



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

TÍTULO DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

**“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO
ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON
CONFIGURACIÓN FIJA Y CON SEGUIMIENTO SOLAR DE UN EJE,
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VARIABLES ELÉCTRICAS A LA
ENTRADA Y SALIDA DE REGULADORES PWM Y MPPT.”**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMECÁNICO.**

AUTOR(ES):

Cristian Alexis Remache Guanoluisa

Carlos Javier Sangoquiza Pilatasig

TUTOR:

Ing. Cruz Panchi Luis Rolando M.Sc.

LATACUNGA, AGOSTO, 2026

LATACUNGA - ECUADOR AGOSTO-2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Remache Guanoluisa Cristian Alexis, con cédula de ciudadanía No. 050443682-5, Sangoquiza Pilatasig Carlos Javier, con cédula de ciudadanía No. 050404403-3 declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica:

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON CONFIGURACIÓN FIJA Y CON SEGUIMIENTO SOLAR DE UN EJE, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VARIABLES ELÉCTRICAS A LA ENTRADA Y SALIDA DE REGULADORES PWM Y MPPT.”, siendo el Ing. Cruz Panchi Luis Rolando M.Sc., Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, agosto 07 del 2026.

Remache Guanoluisa Cristian Alexis

CC:050443682-5

AUTOR 1

Sangoquiza Pilatasig Carlos Javier

CC: 050404403-3

AUTOR 2

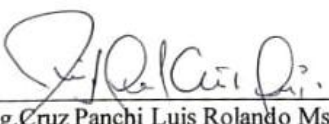


Latacunga, agosto 2026

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON CONFIGURACIÓN FIJA Y CON SEGUIMIENTO SOLAR DE UN EJE, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VARIABLES ELÉCTRICAS A LA ENTRADA Y SALIDA DE REGULADORES PWM Y MPPT.”, propuesto por los estudiantes Remache Guanoluisa Cristian Alexis con cédula de ciudadanía N. 050443682-5 y Carlos Javier Sangoquiza Pilatasig con cédula de ciudadanía N. 050404403-3, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.


Ing. Cruz Panchi Luis Rolando Ms.C
C.C. 050259517-6
TUTOR

Latacunga, agosto 2026

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título:

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON CONFIGURACIÓN FIJA Y CON SEGUIMIENTO SOLAR DE UN EJE, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VARIABLES ELÉCTRICAS A LA ENTRADA Y SALIDA DE REGULADORES PWM Y MPPT.”, propuesto por los estudiantes Remache Guanoluisa Cristian Alexis con cédula de ciudadanía N. 050443682-5 y Carlos Javier Sangoquiza Pilatasig con cédula de ciudadanía N. 050404403-3 de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, me permito indicar que los estudiante ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, además de validar el funcionamiento de la propuesta tecnológica, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad presencial en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,

Lector 1 (Presidente)
Ing. Cristian Fabian Gallardo Molina
CC: 050284769-2

Lector 2 (Miembro)
Ing. Gabriel Sebastián Inca Yajamín
CC: 172258032-9

Lector 3 (Miembro)
Ing. Gonzalo Xavier Vizuite Fiallos
CC: 171463136-1

CERTIFICACIÓN DE INFORME DE SIMILITUD

En mi calidad de Tutor de la Propuesta tecnológica con el tema:

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON CONFIGURACIÓN FIJA Y CON SEGUIMIENTO SOLAR DE UN EJE, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VARIABLES ELÉCTRICAS A LA ENTRADA Y SALIDA DE REGULADORES PWM Y MPPT.”, de los estudiantes Remache Guanoluisa Cristian Alexis y Sangoquiza Pilatasig Carlos Javier, de la carrera de Ingeniería Electromecánica, remito la captura de pantalla del reporte del sistema de reconocimiento de texto Turnitin, con un porcentaje de coincidencias del 7 %; y, expreso una vez más, mi conformidad en cuanto a la dirección del trabajo de titulación.

The screenshot shows a Turnitin report for a document titled 'Tesis_Reguladores_V1' by Cristian Remache. The overall similarity score is 7%. The report includes details about the document (79 pages, 15,048 words) and a list of sources. A 'Markas de integridad' section is also visible.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes.

Ing. Cruz Panchi Luis Rolando M.Sc.
C.C. 050259517-6
TUTOR

Latacunga, 07 de agosto de 2026

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar cada dificultad y culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, Maribel y Freddy, por su amor, sus consejos y todos los esfuerzos que hicieron para ayudarme a alcanzar esta meta. Gracias por confiar en mí, sostenerme en los momentos difíciles y enseñarme a seguir adelante sin rendirme. Este logro también les pertenece.

A mis hermanos, por acompañarme durante este camino, comprender mis ausencias y brindarme palabras de ánimo cuando más las necesitaba.

A mi novia, por su amor, paciencia y compañía durante este proceso. Gracias por escucharme, animarme en los días difíciles y celebrar conmigo cada pequeño avance. Tu apoyo fue muy importante para llegar hasta aquí.

Finalmente, agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi, a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas en especial a la carrera de Electromecánica y a sus docentes, por los conocimientos, las experiencias y la orientación recibida durante mi formación profesional. Su aporte fue esencial para culminar esta investigación y prepararme para los nuevos desafíos de mi vida profesional.

Cristian Remache

DEDICATORIA

Al llegar al final de esta etapa, dedico este logro a Dios, por acompañarme, darme fuerzas y sostenerme en los momentos en los que continuar parecía difícil.

A mi madre Maribel, y a mi padre Freddy, porque detrás de esta meta también están sus sacrificios, sus consejos y la confianza que siempre depositaron en mí. Gracias por enseñarme a no rendirme y por apoyarme aun cuando el camino se volvió complicado. Todo lo que hicieron por mí está presente en este logro, y nunca tendré palabras suficientes para agradecerles.

A cada uno de mis hermanos, por su cariño, su compañía y por estar conmigo de distintas maneras durante estos años. Compartir la vida con ustedes hizo más llevaderos los días difíciles y más especiales los buenos momentos.

A mis tíos, Rolando y Luis, por sus palabras de aliento, su apoyo sincero y la confianza que me brindaron a lo largo de este proceso. Saber que contaba con ustedes me ayudó a seguir adelante.

También dedico estas palabras a mi querida mascota. Aunque ya no está físicamente conmigo, recuerdo con mucho cariño su compañía.

Este logro lleva una parte de cada uno de ustedes. Gracias por acompañarme, creer en mí y formar parte de una etapa que guardaré siempre en mi memoria.

Cristian Remache

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por brindarme sabiduría y perseverancia para seguir adelante y alcanzar una meta tan importante en mi vida profesional.

También a mis padres por su apoyo incondicional y las palabras de ánimo brindadas a lo largo de este camino, de la misma manera agradezco a mis queridas hermanas por confiar siempre en mí y acompañarme en cada etapa de mi vida y por motivarme a continuar aun en los momentos más difíciles.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi mi agradecimiento por haberme brindado la oportunidad de formarme profesionalmente y por todos los conocimientos y experiencias adquiridos durante estos años de estudios.

