curvas, el usuario finaliza el proceso de obtención y el programa queda listo para una próxima medición.



El guardado de la información obtenida a lo largo del proceso de obtención de las curvas I-V se realiza de manera automática.

8) Obtención de una nueva curva I-V

En caso de que el usuario desee obtener una nueva curva I-V del mismo módulo/string, el usuario debe ejecutar una vez más el programa desarrollado; o en caso contrario, el usuario da por terminado el proceso de obtención de las curvas I-V.

9) Finalización del proceso de obtención de las curvas I-V

Una vez que el usuario haya decidido finalizar el proceso de obtención de las curvas I-V, se procede con el cierre del programa, la desconexión del módulo/string y de los sensores de temperatura e irradiancia, y al apagado del equipo.

3.7.2 Aplicación desarrollada en Python

La aplicación desarrollada en Python e implementada en la Raspberry Pi es la parte sustancial del trazador de curvas I-V construido, ya que permite controlar todo el proceso de obtención de la curva I-V. De esta manera, desde la aplicación se manda las señales correspondientes para configurar el banco de capacitores, iniciar el proceso de obtención de la curva I-V y descargar los condensadores una vez finalizada la obtención de la curva. Permite obtener los valores provenientes de los sensores de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia; obtener las gráficas de las curvas I-V y P-V del módulo/string bajo análisis; y almacenar la información generada a lo largo de todo el proceso. Además, junto con el script desarrollado en Python se emplea una interfaz gráfica desarrollada en el software QT Designer, con lo cual se logra tener un entorno de fácil entendimiento, permitiendo que la interacción entre el usuario y el equipo sea sencilla.

Se emplea un diagrama de flujo para describir el programa desarrollado en Python. Dicho diagrama se aprecia en la [Figura 3.35](#). Además, el script desarrollado completo se presenta en el [Anexo 6](#).



Figura 3.35. Diagrama de Flujo del script desarrollado en Python.

De acuerdo al diagrama mostrado en la [Figura 3.35](#), se observa como la aplicación desarrollada en Python sigue una ejecución lineal, teniéndose la siguiente estructura:

1) *Importación de Librerías*

Al iniciar la aplicación, se importan todas las librerías necesarias para que todo el programa funcione correctamente. Así, 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) *Definición de los pines del GPIO y Configuración Inicial*

Después de la importación de las librerías, los pines del GPIO que funcionan como salidas y entradas digitales se configuran para que los circuitos de control funcionen correctamente; así, ciertos pines del GPIO se configuran para controlar el disparo de los transistores, otros se configuran para controlar la configuración del banco de capacitores y otro se configura para detectar la señal proveniente del botón de inicio para iniciar el proceso de obtención de la curva.

Una vez finalizada la configuración de los pines del GPIO, todas las salidas digitales se ponen en “0”, de tal manera que los transistores IGBT y los contactores se encuentren desactivados. A esta configuración de las salidas digitales se le denomina “*configuración inicial*”. De esta manera, el equipo queda listo para iniciar el proceso de obtención de la curva I-V.



3) Interfaz Gráfica

Una vez finalizada la *Definición de los pines del GPIO* y la *Configuración Inicial*, la aplicación abre una interfaz gráfica. La interfaz se desarrolló para facilitar el empleo del trazador de curvas I-V por parte del usuario final del equipo. Todo el proceso de obtención de la curva I-V, desde el inicio hasta el final, es comandado desde la interfaz gráfica. En la [Figura 3.36](#) se aprecia la interfaz gráfica desarrollada y en la [Figura 3.37](#) se observa el diagrama de flujo de la misma.



Figura 3.36. Interfaz Gráfica desarrollada.

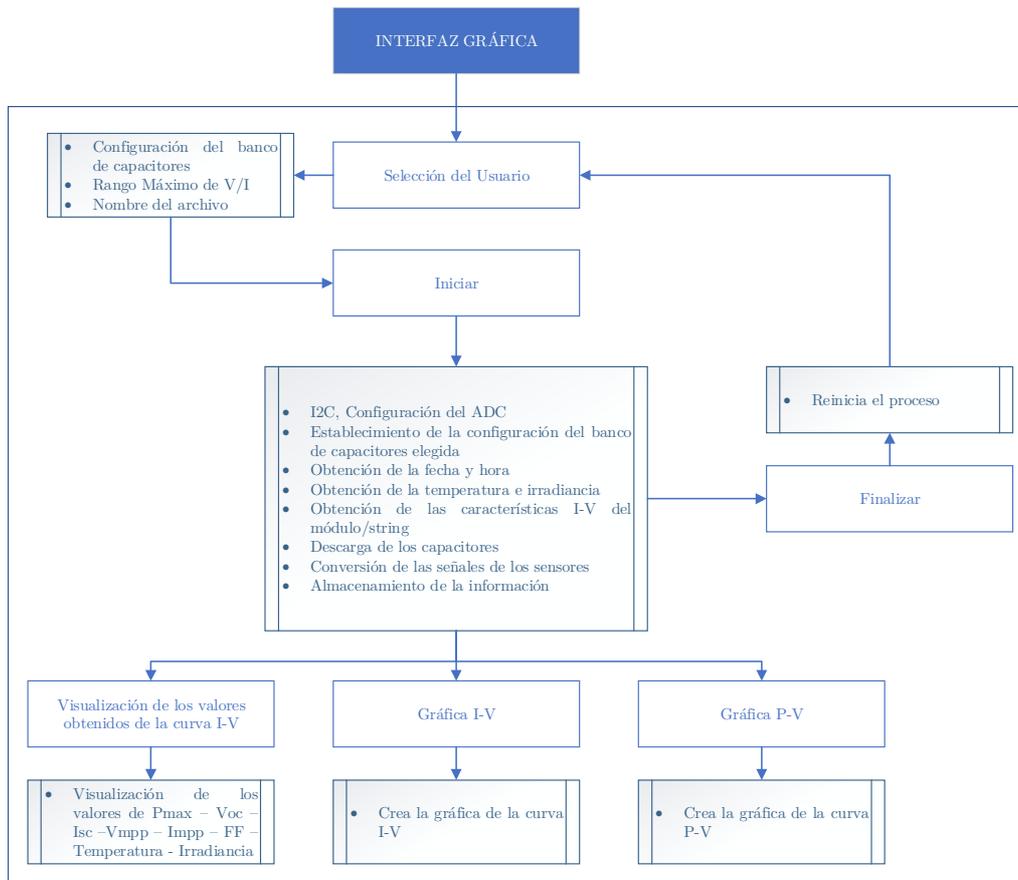


Figura 3.37. Diagrama de Flujo de la Interfaz Gráfica desarrollada.

De acuerdo a la [Figura 3.36](#) y a la [Figura 3.37](#), se puede observar que la interfaz gráfica desarrollada está constituida de la siguiente manera:

▪ *Selección del Usuario*

El apartado denominado “*Selección de Usuario*” es lo primero que se tiene que configurar una vez abierta la interfaz gráfica. En este apartado, el usuario debe escoger el nombre del archivo en el cual se guardará la información obtenida del proceso de obtención de la curva I-V; y, además, debe escoger el valor de la capacitancia y el rango máximo de voltaje y corriente del equipo en relación a las características del módulo/string bajo análisis.

▪ *Botón INICIAR*

Una vez que se realicen todas las acciones mencionadas en el apartado anterior, el usuario debe iniciar el proceso de obtención de la curva I-V haciendo clic en el botón *INICIAR* de la interfaz gráfica. Este botón es el único habilitado al abrirse la interfaz. Una vez pulsado el botón *INICIAR*, para continuar con la ejecución del programa, el usuario debe pulsar el



botón *START* ubicado en la parte externa del equipo. De acuerdo a lo mencionado previamente, al pulsar el botón *START*, el ordenador detecta que dicho botón ha sido pulsado y ejecuta una serie de acciones en respuesta. Así, primeramente, se inicializa la comunicación I2C y se configura el ADC en relación al rango máximo de voltaje y corriente escogidos. Luego, se cierran los contactores correspondientes para establecer la configuración elegida del banco de capacitores. Después, se adquiere la fecha y la hora correspondientes al momento de obtención de la curva, seguido de la obtención de las señales de los sensores encargados de captar las condiciones ambientales (temperatura e irradiancia) a las cuales se encuentra el módulo/string fotovoltaico. Seguidamente, se cierra el IGBT1 y se adquiere las señales correspondientes de los sensores de voltaje y corriente durante la carga de los capacitores (obtención de la curva I-V). Una vez que los capacitores se han cargado completamente y se ha adquirido toda la información necesaria para caracterizar al generador fotovoltaico, se procede con la descarga del banco de condensadores hasta un nivel de voltaje inferior a 1 V. Luego, las señales de los sensores se convierten en información de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia respectivamente; se guarda toda esa información en el archivo correspondiente, y se calcula la potencia con los datos 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*.

- *Visualización de los valores obtenidos de la curva I-V*

Una vez terminado el proceso de obtención de la curva I-V, en la interfaz gráfica se tiene un apartado en donde se muestran los valores importantes de la curva I-V (V_{OC} , I_{SC} , V_{MPP} , I_{MPP} , P_{MPP} , FF) junto con los valores de temperatura e irradiancia a los cuales se encontraba expuesto el módulo/string fotovoltaico.

- *Botón Curva I-V y Botón Curva P-V*

Los botones *Curva I-V* y *Curva P-V* permiten visualizar las curvas obtenidas I-V y P-V respectivamente del generador fotovoltaico.

- *Botón FINALIZAR*

El botón *FINALIZAR* lo que hace es reiniciar el proceso de la interfaz gráfica, por lo cual se habilita el botón *INICIAR*, y se deshabilita los botones *Curva I-V*, *Curva P-V* y *FINALIZAR*. Además, todas las salidas digitales vuelven a la “*configuración inicial*”, con lo cual el equipo queda listo para una próxima obtención de la curva I-V.

Para finalizar la ejecución del programa basta con el cierre del mismo.



3.8 Calibración de los sensores

Para el adecuado funcionamiento del equipo, los sensores de voltaje, corriente, temperatura e irradiancia deben estar correctamente calibrados, de tal manera que las mediciones obtenidas con el trazador de curvas I-V construido sean confiables. De esta manera, con ayuda de un osciloscopio, se obtuvo los gráficos voltaje-tiempo y corriente-tiempo al momento de la carga de los capacitores; y dichas gráficas se compararon con las obtenidas por el equipo construido. En el [Anexo 7](#) y en el [Anexo 9](#) se muestran las gráficas voltaje-tiempo y corriente-tiempo respectivamente obtenidas con ambos equipos; y, en el [Anexo 8](#) y en el [Anexo 10](#) se muestra una comparación entre los valores de voltaje y corriente obtenidos por el trazador de curvas I-V con respecto a los valores de referencia (valores de voltaje y corriente obtenidos con el osciloscopio). De acuerdo a los anexos antes mencionados, se observa como los sensores de voltaje y corriente empleados en el equipo se comportan de manera lineal, teniendo una gran correspondencia con los valores obtenidos con el osciloscopio, sobre todo en la medición de la corriente, al tener el equipo una mejor resolución en la medición de este parámetro. De este modo, se verifica que los valores de voltaje y corriente obtenidos con el equipo son verídicos. En relación a las mediciones de temperatura e irradiancia, no existe ningún problema relacionado a la medición de la temperatura, esto debido a la buena precisión que posee el sensor empleado; en tanto que, para evitar errores en la medición de la irradiancia, todas las pruebas realizadas se efectuaron en días completamente soleados, ya que, de acuerdo a las especificaciones del piranómetro empleado, cuando existe un cielo despejado, el error obtenido de las mediciones es pequeño.



Capítulo 4

Resultados y Análisis

4.1 Descripción del proceso de análisis

Una vez finalizada la construcción del trazador de curvas I-V, el prototipo se emplea para analizar ciertos paneles fotovoltaicos del laboratorio de Micro-red de la Universidad de Cuenca y de esta manera probar su funcionamiento en la detección de fallas. Para la elección de los paneles, se toma como referencia el trabajo desarrollado en [29], el cual fue publicado en el primer trimestre del año 2020 y contiene información acerca del estado de los paneles del laboratorio de Micro-red de la Universidad de Cuenca. La numeración de los paneles empleada en dicho trabajo se observa en la [Figura 4.1](#).

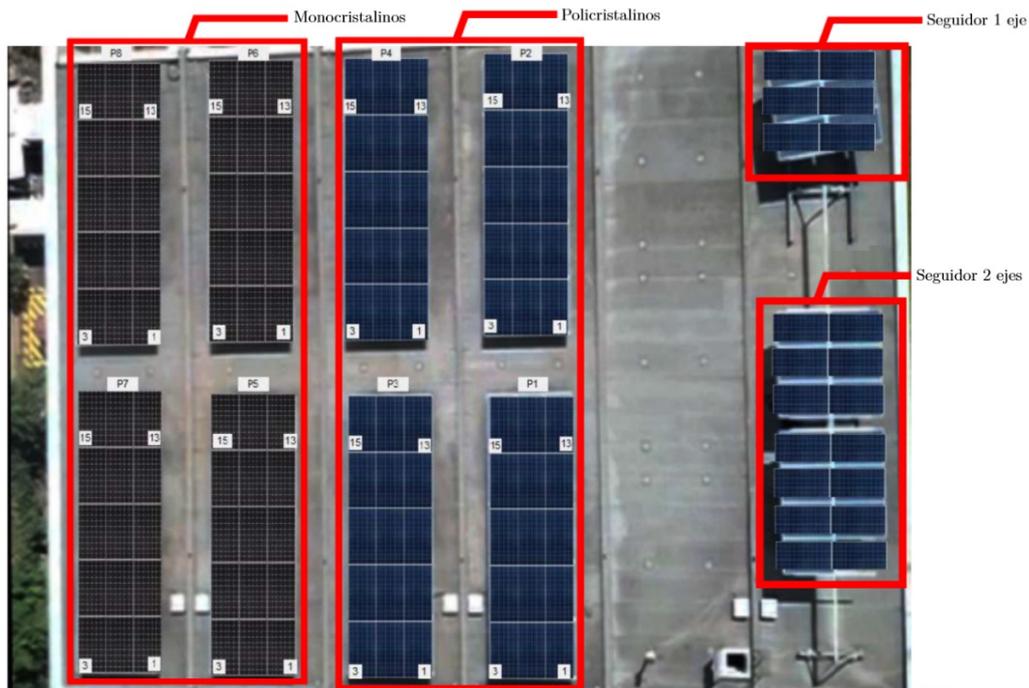


Figura 4.1. Distribución de paneles fotovoltaicos del laboratorio de Micro-red eléctrica de la Universidad de Cuenca [29].

En el trabajo antes mencionado, se emplea un trazador de curvas I-V comercial (Solmetric PVA-600) para obtener las curvas I-V de los paneles monocristalinos y policristalinos; y, de acuerdo con los resultados obtenidos, se evidencia que el trazado de las curvas I-V no revela ningún hallazgo importante en los paneles policristalinos; en tanto que, el trazado de las curvas I-V en los paneles monocristalinos revela que el 63% de los mismos presentaba algún tipo de deterioro. Además, la información fue validada con otra técnica de detección de fallas (electroluminiscencia) [29].