Los docentes y amigos que formaron parte de mi formación académica, ya que con sus enseñanzas y su apoyo contribuyeron de distintas maneras para que hoy pueda alcanzar mi meta profesional.

Javier Sangoquiza

DEDICATORIA

Dedico este logro especialmente a mis padres como son Carmen y Carlos quienes han sido pilares fundamentales en mi vida y les agradezco por su amor, esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional durante cada etapa de mi formación, todo lo que hoy alcanzo también es fruto de lo que ustedes han sembrado en mí.

A mis hermanas como con Sonia y Norma, por estar siempre presentes, por sus consejos y por impulsarme a seguir adelante y luchar por cada uno de mis sueños y propósitos.

A mi hermosa novia por su cariño y apoyo constante, gracias por motivarme a no rendirme y por acompañarme durante este proceso impulsándome cada día a seguir creciendo y convirtiéndome en una mejor persona.

Javier Sangoquiza

1.	INFORMACIÓN GENERAL	16
2.	INTRODUCCIÓN.....	17
2.1	Situación Problemática.....	18
2.2	Formulación del problema.....	18
2.3	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	18
2.3.1	Objeto de Investigación:.....	18
2.3.2	Campo de Acción:	18
2.4	BENEFICIARIOS	19
2.4.1	Directo	19
2.4.2	Indirecto.....	19
2.5	JUSTIFICACIÓN.....	19
2.6.	OBJETIVOS	20
2.6.1	General.....	20
2.6.2	Objetivos específicos.....	20
2.7	SISTEMAS DE TAREAS.....	21
3.	MARCO TEÓRICO	23
3.1.	Definición y aplicación	23
3.1.1.	Sistemas fotovoltaicos aislados	23
3.1.2.	Componentes que conforman un sistema aislado.	24
3.1.3.	Generador solar fotovoltaico (Paneles Solares).....	24
3.2.	Controladores de carga fotovoltaica.....	25
3.2.1.	Principio de operación del controlador de carga fotovoltaico	25
3.2.2.	Banco de baterías	25
3.2.3.	Inversor	26
3.3.	Sistema de monitoreo	26
3.3.1.	Modbus TCP/IP	26

3.4.	Reguladores de carga en sistemas fotovoltaicos	27
3.4.1.	Regulador PWM (Pulse with Modulation)	28
3.4.2.	Etapas de carga en la batería del regulador PWM	29
3.4.3.	Regulador MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	30
3.4.4.	Etapas de carga en la batería del regulador MPPT.....	31
3.5.	Software de supervisión NODE-RED.....	32
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO	33
4.2.	Declaraciones de variables.....	36
4.2.1.	Variables Independiente.	36
4.2.2.	Variable Dependiente.	36
4.3.	Área del panel fotovoltaico	36
4.3.1.	Potencia solar incidente en los paneles del sistema MPPT	36
4.3.2.	Potencia solar incidente en los paneles del sistema PWM	37
4.4.	Definición y configuración de los casos de estudio.....	37
4.4.1.	Sistema fotovoltaico en configuración fija.	38
4.4.2.	Configuración con seguidor solar de un eje.....	38
4.5.	Adquisición de datos y monitoreo de mediante un sistema SCADA aplicado en Node-RED	39
4.5.1.	Comunicación RS-232 de los reguladores MPPT y PWM.....	40
4.5.2.	Registros de variables eléctricas de conversión tomadas desde el documento Modbus TriStar MPPT.	40
4.5.3.	Definición de variables eléctricas de conversión tomadas desde el documento Modbus TriStar PWM.	41
4.5.4.	Comunicación y asignación de variables de la celda DATASOL MET a los reguladores.....	43
4.5.5.	Variables registradas por la celda Data Sol MET de acuerdo con su manual de operación.	43

4.6.	Configuración del flujo de adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos mediante Node-RED para el monitoreo y análisis del sistema fotovoltaico.	44
4.7.	Lectura de registros y aplicación de fórmulas de escalamiento mediante especificaciones técnicas	45
4.7.1.	Variables eléctrica y ecuaciones de conversión tomadas desde el documento modbus Tirstar MPPT.	46
4.7.2.	Variables tomadas desde el documento modbus Tirstar PWM	48
4.7.3.	Variables registradas por la celda Data Sol MET de acuerdo con su manual de operación	50
4.7.4.	Potencia solar incidente en los paneles del sistema MPPT	50
4.7.5.	Potencia solar incidente en los paneles del sistema PWM	51
5.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	53
5.1.	Comparación experimental entre reguladores MPPT Y PWM	53
5.2.	Caso C1: Sistemas fotovoltaicos fijos con reguladores MPPT y PWM:	53
5.2.1.	Caracterización de los ciclos de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador MPPT	54
	Análisis estados de carga MPPT	54
5.2.2.	Caracterización de los ciclos de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador PWM	55
	Análisis estados de carga PWM.	55
5.2.4.	Voltaje de entrada y salida en el regulador MPPT	56
5.2.5.	Corrientes de entrada y salida en el regulador MPPT	57
5.2.6.	Análisis de voltaje en los reguladores MPPT y PWM.....	59
5.2.7.	Interpretación comparativa	60
5.3.	Caso C2: seguimiento solar de un eje (Móvil) con los reguladores MPPT y PWM.	60
5.3.1.	Caracterización de los ciclos de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador MPPT	60
	Análisis estados de carga MPPT	61

5.3.2.	Caracterización de los ciclos de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador PWM.....	61
5.3.3.	Voltaje de entrada y salida de los reguladores MPPT	62
5.3.5.	Corriente en la entrada y salida del regulador MPPT.....	64
5.3.6.	Análisis comparativo del comportamiento del ciclo de carga de baterías mediante reguladores PWM y MPPT en sistemas fotovoltaicos aislados.....	65
	Interpretación comparativa	67
5.4.	Caso C3: Sistema fijo regulador MPPT+PWM+ CELDA en los días 7 al 9 de julio del año 2026 en un intervalo horario de 6:00 a 18:00h	67
5.4.1.	Potencia solar máxima disponible registrada por la celda DATASOL MET MPPT. 67	
5.4.2.	Potencia solar máxima disponible registrada por la celda DATASOL MET PWM. 68	
5.4.3.	Evaluación del rendimiento energético del regulador de carga MPPT.....	69
5.5.	Caso C4: Sistema con seguimiento solar de un eje en los reguladores MPPT y PWM en los días 7 al 9 de julio del año 2026 en un intervalo horario de 6:00 a 18:00h	70
5.5.1.	Potencia solar máxima disponible medida en la celda DATASOL MET, MPPT. 71	
5.5.2.	Potencia solar máxima disponible registrada por la celda DATASOL MET, PWM. 72	
5.5.3.	Evaluación del rendimiento energético del regulador de carga MPPT.....	72
6.1.	Costos indirectos	74
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
7.1.	Conclusiones	75
7.2.	Recomendaciones.....	76
8.	REFERENCIAS	76
9.	ANEXOS.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques funcional de un sistema fotovoltaico aislado	24
Figura 2. Módulos Fotovoltaicos	24
Figura 3. Esquema de los reguladores de carga	25
Figura 4. Banco de baterías	26
Figura 5. Inversor de carga	26
Figura 6. Estructura de la trama Modbus TCP/IP	27
Figura 7. Regulador PWM	28
Figura 8. Topología de carga del regulador PWM	29
Figura 9. Algoritmo de carga en el Tristar PWM	29
Figura 10. Regulador MPPT	30
Figura 11. Método de carga del regulador MPPT	31
Figura 12. Algoritmo de carga del TriStar MPPT	32
Figura 13. Entorno de programación en NODE-RED	33
Figura 14. Esquema del sistema de adquisición, monitoreo y procesamiento de datos de los reguladores MPPT y PWM.	35
Figura 15. Dimensiones del panel fotovoltaico empleado en los sistemas evaluados.	36
Figura 16. Ubicación de los puntos de medición de las variables eléctricas del sistema fotovoltaico	39
Figura 17. Estructura de monitoreo para dispositivos y sistema SCADA.	39
Figura 18. Esquema de adquisición de datos del sistema	43
Figura 19. Flujos de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos mediante Node-RED.	45
Figura 20. Esquema de comparación experimental de los reguladores PWM y MPPT	53
Figura 21. Comparación de los reguladores en configuración fija	53
Figura 22. Análisis estados de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador MPPT	54
Figura 23. Análisis estados de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador PWM	55
Figura 24. Análisis voltaje de entrada y salida el regulador PWM	56
Figura 25. Análisis voltaje de entrada en el regulador MPPT	57
Figura 26. Análisis corriente de entrada y salida el regulador MPPT	58
Figura 27. Estados de carga de los reguladores MPPT y PWM	59

Figura 28. Comparación de los reguladores en configuración móvil	60
Figura 29. Análisis estados de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador MPPT	61
Figura 30. Análisis estados de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador PWM	62
Figura 31. Análisis voltaje de entrada y salida el regulador MPPT	63
Figura 32. Voltajes de entrada y salida del regulador PWM	63
Figura 33. Análisis corriente de entrada y salida el regulador MPPT	64
Figura 34. Comparación en los estados de carga de los reguladores MPPT y PWM	66
Figura 35. Comparación de los reguladores + celda en configuración fija	67
Figura 36. Análisis potencia de entrada MPPT.	68
Figura 37. Potencia entrada y salida PWM	69
Figura 38. Desempeño entrada y salida en el regulador MPPT.	70
Figura 39. Comparación de los reguladores + celda en configuración móvil	71
Figura 40. Potencia de entrada y salida del regulador MPPT.	71
Figura 41. Potencia incidente en los paneles solares medidos por la celda Datasol Met.	72
Figura 42. Desempeño entrada y salida en el regulador MPPT.	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Áreas Conocimientos Unesco.....	17
Tabla 2. Sistema de tareas	21
Tabla 3. Configuración de los casos de estudio y variables eléctricas evaluadas.	38
Tabla 4. Registros Modbus de escalamiento V_PU e I_PU del regulador TriStar MPPT.	40
Tabla 5. Registros Modbus empleados para medir voltaje y corriente en el regulador TriStar MPPT.....	41
Tabla 6. Registros Modbus empleados para medir voltaje y corriente en el regulador TriStar PWM.....	42
Tabla 7. Registros de variables meteorológicas disponibles en la celda DATASOL MET.....	44
Tabla 8. Parámetros de escalamiento registrados en el regulador MPPT	46
Tabla 9. Variables eléctricas y ecuaciones de conversión del regulador MPPT	46
Tabla 10. Valores digitales registrados en el regulador MPPT	47
Tabla 11. Conversión de los registros digitales del regulador MPPT	47
Tabla 12. Variables eléctricas y ecuaciones de conversión del regulador PWM.....	48
Tabla 13. Valores digitales registrados en el regulador PWM.....	49
Tabla 14. Conversión de los registros digitales del regulador PWM	49
Tabla 15. Variables meteorológicas seleccionadas de la celda DATASOL MET	50
Tabla 16. Valores de radiación extraídos de Excel utilizados para el sistema MPPT.....	51
Tabla 17. Estimación de la potencia solar incidente en el arreglo	51
Tabla 18. Valores de radiación extraídos de Excel utilizados para el sistema PWM.....	51
Tabla 19. Estimación de la potencia solar incidente en el arreglo PWM.....	52
Tabla 20. Evaluación del rendimiento del regulador MPPT	69
Tabla 21 Evaluación del rendimiento del regulador MPPT.	73
Tabla 22. Gastos correspondientes al desarrollo de proyecto de tesis.....	74
Tabla 23. Costos indirectos al desarrollo del proyecto.....	75

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON CONFIGURACIÓN FIJA Y CON SEGUIMIENTO SOLAR DE UN EJE, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VARIABLES ELÉCTRICAS A LA ENTRADA Y SALIDA DE REGULADORES PWM Y MPPT.

Autores:

Remache Guanoluisa Cristian Alexis

Sangoquiza Pilatasig Carlos Javier

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar experimentalmente el desempeño energético de reguladores de carga PWM y MPPT integrados en un sistema fotovoltaico aislado, considerando una configuración fija y otra con seguimiento solar de un eje, este estudio se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo y un diseño experimental comparativo de campo bajo condiciones reales de operación del sistema perteneciente al proyecto DIRGI-CP2021-008 de la Universidad Técnica de Cotopaxi. La adquisición de datos se realizó mediante comunicación Modbus y Node-RED, mientras que la información fue procesada en Microsoft Excel. Se registraron variables eléctricas de entrada y salida de los reguladores, entre ellas voltaje, corriente y potencia transferida al banco de baterías, estas mediciones se efectuaron entre las 06:00 y 18:00 h en diferentes casos experimentales y sus resultados evidenciaron que el regulador MPPT presentó una respuesta superior al operar cerca del punto de máxima potencia y gestionar adecuadamente las etapas de carga del banco de baterías. Por otra parte, el regulador PWM mantuvo una operación condicionada por el voltaje de la batería y reguló la energía mediante pulsos. Se concluye que la tecnología MPPT proporciona un mayor aprovechamiento del recurso solar y una gestión energética más eficiente, especialmente cuando se integra con seguimiento solar de un eje.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica, regulador MPPT, regulador PWM, seguimiento solar, eficiencia energética, Node-RED, Modbus.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