De esta manera, para probar el funcionamiento del equipo construido, se eligen cuatro paneles monocristalinos que presentan distintos tipos de deterioro y las curvas I-V obtenidas con el equipo se comparan con las curvas I-V obtenidas en [29]. También se obtiene las curvas I-V de dos módulos fotovoltaicos policristalinos prácticamente nuevos que se encuentran en el laboratorio, para de igual manera, verificar que el equipo opere de manera adecuada.

Además, puesto que las curvas I-V deben compararse con respecto a una curva I-V estándar, en el proceso de análisis, se emplea el modelo ideal de diodo único ISDM para obtener las características fotovoltaicas de los módulos analizados (curva I-V estándar), y de esta manera, comparar la curva obtenida mediante el modelo matemático con respecto a la obtenida usando el equipo construido.



4.2 Características de los módulos analizados

Los cuatro módulos fotovoltaicos monocristalinos analizados corresponden a los módulos ATERSA A-250M cuya numeración es P5-3, P5-13, P6-1 y P8-1 respectivamente; en tanto que los módulos fotovoltaicos policristalinos analizados corresponden a los módulos individuales JINKO JKM275PP-60 que se encuentran en el laboratorio, y para el análisis se los denomina PP-1 y PP-2 respectivamente. En la [Figura 4.2](#) se muestra los módulos policristalinos analizados y sus características se presentan en la [Tabla 4.1](#); en tanto que en la [Figura 4.3](#) se muestra los módulos monocristalinos analizados y sus características se presentan en la [Tabla 4.2](#).



Figura 4.2. Módulos fotovoltaicos policristalinos analizados.



Figura 4.3. Módulos fotovoltaicos monocristalinos analizados.

Tabla 4.1. Especificaciones del módulo fotovoltaico ATERSA A-250M [47]

Información Básica					
<i>Modelo</i>	<i>Tipo de Celda</i>		<i>Dimensiones</i>		
ATERSA A-250M	Monocristalino		1645 x 990 x 40 mm		
Características Eléctricas en STC					
I_{SC}	V_{OC}	I_{MPP}	V_{MPP}	P_{MPP}	<i>Eficiencia</i>
8.79 A	37.62 V	8.24 A	30.35 V	250 W	15.35 %
Características Térmicas					
α	β		γ		
0.03 % / °C	-0.34 % / °C		-0.43 % / °C		

Tabla 4.2. Especificaciones del módulo fotovoltaico JINKO JKM275PP-60 [48]

Información Básica					
Modelo	Tipo de Celda	Dimensiones			
JINKO JKM275PP-60	Policristalino	1650 x 992 x 40 mm			
Características Eléctricas en STC					
I_{SC}	V_{OC}	I_{MPP}	V_{MPP}	P_{MPP}	Eficiencia
9.15 A	39.1 V	8.61 A	32.0 V	275 W	16.80 %
Características Térmicas					
α	β	γ			
0.06 % / °C	-0.30 % / °C	-0.40 % / °C			

En el [Anexo 11](#) se presenta la hoja de datos del módulo ATERSA A-250M y en el [Anexo 12](#) se presenta la hoja de datos del módulo JINKO JKM275PP-60.

4.3 Simulación de las características corriente-voltaje de los módulos fotovoltaicos

En base a lo mencionado anteriormente, para la simulación de las características corriente-voltaje de los módulos fotovoltaicos se emplea el modelo ideal de diodo único. El método empleado para la identificación de los parámetros de este modelo se muestra en [11], mismo que se implementa en un programa desarrollado en Matlab. Los resultados obtenidos con el mismo ofrecen un nivel de precisión adecuada para la comparación con las curvas I-V obtenidas con el equipo construido.

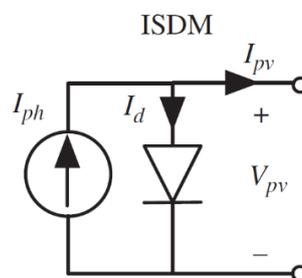


Figura 4.4. Modelo ideal de diodo único ISDM.



4.3.1 Identificación de Parámetros en STC

Empleando el programa desarrollado en Matlab, se identifica los parámetros para la modelación de los módulos ATERSA A-250M y JINKO JKM275PP-60, obteniéndose los siguientes resultados:

- *Módulo ATERSA A-250M*

$$I_{pv} = 8.79 - I_d \tag{4.1}$$

$$I_d = 5.1954 \cdot 10^{-6} \left[e^{\frac{V_{pv} \cdot q}{k \cdot (298)^{1.7023}}} - 1 \right] \tag{4.2}$$

Reemplazando los valores de V_{pv} desde 0V hasta $V_{oc} = 37.62V$ se calcula los valores de I_d , y con ello los valores de I_{pv} . Con los valores obtenidos, se obtiene la curva I-V y la curva P-V, los cuales se aprecian en la [Figura 4.5](#).

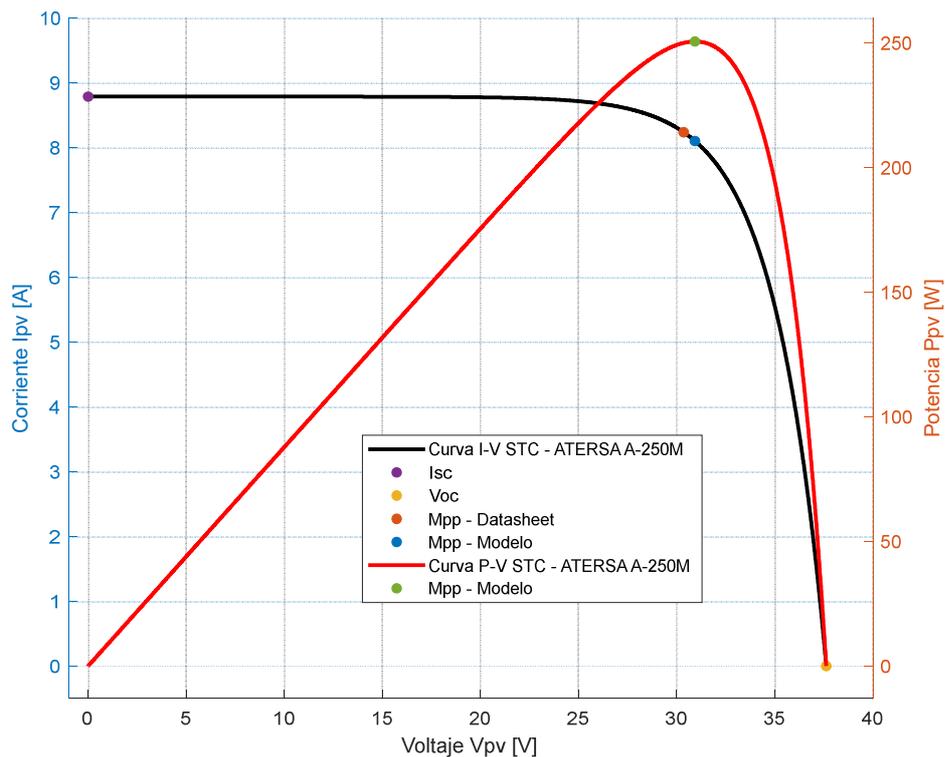


Figura 4.5. Curva I-V y Curva P-V del módulo ATERSA A-250M obtenidas empleando el ISDM.

Los resultados obtenidos del modelo se muestran en la [Tabla 4.3](#).



Tabla 4.3. Resultados de la simulación del ISDM. Módulo ATERSA A-250M

Características Eléctricas en STC dadas en la Hoja de Datos				
I_{SC}	V_{OC}	I_{MPP}	V_{MPP}	P_{MPP}
8.79 A	37.62 V	8.24 A	30.35 V	250 W
Características Eléctricas en STC obtenidas en el modelo				
I_{SC}	V_{OC}	I_{MPP}	V_{MPP}	P_{MPP}
8.79 A	37.62 V	8.104 A	30.93 V	250.654 W

La precisión alcanzada con este modelo es adecuada para simular las características corriente-voltaje del módulo fotovoltaico ATERSA A-250M. Las variaciones entre los valores de I_{SC} y V_{OC} obtenidos del modelo y de la hoja de datos son cero; en tanto que las variaciones en cuanto al valor del punto de máxima potencia son pequeñas, tendiéndose una variación de -1.65% en el valor de I_{MPP} , una variación 1.91% en el valor de V_{MPP} y una variación de 0.262% en el valor de P_{MPP} . Además, la forma de la curva I-V presentada en la [Figura 4.5](#) es similar a la mostrada en la hoja de datos.

- *Módulo JINKO JKM275PP-60*

$$I_{pv} = 9.15 - I_d \quad (4.3)$$

$$I_d = 1.56 \cdot 10^{-6} \left[e^{\frac{V_{pv} \cdot q}{k \cdot (298) \cdot 1.6281}} - 1 \right] \quad (4.4)$$

Reemplazando los valores de V_{pv} desde 0 V hasta $V_{oc} = 39.1$ V se calcula los valores de I_d , y con ello los valores de I_{pv} . Con los valores obtenidos, se obtiene la curva I-V y la curva P-V, los cuales se aprecian en la [Figura 4.6](#).

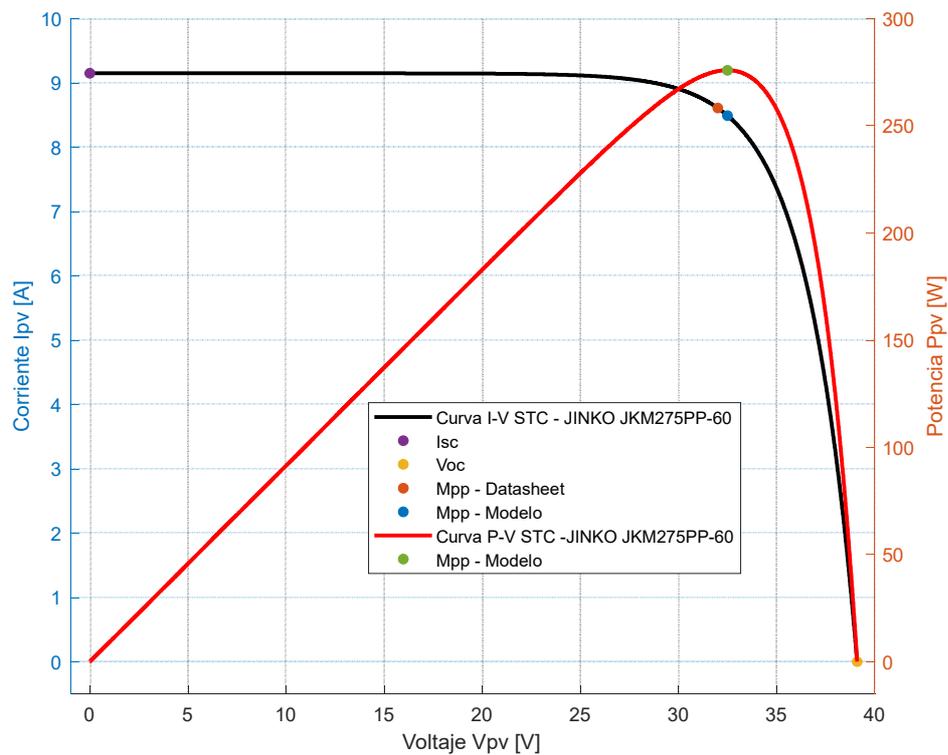


Figura 4.6. Curva I-V y Curva P-V del módulo JINKO JKM275PP-60 obtenidas empleando el ISDM.

Los resultados obtenidos del modelo se muestran en la [Tabla 4.4](#).

Tabla 4.4. Resultados de la simulación del ISDM. Módulo JINKO JKM275PP-60.

Características Eléctricas en STC dadas en la Hoja de Datos				
I_{SC}	V_{OC}	I_{MPP}	V_{MPP}	P_{MPP}
9.15 A	39.1 V	8.61 A	32.0 V	275 W
Características Eléctricas en STC obtenidas en el modelo				
I_{SC}	V_{OC}	I_{MPP}	V_{MPP}	P_{MPP}
9.15 A	39.1 V	8.494 A	32.49 V	275.955 W

La precisión alcanzada con este modelo es adecuada para simular las características corriente-voltaje del módulo fotovoltaico JINKO JKM275PP-60. Las variaciones entre los valores de



I_{SC} y V_{OC} obtenidos del modelo y de la hoja de datos son cero; en tanto que las variaciones en cuanto al valor del punto de máxima potencia son pequeñas, tendiéndose una variación de -1.35% en el valor de I_{MPP} , una variación 1.53% en el valor de V_{MPP} y una variación de 0.347% en el valor de P_{MPP} . Además, la forma de la curva I-V presentada en la [Figura 4.6](#) es similar a la mostrada en la hoja de datos.

4.3.2 Variación con Irradiancia y Temperatura

Puesto que la obtención de las curvas I-V de los módulos fotovoltaicos analizados difícilmente ocurren bajo STC, en [11] se presenta un procedimiento para modelar las características corriente-voltaje bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura. Empleando la información obtenida del modelo ISDM de los dos módulos fotovoltaicos y los coeficientes de temperatura α y β dados en el respectivo datasheet, se obtuvo los siguientes resultados empleando el procedimiento mostrado en [11]:

- *Módulo ATERSA A-250M*

Se obtuvo las curvas I-V del módulo ATERSA A-250M bajo las siguientes condiciones a) irradiancia constante y temperatura variable; y b) irradiancia variable y temperatura constante. En la primera condición la irradiancia se mantiene en un valor de 1000 W/m^2 y la temperatura toma los valores de $[0^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}, 75^\circ\text{C}]$. En la segunda condición la irradiancia toma los valores de $[250 \text{ W/m}^2, 500 \text{ W/m}^2, 750 \text{ W/m}^2, 1000 \text{ W/m}^2]$, en tanto que la temperatura se mantiene en el valor de 25°C . Los valores de temperatura e irradiancia se eligen en relación a los valores presentados en la hoja de datos de este módulo. Las curvas I-V obtenidas se presentan en las [Figuras 4.7 – 4.8](#).

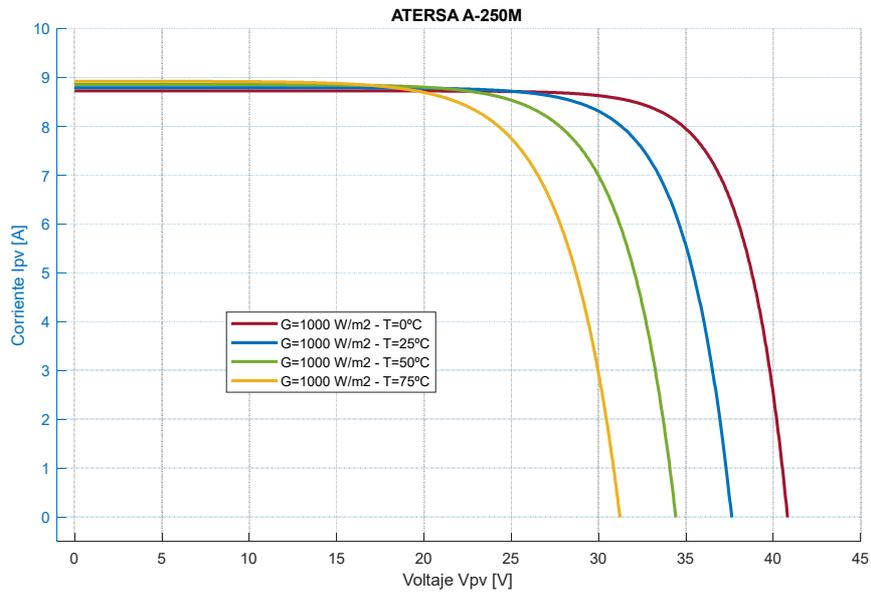


Figura 4.7. Curvas I-V del módulo ATERSA A-250M. Irradiancia Constante y Temperatura Variable.