THEME: “COMPARATIVE EXPERIMENTAL EVALUATION OF ENERGY PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH FIXED CONFIGURATION AND SINGLE-AXIS SOLAR TRACKING THROUGH ANALYSIS OF ELECTRICAL VARIABLES AT THE INPUT AND OUTPUT OF PWM AND MPPT CHARGE CONTROLLERS”

Authors:

Remache Guanoluisa Cristian Alexis

Sangoquiza Pilatasig Carlos Javier

ABSTRACT

This study aimed to experimentally evaluate the energy performance of PWM and MPPT charge controllers used in an off-grid photovoltaic system. The study considered a fixed configuration and a single-axis solar tracking configuration. It used a quantitative approach and a comparative field experiment under real operating conditions. The photovoltaic system belongs to project DIRGI-CP2021-008 of Technical University of Cotopaxi. Data were collected through Modbus communication and Node-RED, and the information was processed in Microsoft Excel, electrical variables were measured at input and output of charge controllers, including voltage, current, and power transferred to the battery bank, these measurements were taken from 6:00 a.m. to 6:00 p.m. in different experimental cases. The results showed that the MPPT charge controller performed better because it operated close to the maximum power point and properly controlled battery charging stages. In contrast, the PWM charge controller depended on battery voltage and controlled the energy through pulses. It was concluded that MPPT technology makes better use of solar energy and provides more efficient energy management, especially when it is combined with single-axis solar tracking.

Keywords: Photovoltaic solar energy, MPPT charge controller, PWM charge controller, solar tracking, energy efficiency, Node-RED, Modbus.

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Evaluación experimental comparativa del desempeño energético de sistemas fotovoltaicos con configuración fija y con seguimiento solar de un eje, mediante el análisis de variables eléctricas a la entrada y salida de reguladores PWM y MPPT.

Modalidad de Titulación:

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	X
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto: DIRGI-CP2021-008 "Implementación de tecnologías de eficiencia energética en el sector productivo del sector San Felipe para reducir las pérdidas en la red eléctrica"

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

Ponente 1: Remache Guanoluisa Cristian Alexis

Ponente 2: Sangoquiza Pilatasig Carlos Javier

Docente Tutor: Ing. Luis Rolando Cruz Panchi M.Sc.

Área de Conocimiento:

Tabla 1. Áreas Conocimientos Unesco

07 ingeniería, Industria y Construcción	071 ingeniería y Profesiones Afines	0713 electricidad y energía
---	-------------------------------------	-----------------------------

Línea de investigación: Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera: Energías renovables, eficiencia energética y aprovechamiento de sistemas fotovoltaicos.

2. INTRODUCCIÓN

El aumento continuo del consumo de energía a nivel mundial ha sumado la necesidad urgente de reducir las emisiones contaminantes e impulsar el desarrollo y la aplicación de estaciones de energía sostenible entre estas opciones la energía solar fotovoltaica se ha mantenido firme como una de las opciones más viables para generar electricidad limpia y sostenible, dicho esto según datos de la Agencia Internacional de Energía la capacidad instalada ha crecido notablemente durante la última década posicionándose como una alternativa fundamental para diversificar las matrices energéticas y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. [1]

Es necesario resaltar que en España se desarrolló controladores para obtener la máxima potencia de los paneles solares por medio de un convertidor electrónico que efectuó una estrategia de control con el objetivo de lograr un seguimiento al punto máximo de la potencia haciendo referencia al regulador MPPT. [2]

Un estudio realizado en el país de Colombia nos dice que los algoritmos MPPT que se utiliza para sistemas fotovoltaicos pueden maximizar la energía entregada por los mismos ya que este regulador permite realizar el suministro de potencia a los elementos de carga y al mismo tiempo cargar las baterías que se encuentran conectadas al regulador esto, esto siempre garantizando un aprovechamiento de la energía del 10% y 30% dependiendo a las condiciones de la irradiancia y de la temperatura, esto con respecto al regulador PWM. [3]

En Ecuador un estudio realizado en la ciudad de Guayaquil en la cual se realizó una comparación entre los reguladores MPPT y PWM para la generación y control de energía nos indica que, en un periodo de recolección de datos de siete días, el regulador con mayor

eficiencia es el MPPT con una eficiencia del 5,94%, por otro lado, la eficiencia presentada por el regulador PWM es del 3,71% dándonos una comparación entre los dos reguladores mediante datos explicativos [4], [5].

La presente tesis plantea la evaluación experimental y comparativa del desempeño de los reguladores de carga PWM y MPPT mediante la implementación de diferentes configuraciones de operación, para ello fue considerando un sistema fotovoltaico en configuración fija y una configuración móvil con seguimiento solar de un eje, se desarrollarán distintos casos de estudio que permitirán analizar la respuesta energética de cada tecnología bajo condiciones reales de funcionamiento.

2.1 Situación Problemática

El sistema fotovoltaico del proyecto DIRGI-CP2021-008 de la Universidad Técnica de Cotopaxi presenta la necesidad de establecer qué tecnología de regulación de carga PWM o MPPT permite un mayor aprovechamiento del recurso solar, se sabe que el principio de funcionamiento de ambos reguladores genera un comportamiento distinto en la gestión de la energía proveniente de los módulos fotovoltaico. El regulador PWM regula la carga principalmente en función del voltaje del banco de baterías y el regulador MPPT busca operar cerca del punto de máxima potencia disponible del módulo para aprovechar de mejor manera la energía generada, esta diferencia puede adquirir mayor relevancia al comparar una configuración fotovoltaica fija con una de seguimiento solar de un eje debido a las variaciones en la captación del recurso solar, es por este motivo la necesidad de realizar una comparación experimental que permita establecer cuál de las dos tecnologías ofrece un mejor desempeño energético dentro de las condiciones de operación del sistema implementado.

2.2 Formulación del problema

Incertidumbre en el desempeño de reguladores de carga MPPT y PWM ante distintas configuraciones de posición de los paneles.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto de Investigación: La presente investigación tiene como objeto evaluar comparativamente el funcionamiento en los reguladores MPPT Y PWM del PROYECTO DIRGI-CP2021-008 analizando su rendimiento energético, variables eléctricas de entrada y salida de los reguladores con el propósito de determinar la eficiencia en cada sistema.

2.3.2 Campo de Acción: 3322.05 Fuentes no Convencionales de Energía

2.4 BENEFICIARIOS

2.4.1 Directo

Los beneficiarios directos de la presente investigación experimental son los docentes del PROYECTO DIRGI-CP2021-008 y estudiantes vinculados al área eléctrica y energética.

2.4.2 Indirecto

Los beneficiarios indirectos de la presente investigación experimental son la comunidad universitaria del sector San Felipe (La Matriz) con la innovación de tecnología en eficiencia energética y análisis de estos sistemas para el desarrollo estudiantil.

2.5 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación actúa como respuesta a una necesidad técnica identificada en el ámbito de los sistemas fotovoltaicos aislados relacionándolos con evaluaciones del desempeño energético de los reguladores de carga con tecnologías PWM y MPPT bajo condiciones reales de operación debido a que estos dispositivos cumplen un papel fundamental en la gestión de la energía generada por los módulos fotovoltaicos hacia el banco de baterías, son cruciales para garantizar el buen funcionamiento en los distintos sistemas fotovoltaicos.

El estudio plantea una comparación técnica de ambos tipos de reguladores mediante la implementación de diferentes casos de evaluación experimental mediante consideraciones de configuraciones fotovoltaicas fijas y móviles con seguimiento solar de un eje. Esta metodología permitirá analizar la influencia de las condiciones de captación solar y la estrategia de regulación sobre variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia y la eficiencia de nuestro sistema.

Desde el ámbito social esta investigación aporta al fortalecimiento de la confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos aislados los cuales constituyen una alternativa energética para sectores donde el acceso a la red eléctrica convencional presenta limitaciones y es por esto que se desarrolló el análisis detallado del comportamiento de los reguladores permitirá identificar condiciones de operación más eficientes, reducir posibles fallas y dar soluciones energéticas sostenibles con mayor estabilidad y disponibilidad para los usuarios.

De esta manera la investigación contribuye al desarrollo de capacidades técnicas en el análisis y procesamiento de datos provenientes de sistemas fotovoltaicos y a la vez la evaluación experimental mediante diferentes escenarios de estudio permitirá generar información práctica

sobre la respuesta de los reguladores PWM y MPPT, fortaleciendo el conocimiento aplicado en el área de energías renovables.

2.6.OBJETIVOS

2.6.1 General

Evaluar el desempeño energético de los reguladores PWM y MPPT en un sistema fotovoltaico con configuración fija y con seguimiento solar de un eje, mediante registros y análisis de las variables eléctricas de entrada y salida en diferentes casos de estudio, para determinar que regulador permite aprovechar de manera más eficiente la energía solar.

2.6.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el sistema fotovoltaico existente, reconociendo los reguladores PWM y MPPT para definir sus componentes y especificaciones técnicas, con el propósito de establecer las variables necesarias para la evaluación comparativa del desempeño energético del sistema.
- Diseñar el sistema de adquisición de datos mediante el protocolo Modbus y Node-Red, para registrar de forma continua las variables eléctricas que permitan determinar el comportamiento energético, de acuerdo con las configuraciones de arreglo fotovoltaico conectado al regulador PWM y MPPT.
- Procesar los datos obtenidos para la comparación y evaluación del desempeño energético entre las configuraciones fija y con seguimiento solar de un eje para los reguladores PWM y MPPT.

2.7 SISTEMAS DE TAREAS

Tabla 2. Sistema de tareas

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Caracterizar el sistema fotovoltaico existente, reconociendo los reguladores MPPT y PWM para definir sus componentes y especificaciones técnicas, con el propósito de establecer las variables necesarias para la evaluación comparativa del desempeño energético del sistema.	Revisar informes técnicos y registros disponibles de los reguladores PWM y MPPT	Matriz técnica con las especificaciones y parámetros operativos de los reguladores PWM y MPPT para la caracterización inicial del sistema fotovoltaico	• Revisión bibliográfica • Manuales técnicos de los reguladores • Revisión de tesis relacionados con el proyecto
	Registrar características técnicas y eléctricas de los módulos fotovoltaicos	Ficha técnica de los módulos fotovoltaicos con sus parámetros eléctricos y características operativas para la caracterización del sistema fotovoltaico	
Diseñar el sistema de adquisición de datos mediante el protocolo Modbus y Node-Red, para	Configurar la comunicación Modbus y los flujos de adquisición de datos en Node-RED para los reguladores PWM, MPPT y el	Observación directa de datos e inspección de los registros.	• Programación basada en flujos • Configuración de comunicación

registrar de forma continua las variables eléctricas que permitan determinar el comportamiento energético, de acuerdo con las configuraciones de arreglo fotovoltaico conectado al regulador PWM y MPPT.	equipo Datasol MET. Realizar pruebas de lectura, validación y almacenamiento de las variables en archivos CSV y hojas de cálculo.	Operación de Modbus y Node-RED mediante la conexión a la red Ethernet/RS-485.	de los dispositivos mediante Modbus TCP/IP y Node red • Microsoft Excel • Manuales Modbus de los equipos
Procesar los datos obtenidos para la comparación y evaluación del desempeño energético entre las configuraciones fija y con	Comparar los resultados obtenidos en las configuraciones fija-PWM, fija-MPPT, seguimiento-PWM y seguimiento-MPPT.	Graficas comparativa de combinaciones experimentales evaluadas.	• Análisis comparativo • Graficas comparativas realizadas en Microsoft Excel • Ecuaciones de potencia y eficiencia

seguimiento solar de un eje para los reguladores PWM y MPPT.	Calcular las diferencias de potencia, eficiencia para determinar la combinación con mejor desempeño.	Identificación de la configuración y del regulador que proporcionan el mayor aprovechamiento de la radiación solar bajo las condiciones del estudio.	
--	--	--	--

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Definición y aplicación

El presente marco teórico comprende los conceptos fundamentales asociados a la generación fotovoltaica, la conversión y gestión de energía mediante reguladores de carga PWM y MPPT, y los parámetros técnicos empleados para la evaluación de su comportamiento energético. Estos fundamentos permiten sustentar el análisis comparativo del desempeño de los reguladores bajo diferentes configuraciones operativas del sistema fotovoltaico, considerando variables como voltaje, corriente, potencia, y eficiencia

3.1.1. Sistemas fotovoltaicos aislados

Los sistemas fotovoltaicos aislados (SFVA) se caracterizan por operar de manera independiente de la red eléctrica convencional y están conformados por diversos elementos que permiten la generación, regulación, almacenamiento y suministro de energía eléctrica. Entre sus principales componentes se encuentran los módulos fotovoltaicos, reguladores de carga, bancos de baterías, inversores y cargas eléctricas en corriente continua (DC) y corriente alterna (AC), cuya integración garantiza el funcionamiento eficiente y confiable del sistema energético, como se presenta en la Figura 1 [6].