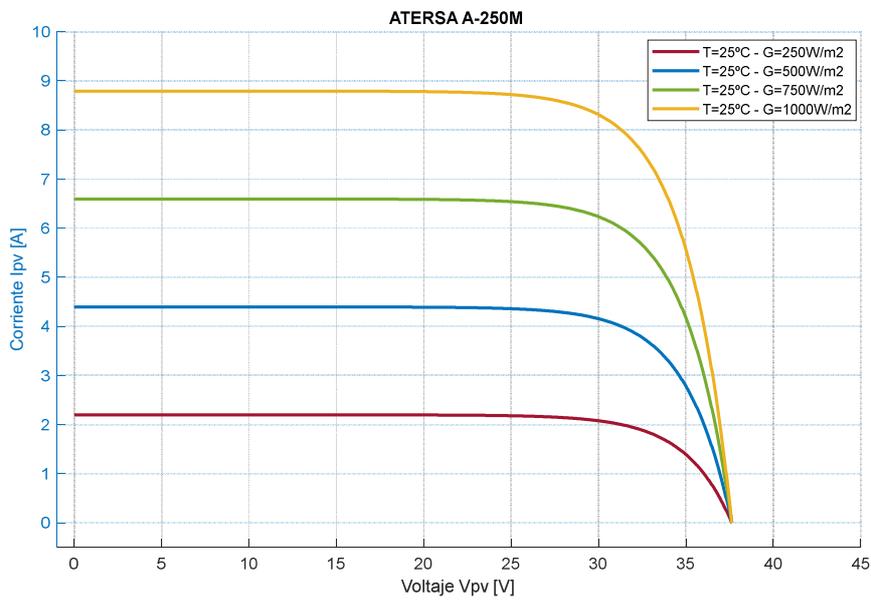


Figura 4.8. Curvas I-V del módulo ATERSA A-250M. Irradiancia Variable y Temperatura Constante.



- *Módulo JINKO JKM275PP-60*

Se obtuvo las curvas I-V del módulo JINKO JKM275PP-60 bajo las siguientes condiciones a) irradiancia constante y temperatura variable; y b) irradiancia variable y temperatura constante. En la primera condición la irradiancia se mantiene en un valor de 1000 W/m^2 y la temperatura toma los valores de $[0^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}, 75^\circ\text{C}]$. En la segunda condición la irradiancia toma los valores de $[200 \text{ W/m}^2, 400 \text{ W/m}^2, 600 \text{ W/m}^2, 800 \text{ W/m}^2, 1000 \text{ W/m}^2]$, en tanto que la temperatura se mantiene en el valor de 25°C . Los valores de temperatura e irradiancia se eligen en relación a los valores presentados en la hoja de datos de este módulo. Las curvas I-V obtenidas se presentan en las Figuras 4.9 – 4.10.

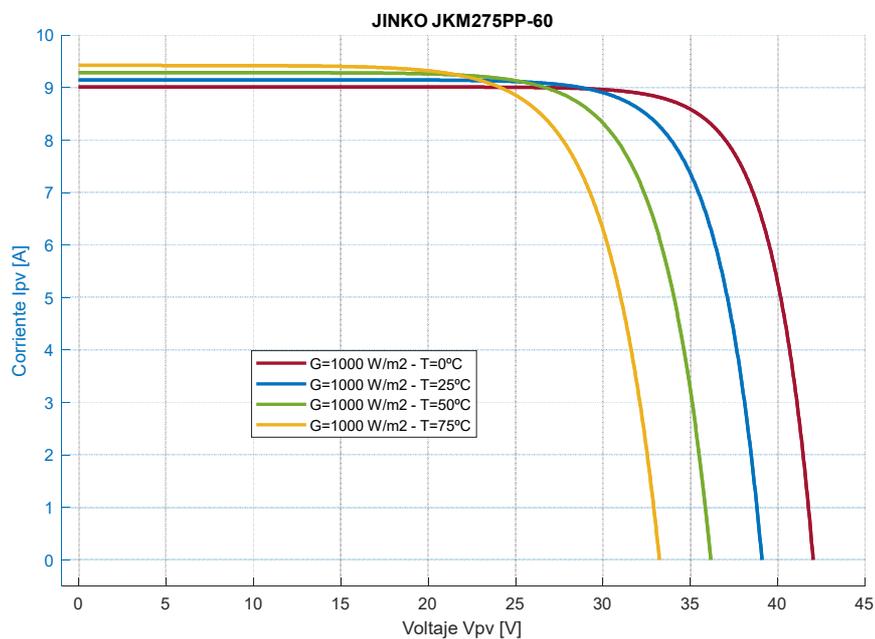


Figura 4.9. Curvas I-V del módulo JINKO JKM275PP-60. Irradiancia Constante y Temperatura Variable.

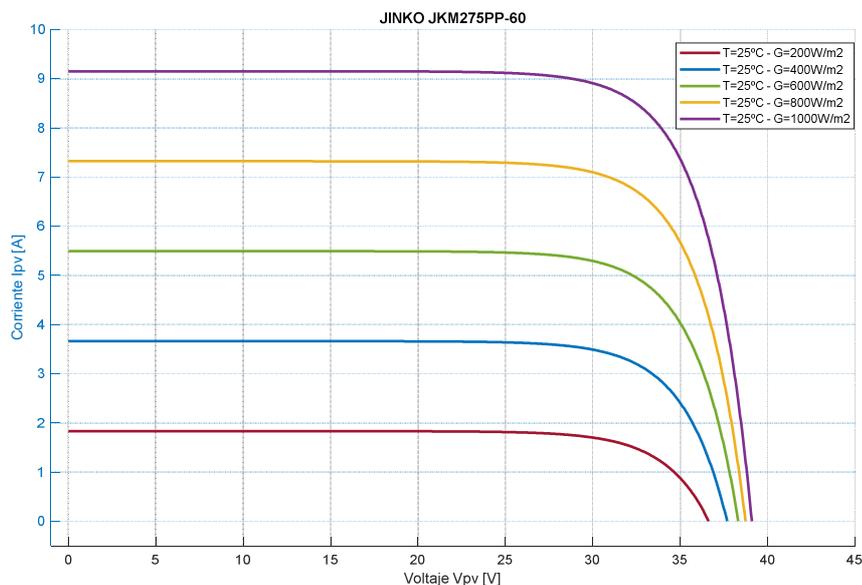


Figura 4.10. Curvas I-V del módulo JINKO JKM275PP-60. Irradiancia Variable y Temperatura Constante.

Al comparar las curvas I-V obtenidas de la simulación del módulo ATERSA A-250M con respecto a las curvas I-V mostradas en la respectiva hoja de datos, se puede decir que existe una gran concordancia entre ambas gráficas, por lo cual el modelo empleado permite representar las características I-V de este tipo de módulo de manera confiable.

En relación a los valores obtenidos de la simulación del módulo JINKO JKM275PP-60, se observa que para valores de irradiancia superiores a los 600 W/m^2 , la zona lineal de la región de fuente de voltaje de la curva I-V modelada presenta una pendiente más pronunciada en relación a la gráfica mostrada en la hoja de datos de este módulo. Sin embargo, esta variación en la pendiente no modifica la ubicación del punto de máxima potencia en la curva I-V, por lo cual al analizar la forma de las curvas I-V obtenidas con el equipo construido, se tiene en cuenta esta consideración.

4.4 Resultados y Análisis

4.4.1 Consideraciones para la obtención de las curvas I-V

Para la obtención de las curvas I-V de los módulos fotovoltaicos antes mencionados, se toma en consideración las recomendaciones de la norma IEC 60904-1: 2006, junto con otras recomendaciones mencionadas en la literatura. De esta manera, a continuación, se muestran las consideraciones empleadas para la obtención de las curvas I-V:



- La temperatura del módulo/string fotovoltaico debe medirse con una precisión de $\pm 1\%$ y con una repetibilidad de $\pm 0.5\%$ [23]. El sensor debe estar ubicado en la parte posterior del módulo/string, de tal manera que el valor de temperatura obtenido se aproxime a su temperatura media trasera [27].
- La irradiancia puede medirse con un piranómetro fabricado empleando la misma tecnología de las células fotovoltaicas [23], y debe estar ubicado en el mismo plano de la matriz fotovoltaica [27].
- Los tiempos de medición deben estar en el rango de 20ms-100ms, de tal manera que las condiciones ambientales (irradiancia y temperatura) no fluctúen en el transcurso de la medida [33]. En el caso del equipo construido, el valor de la capacitancia se elige de tal forma que el tiempo de obtención de la curva I-V se encuentre lo más cercano al valor de 100ms, de tal manera que exista una mayor cantidad de puntos para caracterizar la curva.
- La obtención de la curva I-V debe realizarse bajo condiciones ambientales aceptables y relativamente estables (día soleado con un valor de irradiancia $> 700 \text{ W/m}^2$) [27].
- El módulo/string fotovoltaico debe alcanzar una condición térmica estable, por lo cual se lo debe desconectar de cualquier tipo de carga (batería, inversor, etc.) unos 5 minutos antes de iniciar la obtención de las curvas I-V [33].

4.4.2 Curvas I-V obtenidas

Empleando el trazador de curvas I-V construido, y empleando las consideraciones indicadas en el apartado anterior, se procede a la obtención de las curvas I-V de los seis módulos fotovoltaicos antes mencionados. Se emplea la configuración 3C Paralelo del banco de capacitores ($C_T = 13200 \text{ uF}$) para todos los casos. Utilizando el valor de la capacitancia total y la ecuación (3.10), se tiene los siguientes tiempos de obtención de la curva I-V, en STC:

Módulo ATERSA A-250M

$$t_C = \frac{1}{0.55} \cdot C \cdot \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$
$$t_C = \frac{1}{0.55} \cdot (13200 \text{ uF}) \cdot \frac{(37.62 \text{ V})}{(8.79 \text{ A})} = 102.717 \text{ ms}$$



$$t_C = \frac{1}{0.55} \cdot C \cdot \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$
$$t_C = \frac{1}{0.55} \cdot (13200 \text{ uF}) \cdot \frac{(39.1 \text{ V})}{(9.15 \text{ A})} = 102.557 \text{ ms}$$

Como se puede apreciar, los tiempos de obtención de la curva I-V son cercanos al valor de 100 ms, esto en STC, con lo cual la utilización de la configuración 3C Paralelo para el banco de capacitores resulta adecuada para la medición de las características corriente-voltaje de los módulos ATERSA A-250M y JINKO JKM275PP-60. En el [Anexo 13](#) se puede observar fotografías relacionadas al proceso de obtención de las curvas I-V de los seis módulos fotovoltaicos antes mencionados.

4.4.2.1 Curva I-V Módulo 1 - JINKO JKM275PP-60 PP-1

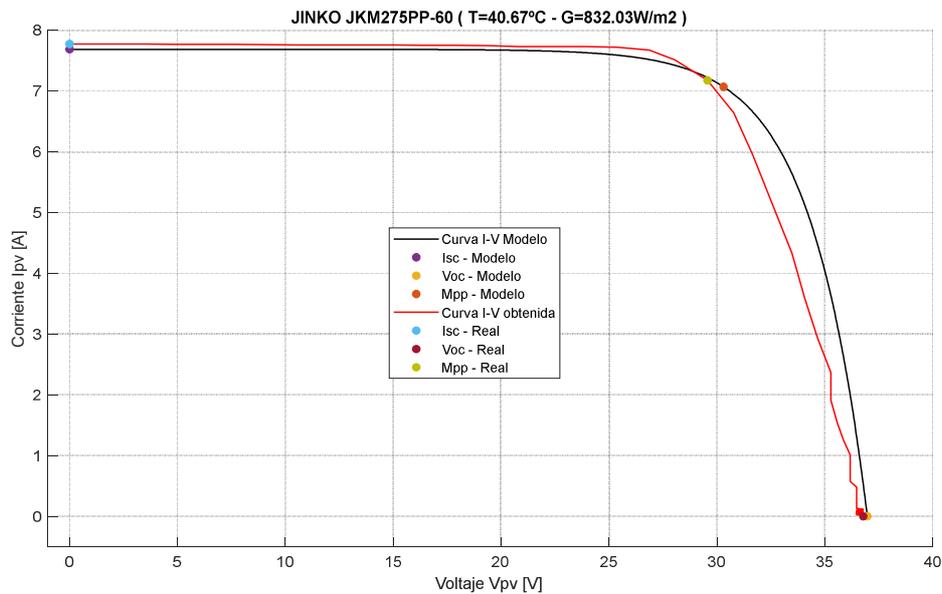


Figura 4.11. Curva I-V del módulo PP-1 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)

En la [Figura 4.11](#) se muestra la curva I-V obtenida empleando el equipo construido y la curva I-V obtenida del modelado del panel fotovoltaico PP-1. Además, en la [Tabla 4.5](#) se muestra una comparación entre los parámetros más importantes de las dos curvas antes mencionadas.



Tabla 4.5. Parámetros obtenidos del modelo del módulo PP-1 y del trazador de curvas I-V.

Parámetro	Modelo	Real
P_{MPP}	214,24	212,10
V_{OC}	36,97	36,78
I_{SC}	7,68	7,77
V_{MPP}	30,31	29,57
I_{MPP}	7,07	7,17
FF	0,75	0,74
PF	0,99	
Relación de Corriente	0,92	0,92
Relación de Voltaje	0,82	0,80

De acuerdo a la [Figura 4.11](#) y a los valores mostrados en la [Tabla 4.5](#), se puede apreciar que el módulo fotovoltaico PP-1 es un módulo que no presenta ningún tipo de falla o deterioro; esto debido a que la forma de la curva I-V obtenida empleando el equipo construido es normal y se asemeja en gran medida a la forma de la curva modelada. Además, las características eléctricas obtenidas concuerdan con las del modelo; y, al analizar los índices de rendimiento, se observa que el FF es casi idéntico al del modelo y está dentro del rango típico [0.7 – 0.8], y que el PF es superior a 0.9, lo que confirma aún más que el módulo fotovoltaico analizado se encuentra sin ningún tipo de falla o deterioro.