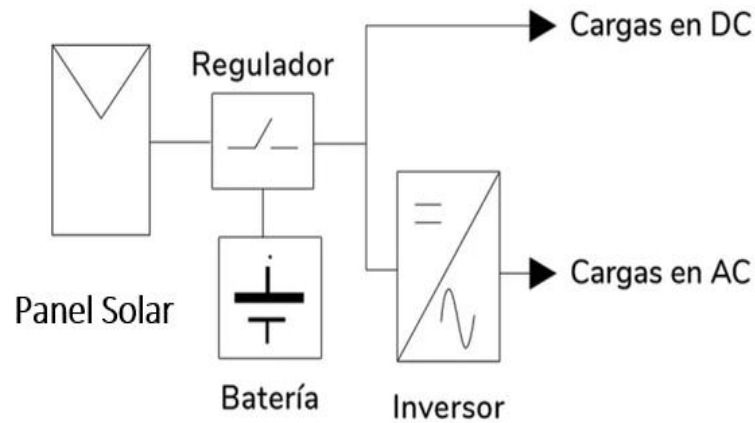


Figura 1. Diagrama de bloques funcional de un sistema fotovoltaico aislado

3.1.2. Componentes que conforman un sistema aislado.

Como ya lo detallamos anteriormente nuestros sistemas fotovoltaica aislada tienen los componentes que se muestra a continuación

3.1.3. Generador solar fotovoltaico (Paneles Solares)

La generación de electricidad a través de la energía solar fotovoltaica implica transformar la luz del sol en corriente eléctrica utilizando el fenómeno fotovoltaico. Este mecanismo tiene lugar en materiales semiconductores, específicamente en las celdas solares que forman los paneles fotovoltaicos.[7]



Figura 2. Módulos Fotovoltaicos

3.2. Controladores de carga fotovoltaica.

Los controladores de carga o reguladores de carga son dispositivo que sirve como punto de acople para los elementos que conforman un sistema fotovoltaico autónomo, el cual realiza una supervisión del estado de carga de la batería mediante la evaluación constante del voltaje presente en la entrada de la misma, para de esta forma protegerla contra sobrecargas o descargas profundas que afectan su vida útil y tener un mejor rendimiento de nuestros componentes [8].

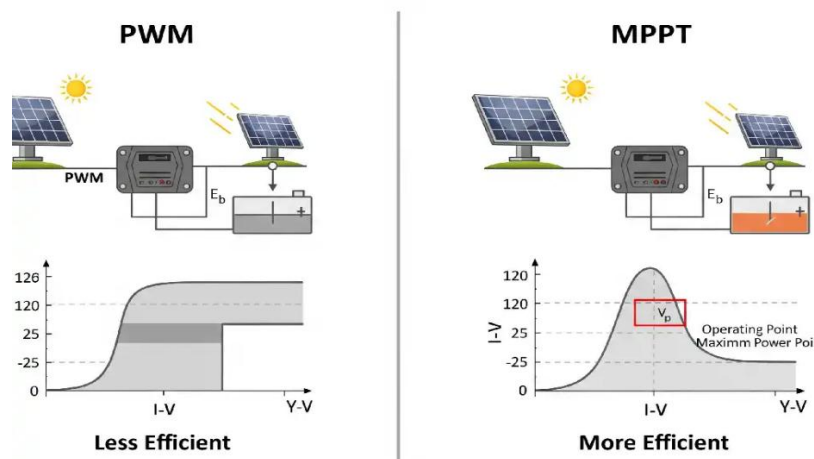


Figura 3. Esquema de los reguladores de carga

3.2.1. Principio de operación del controlador de carga fotovoltaico

El funcionamiento del controlador de carga consiste en varias funciones que permiten la carga o descarga de la batería, así como la estimación del estado de carga, las cuales se explicarán más adelante. De manera general, el controlador de carga debe medir los valores de voltaje y corriente en la batería y el panel solar a través de los sensores para determinar si el panel está en capacidad de entregar energía a la batería [9].

3.2.2. Banco de baterías

Un banco de baterías está constituido por un conjunto de unidades de almacenamiento electroquímico interconectadas, las cuales operan de manera coordinada para conformar un sistema único de acumulación de energía, su función principal es almacenar la energía generada y garantizar la continuidad del suministro eléctrico durante periodos en los que la fuente primaria de generación no se encuentra disponible [10].

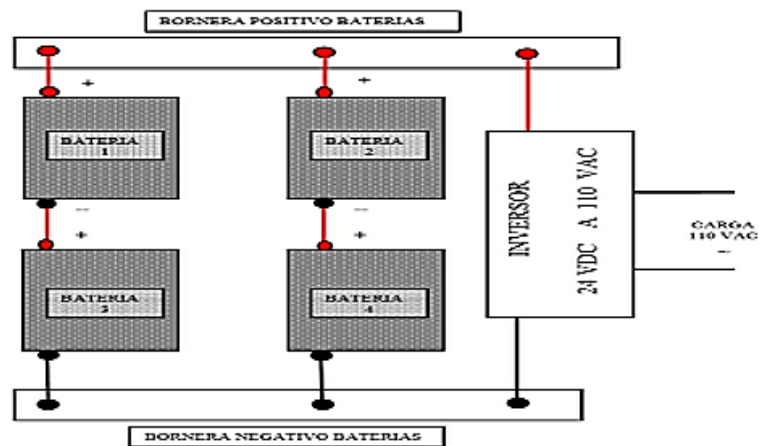


Figura 4. Banco de baterías

3.2.3. Inversor

El inversor fotovoltaico es un dispositivo electrónico cuya función principal es transformar la corriente continua (DC) generada por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna (AC), permitiendo su utilización en cargas eléctricas convencionales, sistemas autónomos o su posible inyección hacia la red eléctrica, a diferencia de los inversores utilizados en aplicaciones convencionales, estos inversores que son destinados a sistemas fotovoltaicos deben adaptarse a la variabilidad del recurso solar, debido a los niveles de irradiancia y temperatura [11].



Figura 5. Inversor de carga

3.3. Sistema de monitoreo

3.3.1. Modbus TCP/IP

El monitoreo de sistemas fotovoltaicos requiere herramientas de comunicación que permitan obtener información operativa de los dispositivos que conforman la instalación. En este contexto, Modbus TCP/IP es un protocolo de comunicación industrial basado en redes Ethernet que permite el intercambio de datos entre equipos electrónicos mediante la lectura de registros internos, donde se almacenan variables eléctricas y estados de operación del sistema. Este

modelo establece las reglas necesarias para que la información pueda ser transmitida desde un dispositivo origen a un dispositivo destino. El protocolo IP se encarga del direccionamiento de los paquetes de datos permitiendo identificar de manera única cada dispositivo conectado a la red mediante una dirección IP esto facilita que la información pueda ser enviada correctamente a través de diferentes modos o equipos de red hasta llegar a su destino.

La comunicación Modbus TCP/IP emplea una arquitectura cliente-servidor, en la cual el dispositivo de supervisión solicita información al equipo conectado y este responde con los valores almacenados en sus registros. Esta estructura permite la adquisición continua de parámetros eléctricos sin interferir en el funcionamiento del sistema, facilitando el análisis del comportamiento energético durante diferentes condiciones de operación [12].