4.4.2.2 Curva I-V Módulo 2 - JINKO JKM275PP-60 PP-2

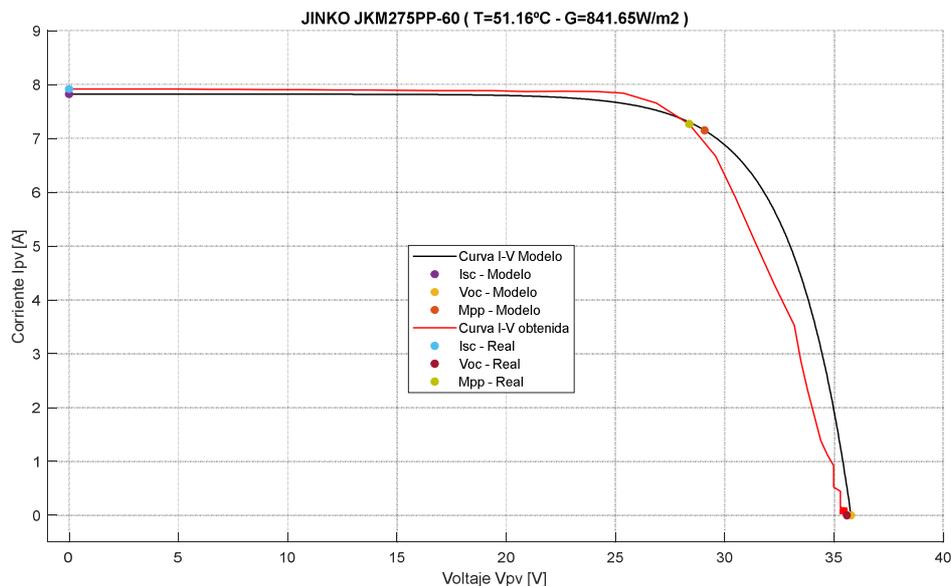


Figura 4.12. Curva I-V del módulo PP-2 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)



En la [Figura 4.12](#) se muestra la curva I-V obtenida empleando el equipo construido y la curva I-V obtenida del modelado del panel fotovoltaico PP-1. Además, en la [Tabla 4.6](#) se muestra una comparación entre los parámetros más importantes de las dos curvas antes mencionadas.

Tabla 4.6. Parámetros obtenidos del modelo del módulo PP-2 y del trazador de curvas I-V.

Parámetro	Modelo	Real
P_{MPP}	207,84	206,19
V_{OC}	35,77	35,58
I_{SC}	7,82	7,92
V_{MPP}	29,07	28,37
I_{MPP}	7,15	7,27
FF	0,74	0,73
PF	0,99	
<i>Relación de Corriente</i>	0,91	0,92
<i>Relación de Voltaje</i>	0,81	0,80

De acuerdo a la [Figura 4.12](#) y a los valores mostrados en la [Tabla 4.6](#), se puede apreciar que el módulo fotovoltaico PP-2, al igual que el módulo PP-1, es un módulo que no presenta ningún tipo de falla o deterioro; esto debido a que la forma de la curva I-V obtenida empleando el equipo construido es normal y se asemeja en gran medida a la forma de la curva modelada. Además, las características eléctricas obtenidas concuerdan con las del modelo; y, al analizar los índices de rendimiento, se observa que el FF es casi idéntico al del modelo y está dentro del rango típico [0.7 – 0.8], y que el PF es superior a 0.9, lo que confirma aún más que el módulo fotovoltaico analizado se encuentra sin ningún tipo de falla o deterioro.

4.4.2.3 Curva I-V Módulo 3 - ATERSA A-250M P5-3

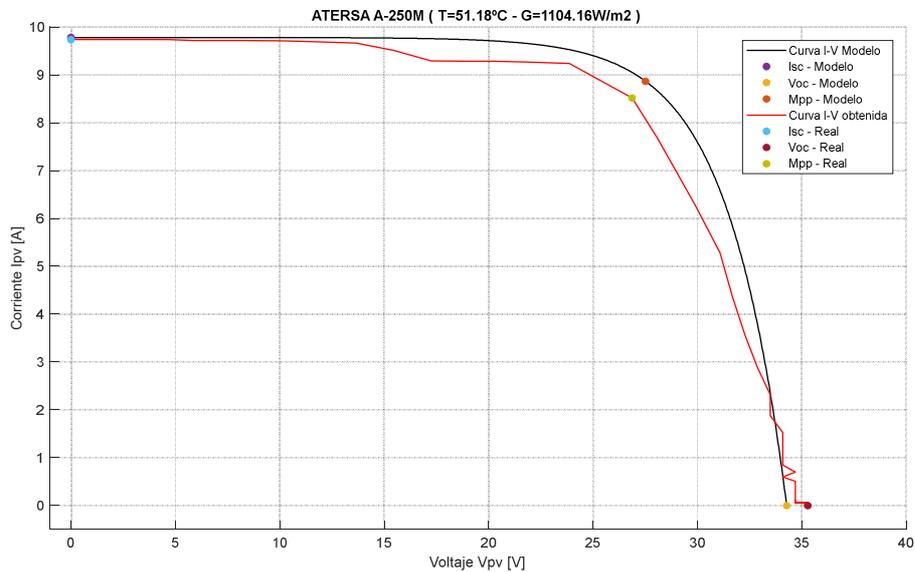


Figura 4.13. Curvas I-V del módulo P5-3 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)

En la [Figura 4.13](#) se muestra la curva I-V obtenida empleando el equipo construido y la curva I-V obtenida del modelado del panel fotovoltaico P5-3. Además, en la [Tabla 4.7](#) se muestra una comparación entre los parámetros más importantes de las dos curvas antes mencionadas.

Tabla 4.7. Parámetros obtenidos del modelo del módulo P5-3 y del trazador de curvas I-V.

Parámetro	Modelo	Real
P_{MPP}	243,93	228,85
V_{OC}	34,27	35,28
I_{SC}	9,78	9,74
V_{MPP}	27,51	26,86
I_{MPP}	8,87	8,52
FF	0,73	0,67
PF	0,94	
Relación de Corriente	0,91	0,87
Relación de Voltaje	0,80	0,76

De acuerdo a la [Figura 4.13](#) y a los valores mostrados en la [Tabla 4.7](#), se puede apreciar que el módulo fotovoltaico P5-3, es un módulo que presenta algún tipo de falla o deterioro; esto debido a que la forma de la curva I-V obtenida empleando el equipo construido presenta escalones o cortes en relación



a la curva I-V modelada, a pesar de que el PF es superior a 0.9. Este escalonamiento en la forma de la curva se debe a que dos celdas del módulo fotovoltaico presentan grietas, según se determina en [29]. El efecto de esta falla se ve reflejado en la potencia máxima de salida (disminución del 6.182%). También se evidencia un incremento de la resistencia en serie del panel debido a que la pendiente en la región de fuente de voltaje es menos pronunciada que la obtenida en el modelo. Al analizar el valor de FF, se puede apreciar que este difiere del valor modelado, lo que confirma la existencia de las fallas o deterioros en el módulo.

4.4.2.4 Curva I-V Módulo 4 - ATERSA A-250M P5-13

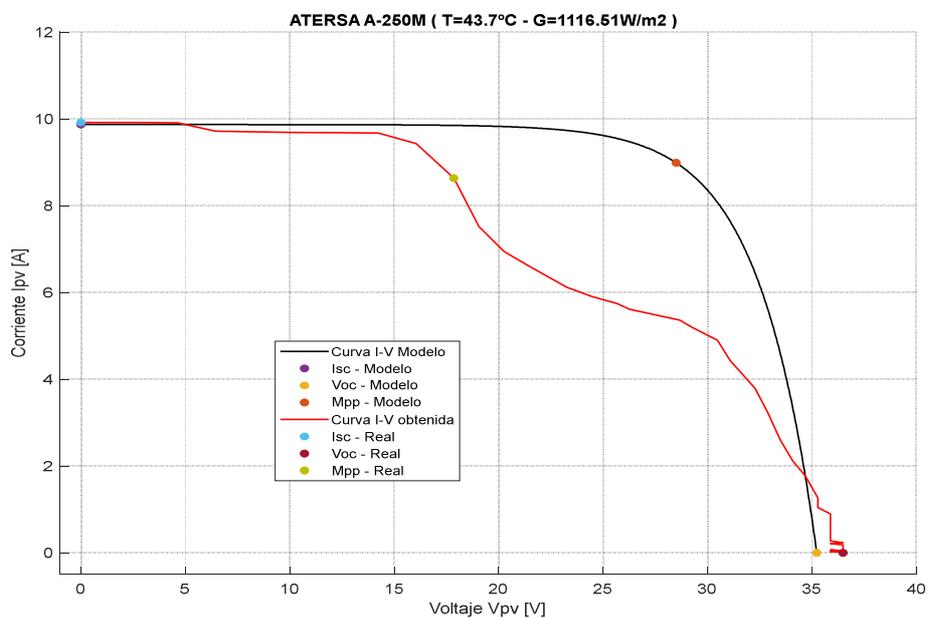


Figura 4.14. Curvas I-V del módulo P5-13 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)

En la [Figura 4.14](#) se muestra la curva I-V obtenida empleando el equipo construido y la curva I-V obtenida del modelado del panel fotovoltaico P5-13. Además, en la [Tabla 4.8](#) se muestra una comparación entre los parámetros más importantes de las dos curvas antes mencionadas.

Tabla 4.8. Parámetros obtenidos del modelo del módulo P5-13 y del trazador de curvas I-V.

Parámetro	Modelo	Real
P_{MPP}	256.10	154.16
V_{OC}	35.23	36.48
I_{SC}	9.87	9.92
V_{MPP}	28.49	17.85



I_{MPP}	8.99	8.64
FF	0.74	0.43
PF	0.60	
<i>Relación de Corriente</i>	0.91	0.87
<i>Relación de Voltaje</i>	0.81	0.49

De acuerdo a la [Figura 4.14](#) y a los valores mostrados en la [Tabla 4.8](#), se puede apreciar que el módulo fotovoltaico P5-13, es un módulo que presenta algún tipo de falla o deterioro; esto debido a que el valor de PF es inferior a 0.9 y la forma de la curva I-V obtenida empleando el equipo construido presenta escalones o cortes en relación a la curva I-V modelada, lo que indica que el diodo de bypass está activado. Este escalonamiento en la forma de la curva se debe a la presencia de un punto caliente, según se determinó en [29]. El efecto de esta falla se ve reflejado en la potencia máxima de salida (disminución del 39.8%). Además, al analizar el valor de FF , se puede apreciar que este es sumamente inferior con respecto al valor modelado, lo que confirma la presencia de la falla.

4.4.2.5 Curva I-V Módulo 5 - ATERSA A-250M P6-1

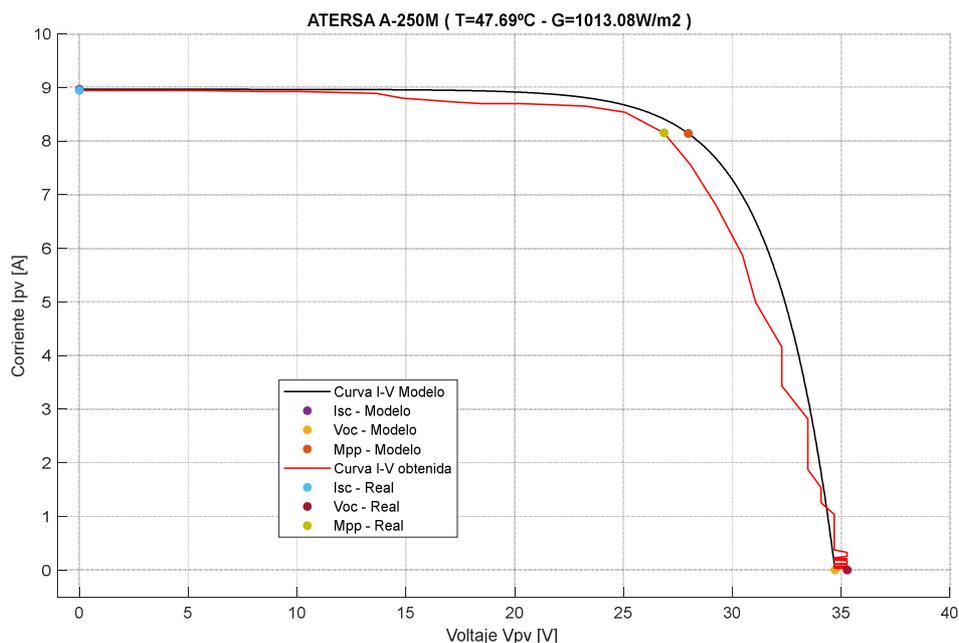


Figura 4.15. Curvas I-V del módulo P6-1 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)

En la [Figura 4.15](#) se muestra la curva I-V obtenida empleando el equipo construido y la curva I-V obtenida del modelado del panel fotovoltaico P6-1. Además, en la [Tabla 4.9](#) se muestra una comparación entre los parámetros más importantes de las dos curvas antes mencionadas.



Tabla 4.9. Parámetros obtenidos del modelo del módulo P6-1 y del trazador de curvas I-V.

Parámetro	Modelo	Real
P_{MPP}	227.80	219.08
V_{OC}	34.72	35.28
I_{SC}	8.97	8.95
V_{MPP}	27.98	26.86
I_{MPP}	8.14	8.15
FF	0.73	0.69
PF	0.96	
Relación de Corriente	0.91	0.91
Relación de Voltaje	0.81	0.76

De acuerdo a la [Figura 4.15](#) y a los valores mostrados en la [Tabla 4.9](#), se puede apreciar que el módulo fotovoltaico P6-1, es un módulo que presenta algún tipo de falla o deterioro; esto debido a que la forma de la curva I-V obtenida empleando el equipo construido presenta pequeños escalones en relación a la curva I-V modelada. Este escalonamiento en la forma de la curva se debe a la presencia de grietas en tres celdas del módulo, según se determina en [29]. El efecto de esta falla se ve reflejado en la potencia máxima de salida (disminución del 3.83%). Al analizar el valor de FF, se puede apreciar que este es inferior con respecto al valor modelado, lo que confirma la presencia de la falla. Se observa también, un incremento de la resistencia en serie del panel solar.

4.4.2.6 Curva I-V Módulo 6 - ATERSA A-250M P8-1

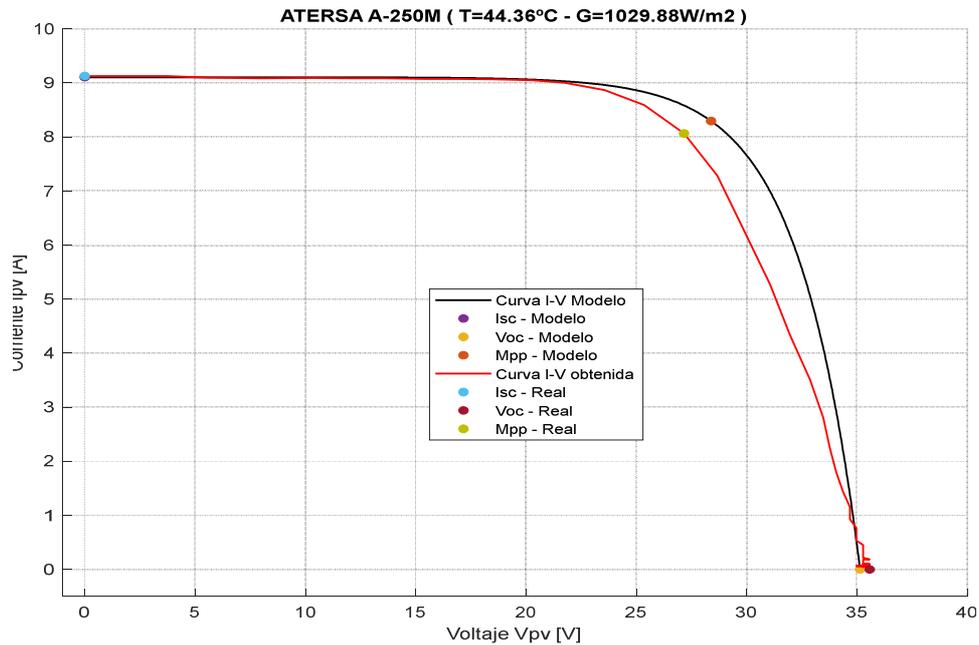


Figura 4.16. Curvas I-V del módulo P8-1 a) modelada (curva negra) y b) obtenida del trazador (curva roja)

En la [Figura 4.16](#) se muestra la curva I-V obtenida empleando el equipo construido y la curva I-V obtenida del modelado del panel fotovoltaico P8-1. Además, en la [Tabla 4.10](#) se muestra una comparación entre los parámetros más importantes de las dos curvas antes mencionadas.

Tabla 4.10. Parámetros obtenidos del modelo del módulo P8-1 y del trazador de curvas I-V.

Parámetro	Modelo	Real
P_{MPP}	235.46	219.06
V_{OC}	35.14	35.58
I_{SC}	9.11	9.13
V_{MPP}	28.39	27.17
I_{MPP}	8.29	8.06
FF	0.74	0.67
PF	0.93	
Relación de Corriente	0.91	0.88
Relación de Voltaje	0.81	0.76

De acuerdo a la [Figura 4.16](#) y a los valores mostrados en la [Tabla 4.10](#), se puede apreciar que el módulo fotovoltaico P8-1 es un módulo que presenta un deterioro, ya que la pendiente en la región de fuente de voltaje es menos pronunciada que la obtenida en el modelo. Esta variación en la forma



de la curva I-V se debe a un incremento de la resistencia en serie del panel ocasionada por la degradación del mismo, según se determinó en [29]. Además, al analizar el valor del FF y la relación de voltaje, se confirma la presencia de esta variación. El efecto de esta variación ocasiona una disminución del 6.97% en la potencia de salida de este módulo.

4.4.3 Comparación entre las curvas I-V obtenidas con el equipo construido y con un trazador comercial

En [29] se emplea el trazador comercial Solmetric PVA-600, cuyo precio es de 3,895.00 USD, para la obtención de las curvas I-V de los módulos fotovoltaicos. Utilizando los datos obtenidos de ese trabajo, a continuación, se realiza una comparación entre las curvas I-V obtenidas con el trazador comercial con respecto a las curvas I-V obtenidas con el equipo construido, esto para los cuatro paneles solares monocristalinos analizados, y de esta manera poder verificar el funcionamiento del equipo construido.

Puesto que las condiciones ambientales a las cuales se obtuvieron las curvas I-V antes mencionadas son diferentes, se emplea el mismo procedimiento utilizado en [29] para la corrección de las curvas I-V a STC, el cual se basa en el primer procedimiento de la norma IEC 60891:2009. Los resultados obtenidos de esta comparación se muestran en las Figuras 4.17 – 4.20.

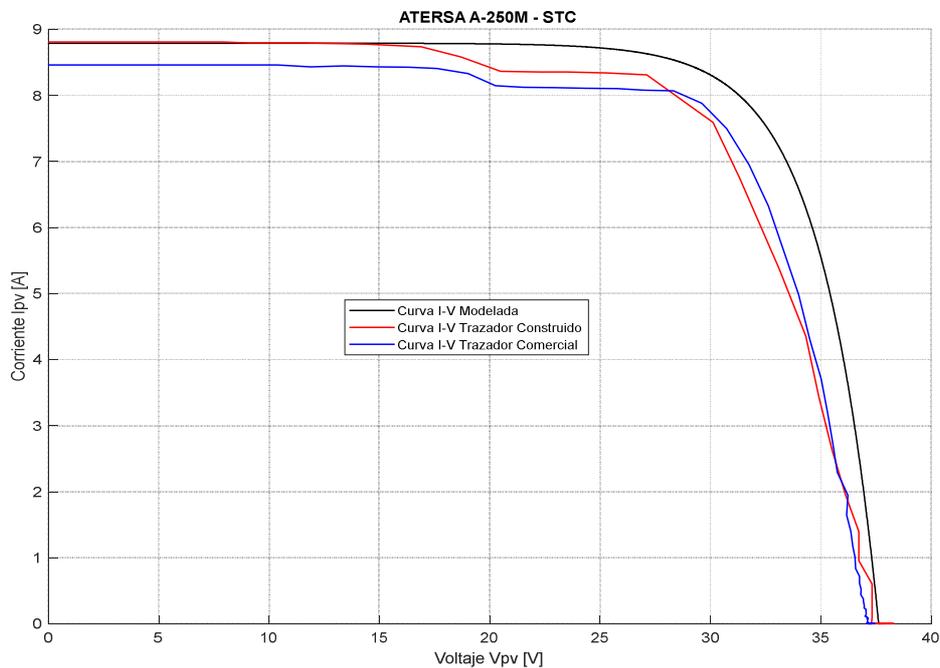


Figura 4.17. Curvas I-V del módulo P5-3 en STC a) modelada (curva negra), b) obtenida del trazador I-V construido (curva roja) y c) obtenida del trazador I-V comercial (curva azul).

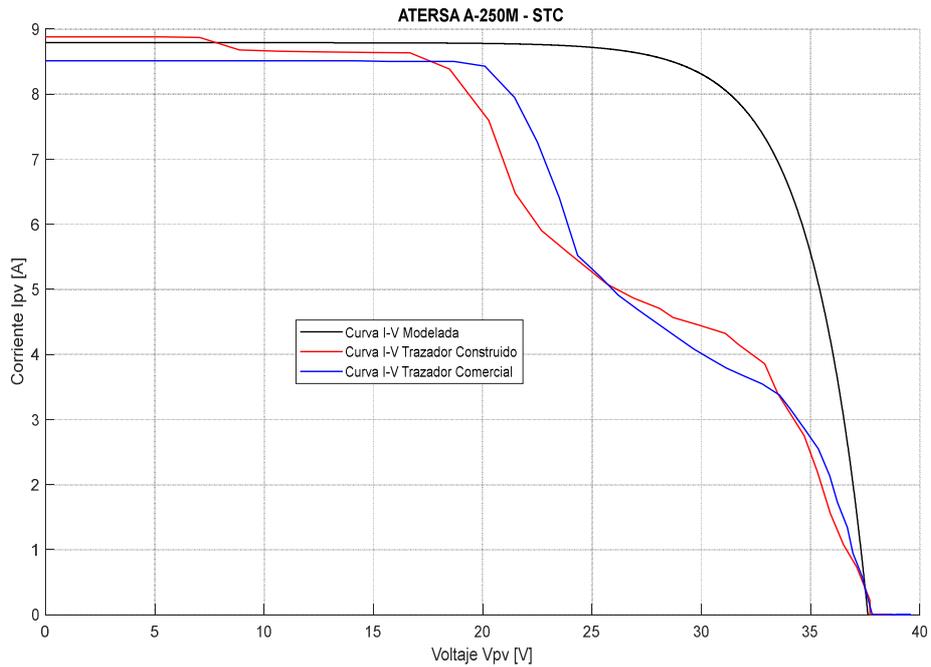


Figura 4.18. Curvas I-V del módulo P5-13 en STC a) modelada (curva negra), b) obtenida del trazador I-V construido (curva roja) y c) obtenida del trazador I-V comercial (curva azul).

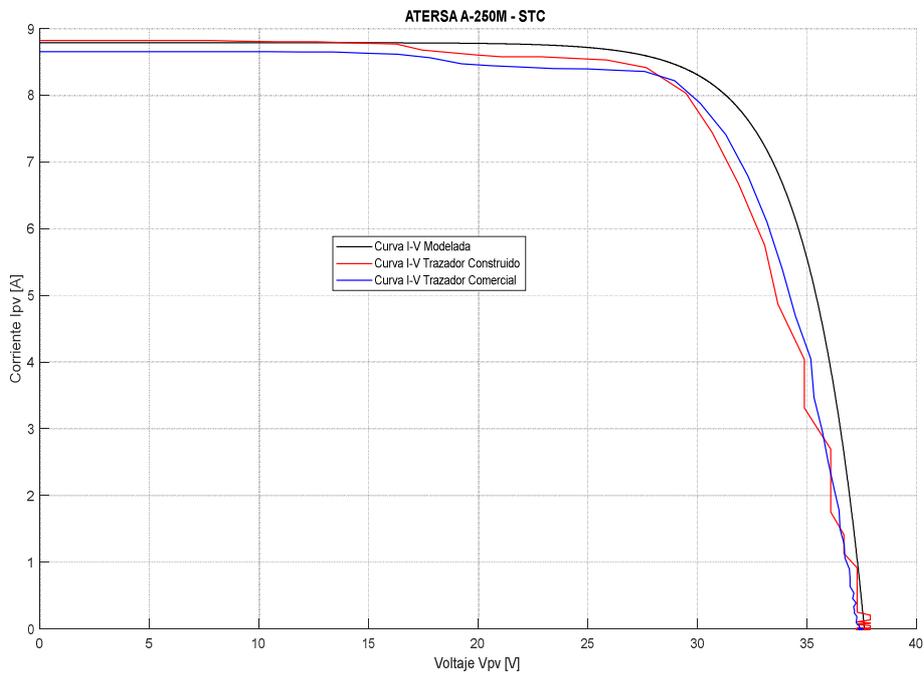


Figura 4.19. Curvas I-V del módulo P6-1 en STC a) modelada (curva negra), b) obtenida del trazador I-V construido (curva roja) y c) obtenida del trazador I-V comercial (curva azul).

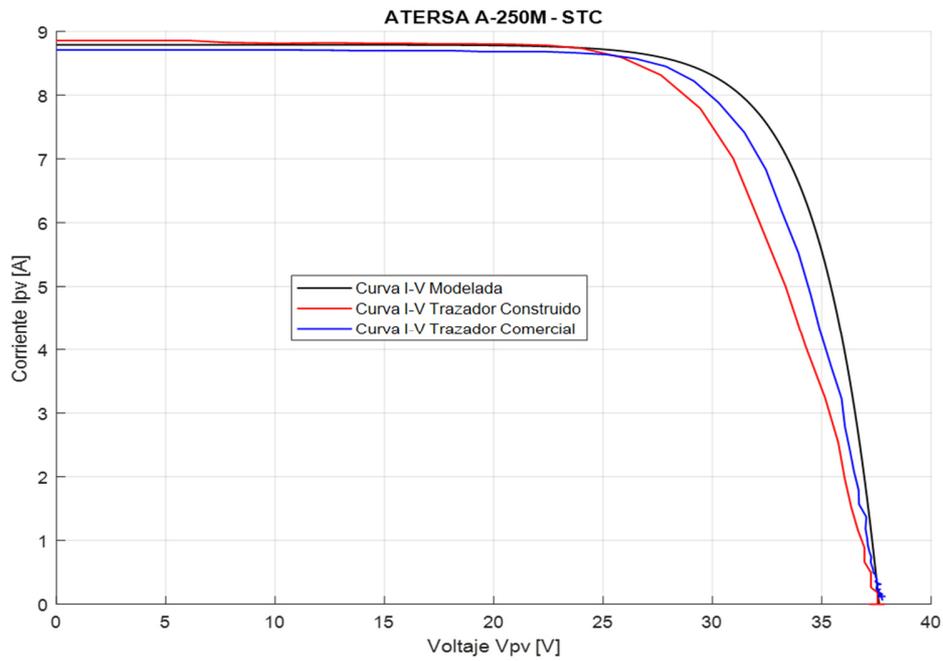


Figura 4.20. Curvas I-V del módulo P8-1 en STC a) modelada (curva negra), b) obtenida del trazador I-V construido (curva roja) y c) obtenida del trazador I-V comercial (curva azul).

Como se puede evidenciar en las Figuras 4.17 – 4.20, si bien las curvas I-V obtenidas con el equipo construido no son exactamente iguales a las curvas I-V obtenidas con el equipo comercial, existe una gran concordancia entre las mismas, por lo cual se confirma que el equipo construido permite la obtención de las curvas I-V de módulos fotovoltaicos de manera correcta.



Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Al culminar este trabajo, en función de los objetivos planteados, se llegó a las siguientes conclusiones.

El uso de los trazadores de curvas I-V es de gran importancia en el campo de la energía solar fotovoltaica, ya que permiten obtener las curvas características corriente-voltaje de los sistemas de generación fotovoltaicos. Las curvas I-V son fuentes valiosas de información, ya que, mediante el análisis de las mismas, es posible evaluar el rendimiento del circuito de generación fotovoltaico y detectar la presencia de fallas o deterioros que pueden estar afectando al sistema.

Los distintos métodos y topologías presentes en la literatura para la obtención de las curvas I-V se analizan en este trabajo, en donde se describe fundamentalmente los principios de operación de cada uno de ellos. Esta revisión bibliográfica permitió validar la topología escogida (método de carga capacitiva) para la construcción del trazador de curvas I-V.

Se logró diseñar y construir con éxito un trazador de curvas I-V portátil, basado en el método de carga capacitiva. El equipo construido tiene un diseño sencillo y permite la elección del valor de capacitancia de entre cuatro valores posibles, lo cual lo convierte en un equipo escalable, ideal para evaluar el rendimiento de diversos tipos de módulos o strings fotovoltaicos, bajo diferentes condiciones ambientales.

El equipo es capaz obtener las curvas I-V de circuitos de generación fotovoltaicos con voltajes de circuito abierto iguales o inferiores a los 500 V, por lo cual strings con hasta 12 módulos fotovoltaicos pueden ser evaluados. En cuanto a la capacidad de corriente, el equipo es capaz de medir corrientes de cortocircuito de hasta 16 A.



El trazador de curvas I-V construido está diseñado para que su utilización sea lo más sencilla posible. Por esta razón, se desarrolló una interfaz gráfica que le permite al usuario final controlar todo el proceso de obtención y visualización de las curvas I-V.

Una vez finalizado el proceso de construcción y el proceso de calibración de los sensores utilizados, se empleó el prototipo para obtener las curvas I-V de seis módulos fotovoltaicos del laboratorio de Micro-red de la Universidad de Cuenca, con el fin de evaluar el rendimiento de los mismos. Dos de los seis módulos analizados eran prácticamente nuevos, por lo cual el análisis de las curvas I-V obtenidas no mostró la presencia de fallas o deterioros en los mismos. En cuanto a los restantes cuatro módulos fotovoltaicos, el análisis de las curvas I-V obtenidas muestra la presencia de fallas o deterioro. Entre las fallas encontradas se encuentran puntos calientes, grietas en las celdas y aumento de la resistencia en serie de los módulos fotovoltaicos. La información obtenida de los cuatro módulos fotovoltaicos se comparó con respecto a la obtenida de una investigación reciente, en donde se emplea un trazador de curvas I-V comercial. Los resultados fueron similares en ambos casos, validando de esta manera el funcionamiento del equipo construido.

5.2 Recomendaciones

Para la obtención de las curvas I-V, se recomienda seguir las consideraciones mencionadas en el capítulo 4 de este trabajo; esto con la finalidad de que los resultados obtenidos sean lo más veraces posibles.