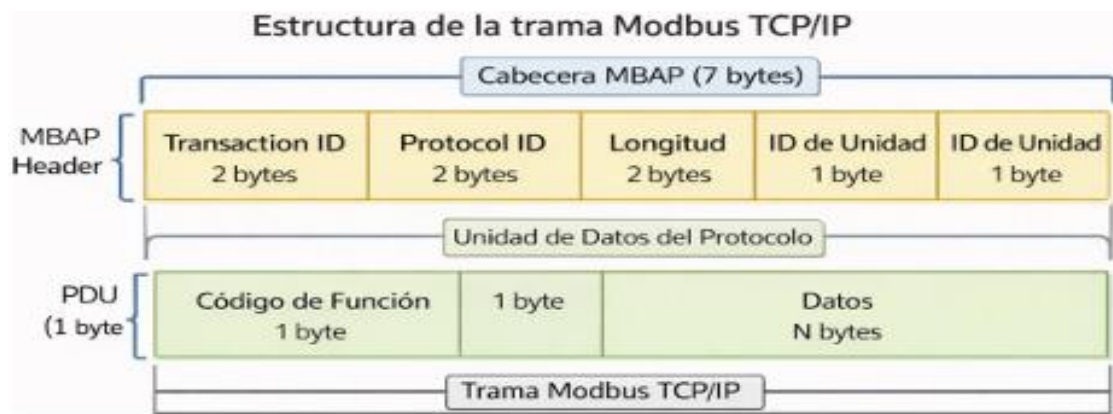


Figura 6. Estructura de la trama Modbus TCP/IP

3.4.Reguladores de carga en sistemas fotovoltaicos

El controlador de carga fotovoltaico constituye uno de los elementos fundamentales dentro de los sistemas fotovoltaicos autónomos [13], debido a que regula y gestiona el flujo de energía eléctrica proveniente del arreglo fotovoltaico hacia el sistema de almacenamiento, su función principal es controlar los procesos de carga y descarga de la batería, evitando condiciones perjudiciales como la sobrecarga o la descarga profunda, con el propósito de garantizar una mayor vida útil y un funcionamiento eficiente del sistema energético [14].

Actualmente, los controladores de carga fotovoltaicos se clasifican principalmente en dos tecnologías: Modulación por Ancho de Pulso (PWM, Pulse Width Modulation) y Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracking). Los controladores PWM operan mediante la conexión directa entre el generador fotovoltaico y la batería, regulando la energía entregada mediante la variación del ciclo de trabajo de los pulsos eléctricos, alcanzando eficiencias aproximadas del 70 %. Por otra parte, los controladores

MPPT emplean algoritmos de seguimiento y convertidores electrónicos de potencia que permiten operar al módulo fotovoltaico en su punto de máxima potencia, optimizando la extracción de energía disponible y mejorando el rendimiento global del sistema fotovoltaico [9].

3.4.1. Regulador PWM (Pulse with Modulation)

El regulador PWM utiliza una estrategia de modulación por ancho de pulso para controlar la corriente entregada hacia la batería durante el proceso de carga. Mediante la conmutación electrónica del circuito de control, el regulador ajusta el tiempo de conexión entre el arreglo fotovoltaico y el sistema de almacenamiento, permitiendo administrar las diferentes etapas de carga de la batería [15].



Figura 7. Regulador PWM

El funcionamiento del controlador PWM se basa en regular la tensión aplicada al banco de baterías, por lo que la tensión de operación del módulo fotovoltaico se encuentra condicionada por el nivel de tensión de la batería. Debido a esta característica, el módulo no necesariamente opera en su punto de máxima potencia; sin embargo, este tipo de regulación presenta una arquitectura sencilla y adecuada para sistemas fotovoltaicos autónomos donde existe compatibilidad entre la tensión del arreglo y la batería. En la Figura 8 se muestran señales PWM con diferentes ciclos de trabajos para una mirada más afondo.

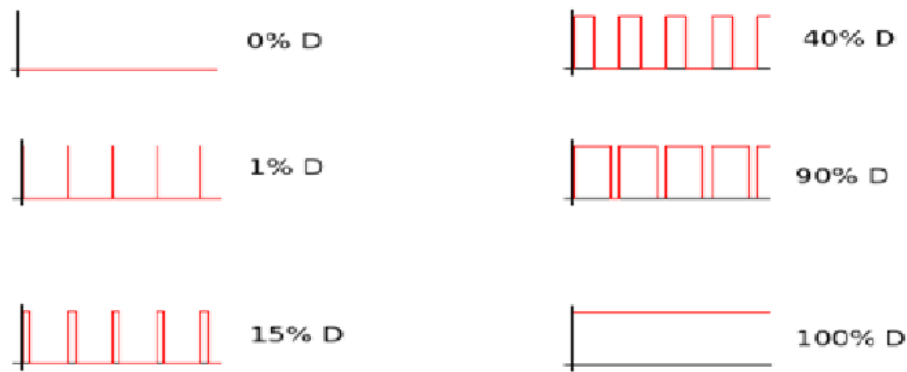


Figura 8. Topología de carga del regulador PWM

3.4.2. Etapas de carga en la batería del regulador PWM

El regulador PWM, emplea un método basado en la modulación del ancho de pulso para gestionar la energía proveniente del sistema fotovoltaico hacia la batería. Su proceso de carga se desarrolla mediante etapas progresivas que permiten regular la corriente y el voltaje aplicado, evitando condiciones de sobrecarga y descarga profunda, en lo que se diferencia del regulador MPPT, el PWM establece una conexión directa entre el panel solar y la batería ajustando la entrega de energía conforme al estado de carga del regulador, estas etapas de carga garantizan un proceso de almacenamiento estable y esto favorece la eficiencia operativa del sistema fotovoltaico y contribuyendo a la prolongación de la vida útil de la batería como se presenta en la Figura 9 [16].

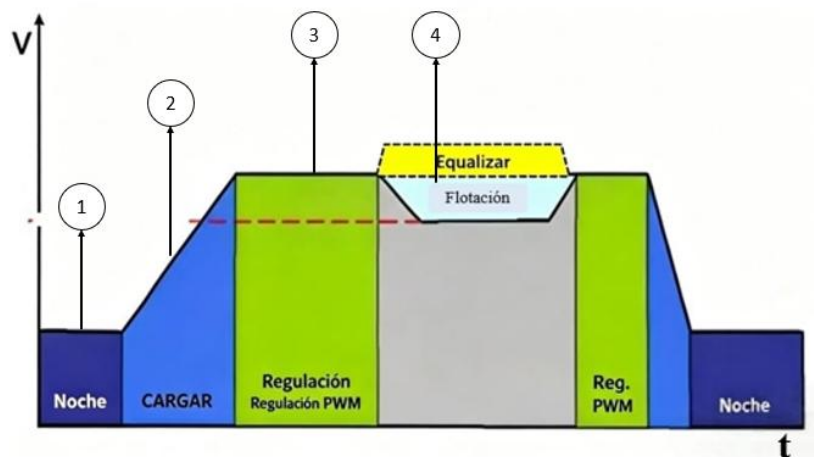


Figura 9. Algoritmo de carga en el Tristar PWM

- **Etapas Noche o reposo:** Durante esta etapa no recibe energía fotovoltaica debido a la ausencia de radiación solar por eso el regulador interrumpe el flujo de corriente proveniente del panel y la batería permanece suministrando energía a las cargas

conectadas del sistema. Además, permite evitar el retorno de corriente desde la batería hacia los módulos fotovoltaicos durante el periodo nocturno.