En caso de requerir abrir el trazador de curvas I-V construido, verificar que el equipo este desconectado del sistema de generación fotovoltaico y que los capacitores estén descargados.

Emplear todas las medidas de seguridad a la hora de utilizar el trazador de curvas I-V, sobre todo, cuando se trabaja con strings fotovoltaicos con valores de voltaje elevados.



Referencias

- [1] S. Sarikh, M. Raoufi, A. Bennouna, A. Benlarabi y B. Ikken, «Implementation of a plug and play I-V curve tracer dedicated to characterization and diagnosis of PV modules under real operating conditions,» *Energy Conversion and Management*, vol. 209, 2020.
- [2] International Energy Agency, «Renewables 2020 Data Explorer,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/articles/renewables-2020-data-explorer?mode=market®ion=World&product=Total>. [Último acceso: 10 Diciembre 2020].
- [3] Y. Zhu y W. Xiao, «A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer,» *Solar Energy*, n° 196, pp. 346-357, 2020.
- [4] G. N. Tiwari y R. K. Mishra, *Advanced Renewable Energy Sources*, Cambridge, Reino Unido: RSC, 2012.
- [5] Tushar K. Ghosh y Mark A. Prelas, *Energy Resources and Systems. Volume 1: Fundamentals and Non-Renewable Resources*, Springer, 2009.
- [6] Tushar K. Ghosh y Mark A. Prelas, *Energy Resources and Systems Volume 2: Renewable Resources*, Springer, 2011.
- [7] Gerard M Crawley, *Solar Energy*, World Scientific, 2016.
- [8] International Energy Agency, «Data and statistics,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TotElecCons>. [Último acceso: 10 Diciembre 2020].
- [9] J. Schallenberg, G. Piernavieja, C. Hernández, P. Unamunzaga, R. García, M. Díaz, D. Cabrera, G. Martel, J. Pardilla y V. Subiela, *Energías renovables y eficiencia energética*, Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008.
- [10] P. Vasconcelos y M. Aguirre, «Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 74, p. 590–601, 2017.
- [11] W. Xiao, *Photovoltaic Power System. Modeling, Design, and Control.*, Wiley, 2017.



- [12] Tindo Solar, «POLY VS MONO CRYSTALLINE,» [En línea]. Available: <https://www.tindsolar.com.au/learn-more/poly-vs-mono-crystalline/>. [Último acceso: 30 Diciembre 2020].
- [13] Panasonic, «Amorton - Celdas fotovoltaicas de silicio amorfo,» [En línea]. Available: <https://www.panasonic-electric-works.com/es/amorton-celdas-fotovoltaicas-de-silicio-amorfo.htm>. [Último acceso: 30 Diciembre 2020].
- [14] Solar Builder, «Researchers improve efficiency of organic PV cells to 15 percent,» [En línea]. Available: <https://solarbuildermag.com/news/organic-pv-cell-efficiency-improves-to-15-percent/>. [Último acceso: 30 Diciembre 2020].
- [15] R. Foster, M. Ghassemi y A. Cota, Solar Energy. Renewable Energy and the Environment, CRC Press, 2010.
- [16] G. Petrone, C. Ramos-Paja y G. Spagnuolo, Photovoltaic Sources Modeling, JohnWiley & Sons Ltd, 2017.
- [17] Alternative Energy Tutorials, «Solar Cell I-V Characteristic,» [En línea]. Available: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/solar-cell-i-v-characteristic.html>. [Último acceso: 28 Diciembre 2020].
- [18] The German Energy Society, Planning and Installing Photovoltaic Systems. A guide for installers, architects and engineers, Earthscan, 2008.
- [19] Solmetric, «Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays,» [En línea]. Available: <http://resources.solmetric.com/get/GuidetoInterpretingIV-Curves.pdf>. [Último acceso: 30 Diciembre 2020].
- [20] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo y M. Vitelli, Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems, CRC Press, 2013.
- [21] CanadianSolar, «Datasheet HiKu CS3W-P,» [En línea]. Available: https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiKu_CS3W-P_EN-2.pdf.
- [22] S. White, Solar Photovoltaic Basics: A Study Guide for the NABCEP Associate Exam, Routledge, 2019.
- [23] Asociación Española de Normalización UNE , «UNE-EN 60904-1:2007. Dispositivos fotovoltaicos. Parte 1: Medida de la característica corriente-voltaje de dispositivos fotovoltaicos. (IEC 60904-1:2006).».
- [24] Asociación Española de Normalización UNE, «UNE-EN 60891:2010. Dispositivos fotovoltaicos. Procedimiento de corrección con la temperatura y la irradiancia de la característica I-V de dispositivos fotovoltaicos.».
- [25] Asociación Española de Normalización UNE, *UNE-EN 62446-1:2017. Sistemas fotovoltaicos (FV). Requisitos para ensayos, documentación y mantenimiento. Parte 1: Sistemas conectados a la red. Documentación, ensayos de puesta en marcha e inspección..*
- [26] J. M. Pó, *Assessment of the IEC 60891 norm conversion methods under outdoor test conditions*, 2011.
- [27] P. Hernday, «Interpreting I-V Curve Deviations,» [En línea]. Available: <http://resources.solmetric.com/get/SolarPro%20I-V%20feature%20article,%20Hernday.pdf>. [Último acceso: 30 Diciembre 2020].



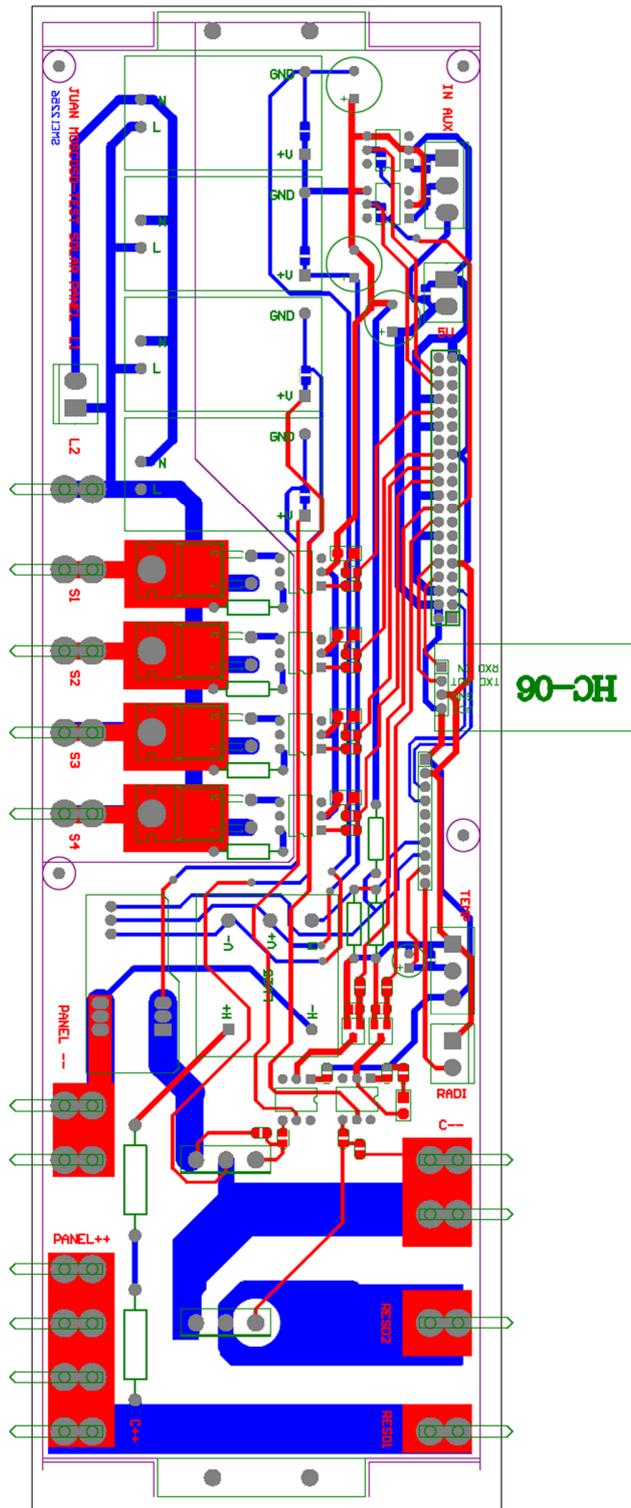
- [28] R. García-Valverde, S. Chaouki-Almagro, M. Corazza, N. Espinosa, M. Hösel, R. R. Søndergaard, M. Jørgensen, J. A. Villarejo y F. C. Krebs, «Portable and wireless I-V-curve tracer for 45 kV organic photovoltaic modules,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, nº 156, pp. 60-65, 2016.
- [29] M. A. Dávila, «Estudio de técnicas invasivas y no invasivas para evaluar el deterioro de paneles solares fotovoltaicos,» Cuenca, Ecuador, 2020.
- [30] E. Duran, M. Piliouguine, M. Sidrach-de-Cardona, J. Galan y J. Andujar, «Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A Review,» de *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, CA, USA, 2008.
- [31] A. Rivai y N. A. Rahim, «Binary-based tracer of photovoltaic array characteristics,» de *IET Renewable Power Generation* 8, 2014.
- [32] A. Willoughby, T. Omotosho y A. Aizebeokhai, «A simple resistive load I-V curve tracer for monitoring photovoltaic module characteristics,» de *2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Hammamet, Túnez, 2014.
- [33] J. Muñoz y E. Lorenzo, «Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays,» *Solar Energy*, nº 80, p. 1489–1497, 2006.
- [34] J. J. Maestro Ibirriaga, X. M. de Mendiluce Pena, A. Opritescu, D. Sera and R. Teodorescu, «Low-cost, high flexibility I-V curve tracer for photovoltaic modules,» de *2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, Rumania, 2010.
- [35] J. Muñoz, J. d. l. C. Higuera, M. Fuentes y J. A. Tejero, «New Portable Capacitive Load Able to Measure PV Modules, PV Strings and Large PV Generators,» de *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2011.
- [36] AliExpress, [En línea]. Available: https://es.aliexpress.com/item/4000529762819.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.332f4567Esg1xp&algo_pvid=5d34c406-f442-434e-9a1a-4236dabb863a&algo_expid=5d34c406-f442-434e-9a1a-4236dabb863a-2&btsid=0bb0623916134905998174241ee4f8&ws_ab_test=searchweb0_0,search. [Último acceso: 15 Enero 2021].
- [37] RS Components, [En línea]. Available: <https://ie.rs-online.com/web/p/igbts/7961343/>. [Último acceso: 15 Enero 2021].
- [38] Siemens, [En línea]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/Product/3RT2024-1AG20>. [Último acceso: 15 Enero 2021].
- [39] IBS Electronics, [En línea]. Available: <http://www.ibselectronics.com/ibsstore/10sr-27k-j-ate-electronics-resistor-27kohm-radial.html>. [Último acceso: 15 Enero 2021].
- [40] EYTSA, [En línea]. Available: <https://www.eytsa.com/producto/resistencia-100w-500-ohms-%C2%B15-tub-fijo-1100j500e-ohmite/>. [Último acceso: 15 Enero 2021].
- [41] M. Hawkins, «Simple Guide to the Raspberry Pi GPIO Header,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi-spy.co.uk/2012/06/simple-guide-to-the-rpi-gpio-header-and-pins/>. [Último acceso: 15 Enero 2021].
- [42] LEM, [En línea]. Available: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-p.pdf. [Último acceso: 11 Enero 2021].



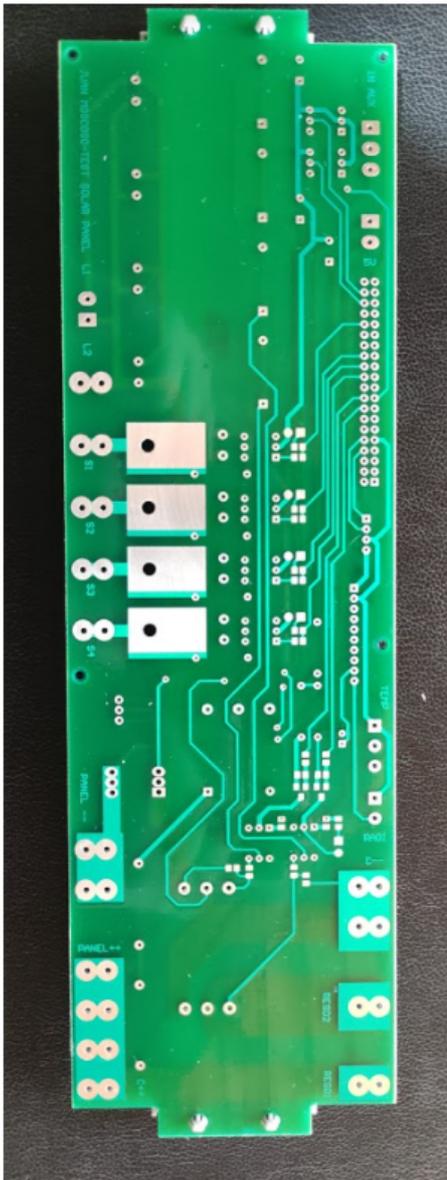
- [43] LEM, [En línea]. Available: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lah_25-np.pdf. [Último acceso: 11 Enero 2021].
- [44] Adafruit, «ADS1015 12-Bit ADC - 4 Channel with Programmable Gain Amplifier,» [En línea]. Available: <https://www.adafruit.com/product/1083>. [Último acceso: 11 Enero 2021].
- [45] F. Spertino, J. Ahmad, A. Ciocia, P. D. Leo, A. F. Murtaza y M. Chiaberge, «Capacitor charging method for I-V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems,» *Solar Energy*, vol. 119, pp. 461-473, 2015.
- [46] Y. Erkaya, I. Flory y S. X. Marsillac, «Development of a string level I-V curve tracer,» de *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Denver, Estados Unidos, 2014.
- [47] ATERSA, «Módulo fotovoltaico A-245M MN TN / A-250M MN TN / A-255M MN TN,» [En línea]. Available: <http://energiasecologicasencasa.com/uploads/Image/modulo%20fotovoltaico%20A245-250-255M%20MN%20TN.pdf>. [Último acceso: 15 Enero 2021].
- [48] JINKO, «JKM275PP-60 260-275 Watt POLY CRYSTALLINE MODULE,» [En línea]. Available: <https://solarpowerdirect.com.au/brochures/products/JKM275PP-60-Eagle.pdf>. [Último acceso: 15 Enero 2021].



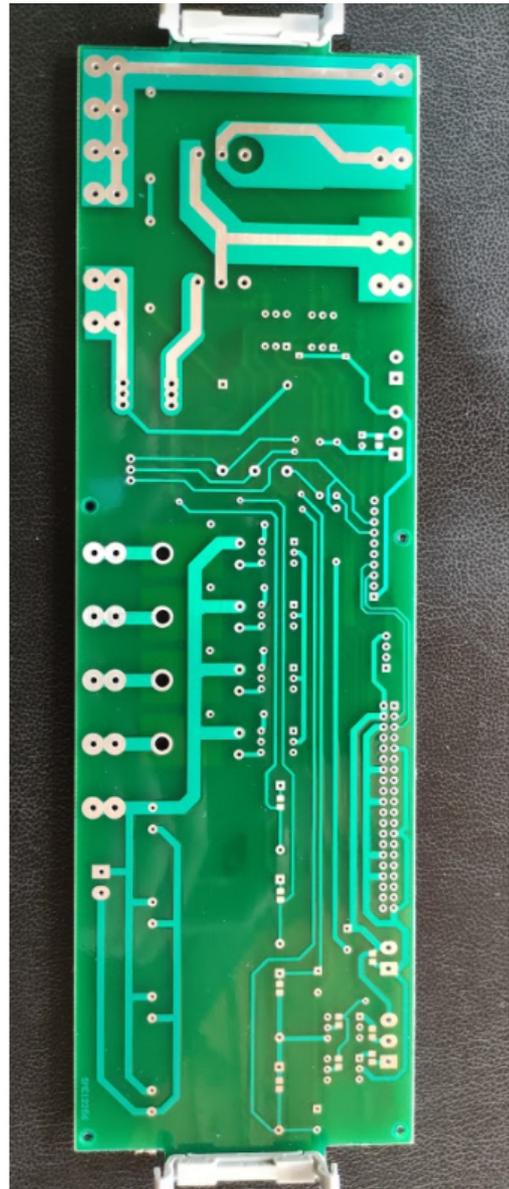
Anexos



Anexo 1. Esquema de la Placa de circuito impreso



a)

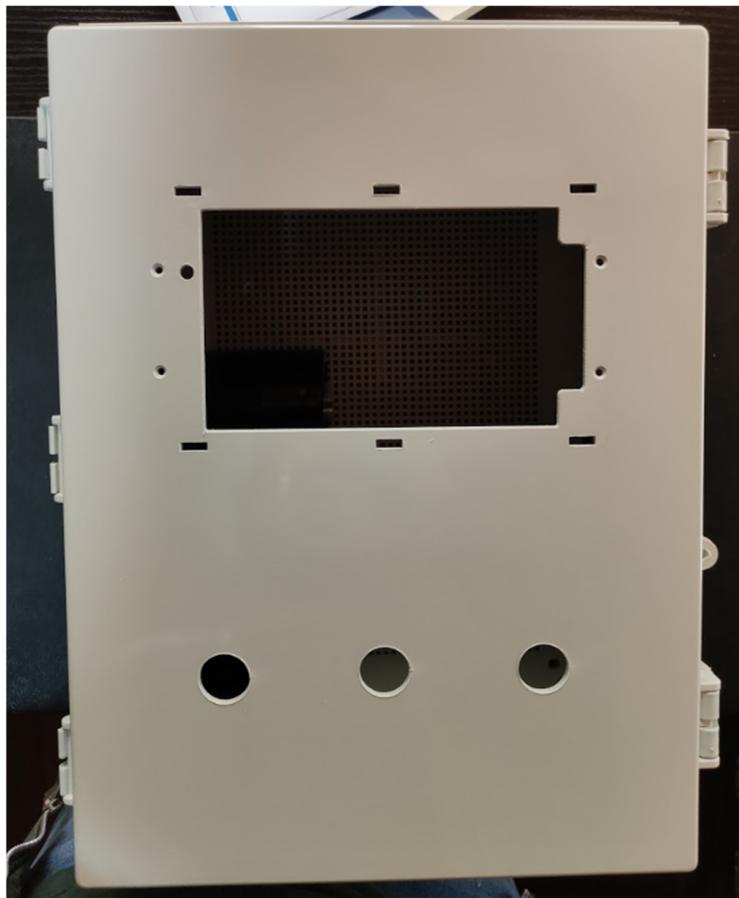


b)

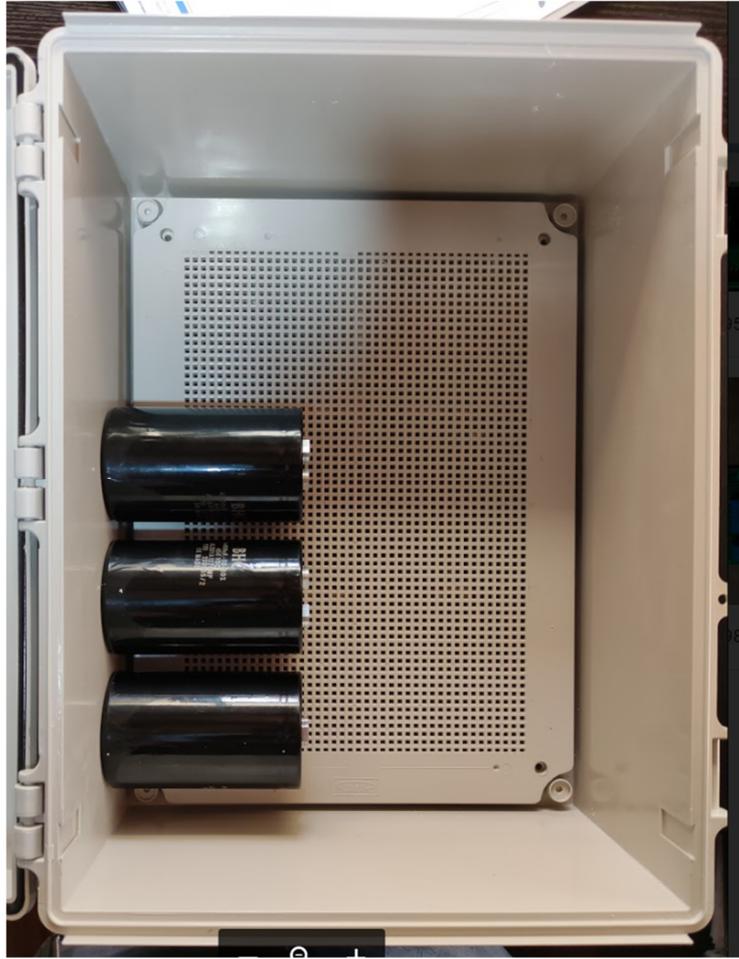
Anexo 2. PCB construida a) parte frontal y b) parte posterior



Anexo 3. PCB con los componentes ensamblados.



Anexo 4. Gabinete Eléctrico.



Anexo 5. Interior del Gabinete Eléctrico.



```
import sys #Importamos módulo sys
from PyQt5 import uic, QtWidgets #Importamos módulo uic y QtWidgets
qtCreatorFile = "prueba0.ui" # Nuestro archivo UI aquí.
Ui_MainWindow, QtBaseClass = uic.loadUiType(qtCreatorFile) #El modulo ui carga
class VentanaPrincipal(QtWidgets.QMainWindow, Ui_MainWindow):
    def __init__(self): #Constructor de la clase
        QtWidgets.QMainWindow.__init__(self) #Constructor
        Ui_MainWindow.__init__(self) #Constructor
        self.setupUi(self) # Método Constructor de la ventana

        #Acción al presionar los botones INICAR, GRÁFICA-IV , GRÁFICA P-V
        self.pushButton.clicked.connect(self.iniciar)
        self.pushButton_2.clicked.connect(self.grafica_iv)
        self.pushButton_3.clicked.connect(self.grafica_pv)
        self.pushButton_4.clicked.connect(self.condiciones_iniciales) #Finalizar
        self.condiciones_iniciales()

#Función que se llama al presionar
def iniciar(self):

    # -*-*-*- Botones *-*-*-*-
    self.pushButton.setEnabled (False)

    #-*-*-*- Señal de Disparo *-*-*-*-
    global disparo
    while (disparo.value == True):
        pass

    # -*-*-*- DATOS INICIALES *-*-*-*-
    #Capacitancia Escogida
    cap=self.comboBox.currentIndex()
    #Ganancia ADS
    gain_ADS=self.comboBox_3.currentIndex()

    # -*-*-*- ADS1115 e I2C *-*-*-*- *****IMPORTANTE*****
    i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA) # Inicializa el bus I2C
    ads= ADS.ADS1015(i2c) # Conexión ADS1115 al bus I2C (Puede ser también el módulo ADS1015)
    rate=3300 # 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_ADS ==0 :
        ganancia=1 # Ganancia Programable +4.096V
        m1=(4.096/32767)*(100000*10)/(135*25) #Factor de conversión voltaje
        m2=(4.096/32767)*(25000)/(220*25) #Factor de conversión corriente
    else:
        ganancia=2 # Ganancia Programable +2.048V
        m1=(2.048/32767)*(100000*10)/(135*25) #Factor de conversión voltaje
        m2=(2.048/32767)*(25000)/(220*25) #Factor de conversión corriente
```




```
nombre_doc='documento1'
nombre_doc=nombre_doc+'.txt'
informacion=[fecha,temperatura_final,irradiancia_final,tiempo_carga]
informacion.extend(voltaje)
informacion.extend(corriente)

doc=open(nombre_doc,'w+')
for i in range (len(informacion)):
    doc.write(str(informacion[i]))
    doc.write('\n')
doc.close()

# ***** POTENCIA *****
global potencia
potencia = [None]*samples
for i in range(samples):
    potencia[i] = voltaje[i]*corriente[i]

# ***** Valores curva I-V *****
Voc= max(voltaje)
Isc= max(corriente)
Pmax= max(potencia)
Vmpp= voltaje[potencia.index(max(potencia))]
Impp= corriente[potencia.index(max(potencia))]
FF=(Vmpp*Impp)/(Voc*Isc)
self.label_12.setText(str(round(Pmax,2)))
self.label_13.setText(str(round(Voc,2)))
self.label_14.setText(str(round(Isc,2)))
self.label_15.setText(str(round(Vmpp,2)))
self.label_16.setText(str(round(Impp,2)))
self.label_17.setText(str(round(FF,2)))
self.label_18.setText(str(temperatura_final))
self.label_20.setText(str(irradiancia_final))

# ***** Botones *****
self.pushButton_2.setEnabled (True)
self.pushButton_3.setEnabled (True)
self.pushButton_4.setEnabled (True)

def grafica_iv(self):
    #print("Gráfica I-V")
    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(self):
    #print("Gráfica P-V")
    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()

def condiciones_iniciales (self):

    # -.*.*.*.* IGBT *.*.*.*.*-
    global igbt1
    global igbt2
    igbt1.value = False # IGBT1 = 0
    igbt2.value = False # IGBT2 = 0

    # -.*.*.*.* Contadores *.*.*.*.*-
    global s1
    global s2
    global s3
    global s4
    s1.value = False # contactor1 = 0
    s2.value = False # contactor2 = 0
    s3.value = False # contactor3 = 0
    s4.value = False # contactor4 = 0

    # *.*.*.*.* Datos Panel *.*.*.*.*-
```

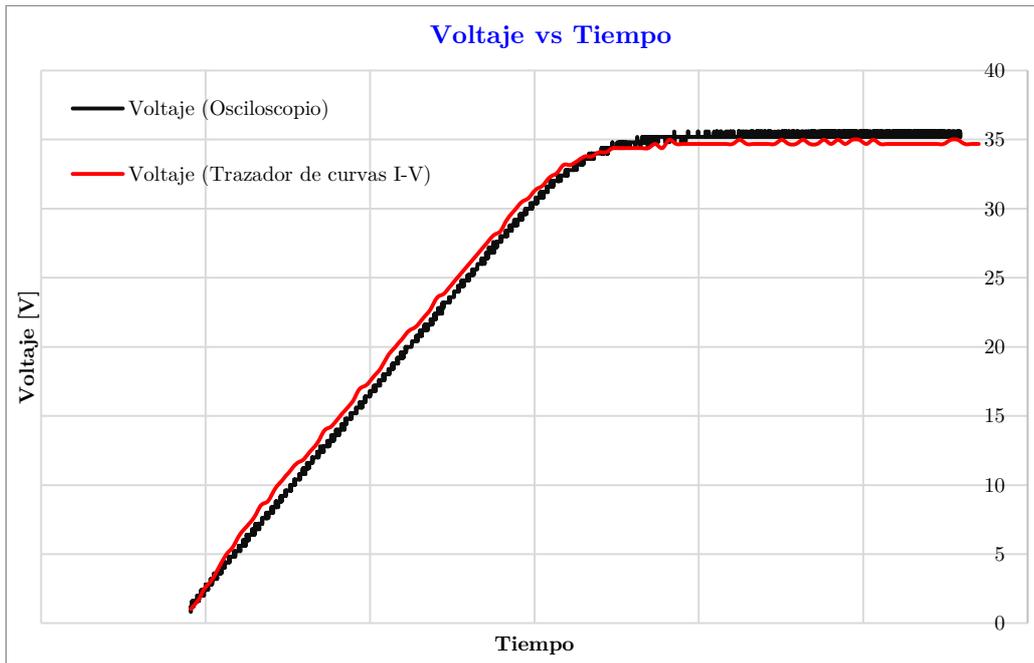


```
self.label_12.setText('-')
self.label_13.setText('-')
self.label_14.setText('-')
self.label_15.setText('-')
self.label_16.setText('-')
self.label_17.setText('-')
self.label_18.setText('-')
self.label_20.setText('-')

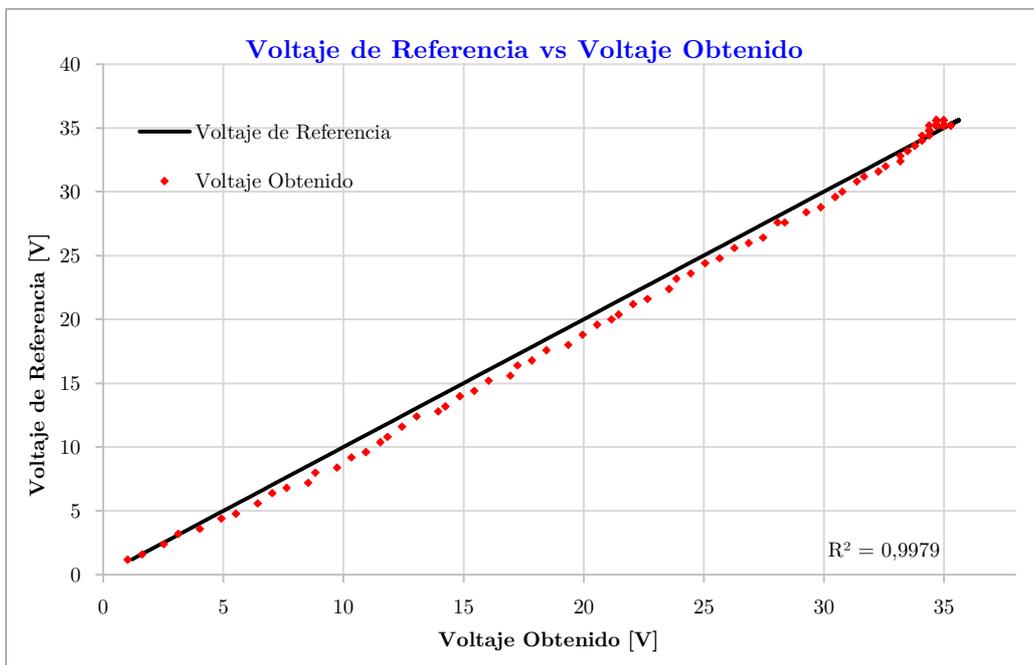
# -*-_*_*_* Botones *_*_*_*_*-
self.pushButton.setEnabled (True)
self.pushButton_2.setEnabled (False)
self.pushButton_3.setEnabled (False)
self.pushButton_4.setEnabled (False)

if __name__ == "__main__": #Condicional que comprueba si ha sido ejecutado o importado
    #NO importamos el módulo Sys
    app = QtWidgets.QApplication([]) #Creamos app y le pasamos una lista de argumentos vacíos
    #Borramos todo el resto del código y ahora vamos a instanciar nuestra clase MainWindow:
    ventana = VentanaPrincipal()
    #Ahora es hora de mostrar esta ventana:
    ventana.show()
    #Aquí creamos el bucle de ejecución
    app.exec_() #Usamos app.exec_() para crear el bucle de ejecución
```

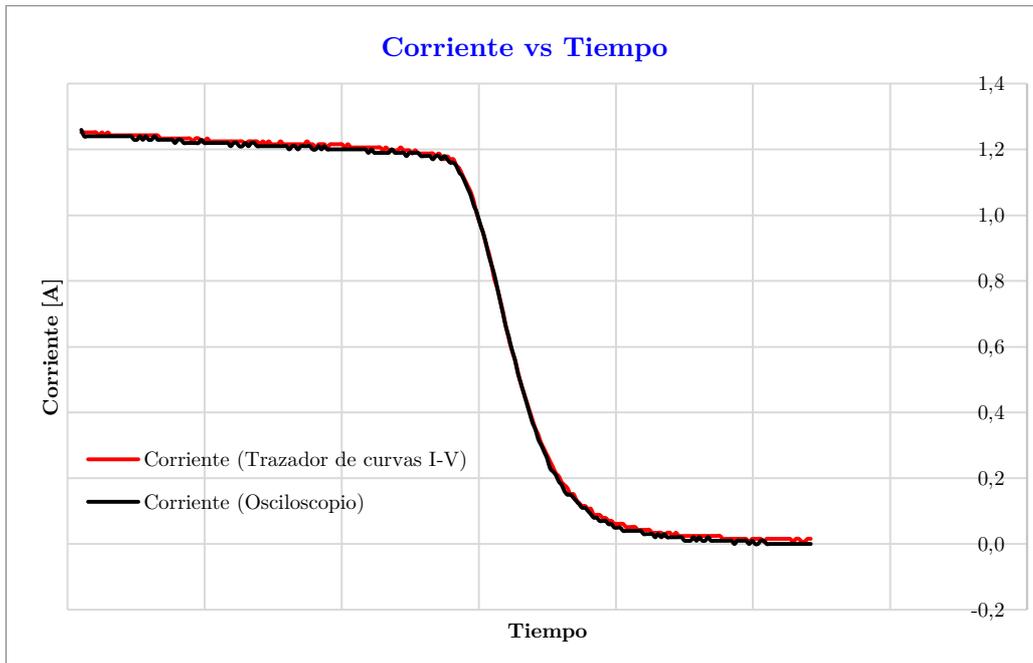
Anexo 6. Script desarrollado en Python.



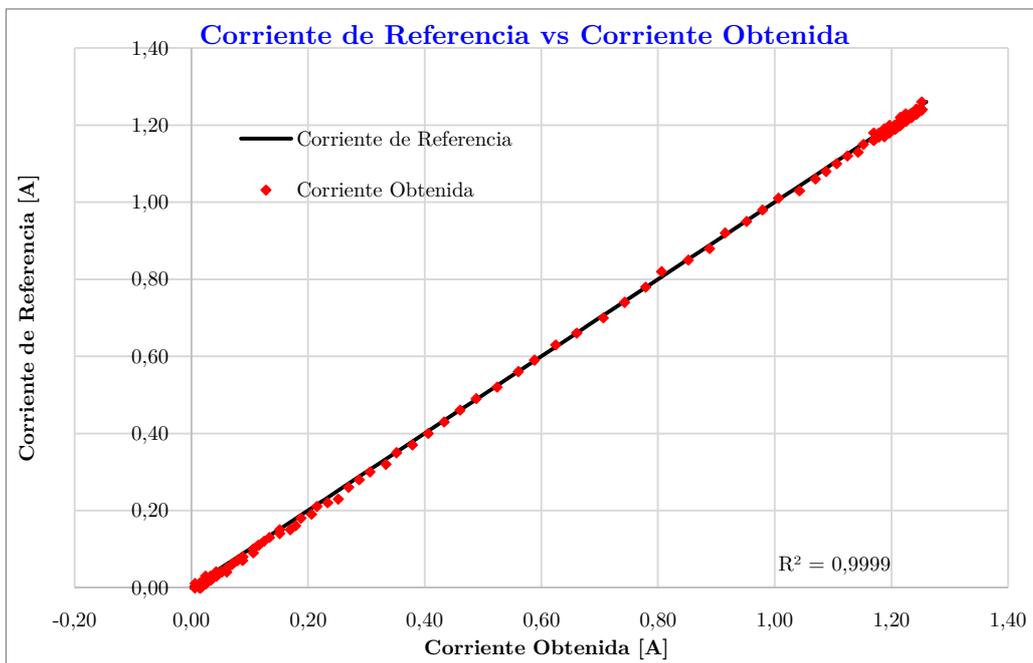
Anexo 7. Gráfica voltaje-tiempo obtenida por el osciloscopio (curva negra) y por el equipo construido (curva roja).



Anexo 8. Comparación entre el voltaje obtenido (trazador de curvas I-V) y el voltaje de referencia (osciloscopio).



Anexo 9. Gráfica corriente-tiempo obtenida por el osciloscopio (curva negra) y por el equipo construido (curva roja).



Anexo 10. Comparación entre la corriente obtenida (trazador de curvas I-V) y la corriente de referencia (osciloscopio).



+Ultra *nueva gama*

➔ Módulo fotovoltaico
A-245M MN TN / A-250M MN TN / A-255M MN TN



- +**UltraTolerancia positiva**
Positiva 0/+5 Wp
- +**UltraCalidad**
Anti Hot-Spot
- +**UltraGarantía**
10 años de garantía de producto
- +**UltraFiabilidad**
En el mercado desde 1979
- +**UltraResistencia**
Cristal templado de 4 mm
- +**UltraTES**
Verificación eléctrica célula a célula

Sistema único en el mercado, patentado por Aterosa.

Para una información más detallada de los términos de la garantía, consulte:

➔ www.aterosa.com

Nueva gama Ultra con Tolerancia positiva



Nueva gama Ultra con Tolerancia positiva +

Características eléctricas (STC: 1kW/m², 25°C±2°C y AM 1,5)*

	A-245M	A-250M	A-255M
Potencia Nominal (0/+5 W)	245 W	250 W	255 W
Eficiencia del módulo	15,04%	15,35%	15,66%
Corriente Punto de Máxima Potencia (Imp)	8,14 A	8,24 A	8,34 A
Tensión Punto de Máxima Potencia (Vmp)	30,13 V	30,35 V	30,57 V
Corriente en Cortocircuito (Isc)	8,69 A	8,79 A	8,89 A
Tensión de Circuito Abierto (Voc)	37,48 V	37,62 V	37,76 V

Parámetros térmicos

Coefficiente de Temperatura de Isc (α)	0,03% /°C
Coefficiente de Temperatura de Voc (β)	-0,34% /°C
Coefficiente de Temperatura de P (γ)	-0,43% /°C

Características físicas

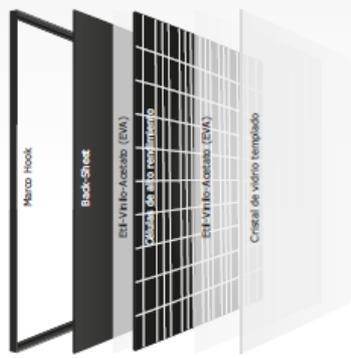
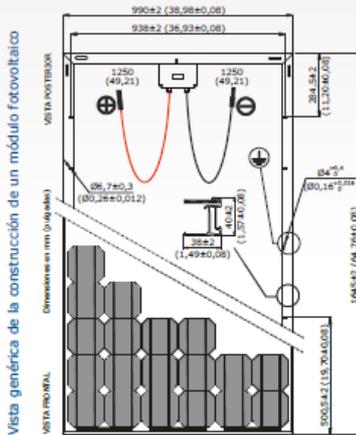
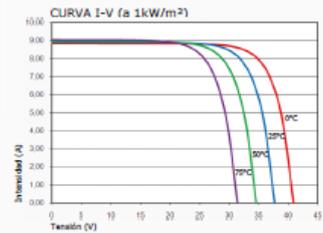
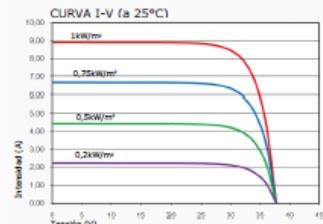
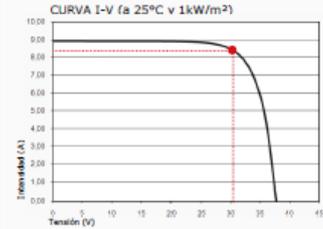
Dimensiones (mm ± 2 mm)	1645x990x40
Peso (kg)	21,5
Área (m²)	1,63
Tipo de célula	Monocristalina 156x156 mm (6 pulgadas)
Células en serie	60 (6x10)
Cristal delantero	Cristal templado ultra claro de 4 mm
Marco	Aleación de aluminio pintado en poliéster
Caja de conexiones / Opcional	QUAD IP54 / QUAD IP65
Cables	H+S Radox Solar 4 mm²
Conectores	H+S Radox Solar

Rango de funcionamiento

Temperatura	-40°C a +85°C
Máxima Tensión del Sistema / Protección	1000 V / CLASS II
Carga Máxima Viento / Nieve	2400 Pa (130 km/h) / 5400 Pa (551 kg/m²)
Máxima Corriente Inversa (IR)	15,1 A

*Especificaciones eléctricas medidas en STC. NOCT: 47±2°C. Tolerancias medida STC: ±3% (Pmp); ±10% (Isc, Voc, Imp, Vmp).

Curvas modelo A-255M



- Módulos por caja: 25 uds
- Peso por palé: 560 kg
- En un contenedor de 40 pies entran 26 cajas: 650 paneles
- En un contenedor de 20 pies entran 12 cajas: 300 paneles
- En un camión TAUTLINER entran 30 cajas: 750 paneles



NOTA: Los datos contenidos en esta documentación están sujetos a modificación sin previo aviso.

www.atersa.com • atersa@elecnor.com
Madrid 915 178 452 • Valencia 902 545 111 • Italia +39 039 226 24 82 • Alemania +49 151 153 988 44

Revisado: 05/09/12
Ref.: MU-6M (2) 6x10 MN TN-G
© Atersa SL, 2012



Anexo 11. Hoja de datos del módulo fotovoltaico ATERSA A-250M [47].



www.jinkosolar.com



Eagle 60P

260-280 Watt

POLY CRYSTALLINE MODULE

Positive power tolerance of 0~+3%

ISO9001:2008 - ISO14001:2004 - OHSAS18001 certified factory.
IEC61215 - IEC61730 certified products.



(5BB)



KEY FEATURES



5 Busbar Solar Cell:

5 busbar solar cell adopts new technology to improve the efficiency of modules, offers a better aesthetic appearance, making it perfect for rooftop installation.



High Power Output:

Polycrystalline 60-cell module achieves a power output up to 280Wp.



PID RESISTANT:

Eagle modules pass PID test, limited power degradation by PID test is guaranteed for mass production.



Low-light Performance:

Advanced glass and surface texturing allow for excellent performance in low-light environments.



Severe Weather Resilience:

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



Durability against extreme environmental conditions:

High salt mist and ammonia resistance certified by TUV NORD.

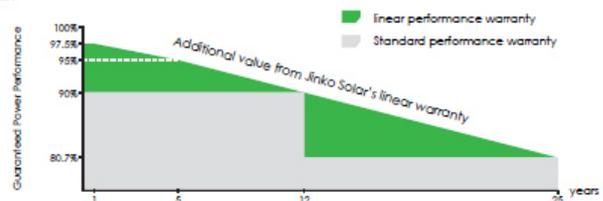


Temperature Coefficient:

Improved temperature coefficient decreases power loss during high temperatures.

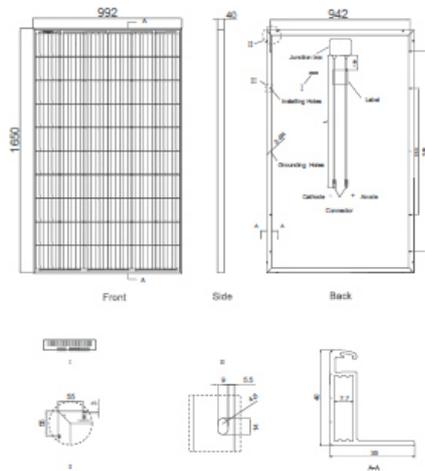
LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

10 Year Product Warranty • 25 Year Linear Power Warranty





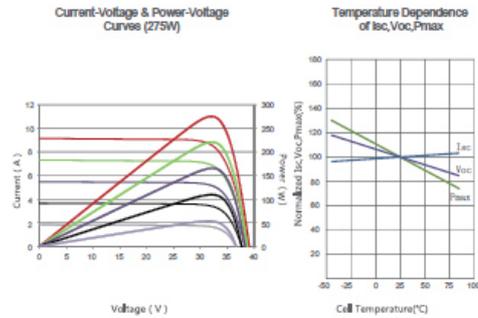
Engineering Drawings



Packaging Configuration

(Two pallets=One stack)
 26pcs/pallet, 52pcs/stack, 728 pcs/40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	Poly-crystalline 156×156mm (6 inch)
No.of cells	60 (6×10)
Dimensions	1650×992×40mm (65.00×39.05×1.57 inch)
Weight	19.0 kg (41.9 lbs)
Front Glass	3.2mm, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² , Length: 900mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM260PP-60		JKM265PP-60		JKM270PP-60		JKM275PP-60		JKM280PP-60	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	260Wp	193Wp	265Wp	197Wp	270Wp	200Wp	275Wp	204Wp	280Wp	208Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	31.1V	28.7V	31.4V	29.0V	31.7V	29.4V	32.0V	29.8V	32.3V	30.1V
Maximum Power Current (Imp)	8.37A	6.71A	8.44A	6.78A	8.52A	6.80A	8.61A	6.85A	8.69A	6.91A
Open-circuit Voltage (Voc)	38.1V	35.2V	38.6V	35.3V	38.8V	35.4V	39.1V	35.4V	39.4V	35.6V
Short-circuit Current (Isc)	8.98A	7.31A	9.03A	7.36A	9.09A	7.38A	9.15A	7.44A	9.20A	7.99A
Module Efficiency STC (%)	15.88%		16.19%		16.50%		16.80%		17.11%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	20A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.40%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.31%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.06%/°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

* Power measurement tolerance: ± 3%

The company reserves the final right for explanation on any of the information presented hereby. EN-JKM-280PP-60_rev2017

Anexo 12. Hoja de datos del módulo fotovoltaico JINKO JKM275PP-60 [48].



a) PP-1



b) PP-2



c) P5-3



d) P5-13



e) P6-1



f) P8-1

Anexo 13. Obtención de las curvas I-V de los módulos a) PP-1, b) PP-2, c) P5-3, d) P5-13, e) P6-1 y f) P8-1