- **Etapas de Carga principal:** En esta etapa inicial el regulador PWM permite el ingreso de la máxima corriente disponible desde el panel solar hacia la batería para recuperar rápidamente la energía almacenada, incrementando progresivamente el nivel de tensión hasta alcanzar el valor establecido para la regulación.
- **Etapas de Regulación PWM o absorción:** En esta etapa, el regulador comienza a controlar la corriente mediante pulsos de conmutación y va reduciendo gradualmente la intensidad entregada a la batería, su voltaje se mantiene cercano al valor máximo de carga, esto permitiendo completar el proceso de almacenamiento energético sin generar sobrecarga.
- **Etapas de Flotación:** Una vez que la batería alcanza su estado de carga completa, el regulador disminuye el nivel de tensión aplicado y suministra únicamente la corriente necesaria para compensar las pérdidas internas de la batería, en esta etapa se mantiene el regulador en condiciones óptimas de operación durante largos periodos de tiempo y así evitar ciclos innecesarios de carga y descarga.

3.4.3. Regulador MPPT (Maximum Power Point Tracking).

El regulador MPPT incorpora un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, acompañado de una etapa de conversión electrónica DC-DC que permite modificar la relación entre tensión y corriente para extraer la máxima potencia disponible del arreglo fotovoltaico como se muestra en la Figura 10 [4].

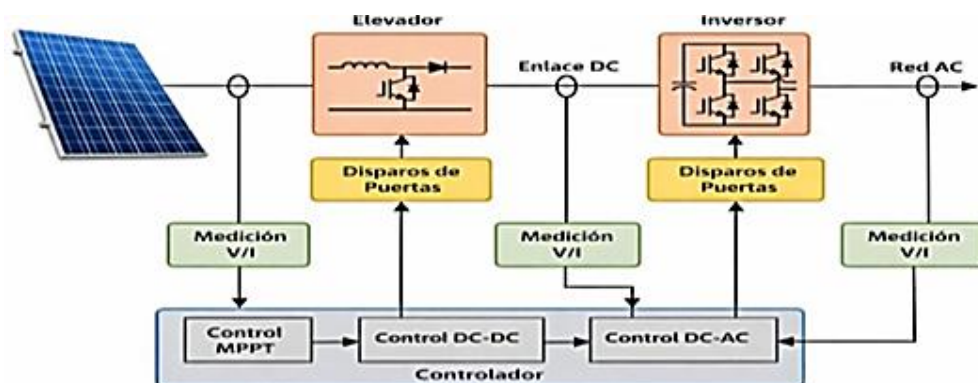


Figura 10. Regulador MPPT

A diferencia del sistema PWM, la tecnología MPPT permite que el módulo fotovoltaico opere en condiciones cercanas a su punto óptimo de generación, independientemente de la tensión requerida por el banco de baterías. Esta característica mejora el aprovechamiento energético del sistema, especialmente cuando existe diferencia entre la tensión de máxima potencia del módulo y la tensión de carga del almacenamiento como se demuestra en la Figura 11 [4].

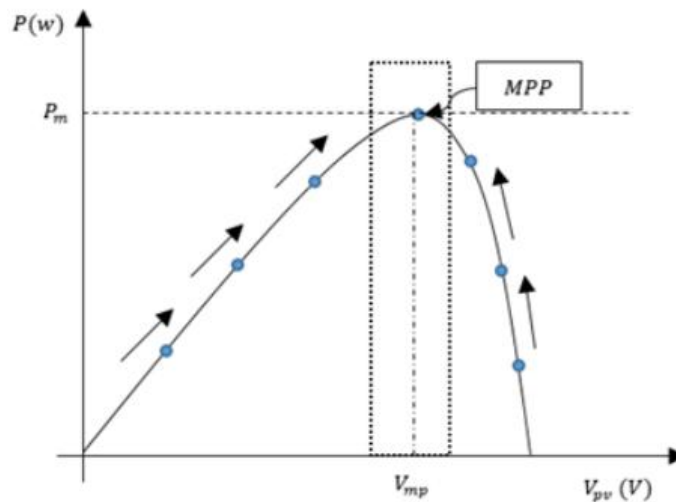


Figura 11. Método de carga del regulador MPPT

3.4.4. Etapa de carga en la batería del regulador MPPT

El regulador MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), incorpora un proceso avanzado de gestión energética mediante diferentes etapas de carga cuyo objetivo principal es maximizar la transferencia de potencia desde el generador fotovoltaico hacia el banco de baterías. Este dispositivo ajusta continuamente el punto de operación del sistema para aprovechar la máxima energía disponible y adaptándose a las variaciones de irradiancia solar y condiciones eléctricas del panel, sus etapas de carga del regulador MPPT permiten controlar de manera eficiente el proceso de almacenamiento energético y garantizar una carga adecuada de la batería, reduciendo pérdidas de energía y mejorando la eficiencia global del sistema fotovoltaico.

El TriStar MPPT tiene un algoritmo de carga de baterías de 4 etapas para hacer la carga más rápida, eficiente y segura [14]. En la Figura 12 se muestra la secuencia de las etapas.

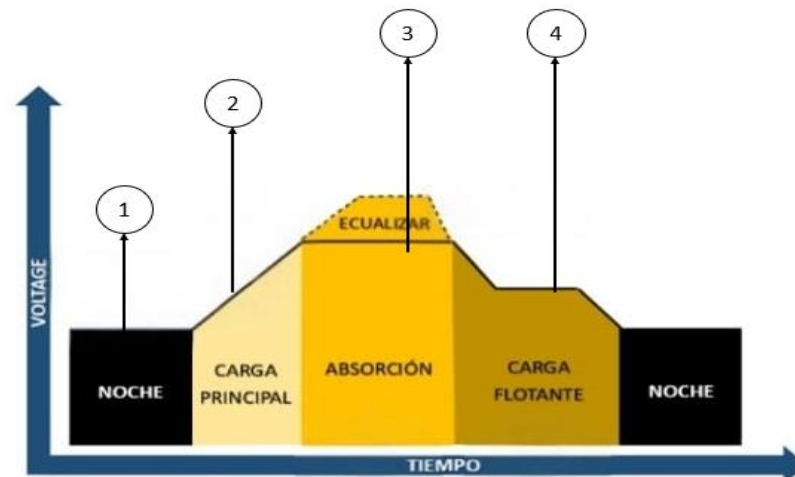


Figura 12. Algoritmo de carga del TriStar MPPT

1. **Etapa Noche o reposo:** No hay disponibilidad de energía fotovoltaica, el regulador detiene la carga debido a la ausencia de radiación solar, la batería permanece alimentando las cargas conectadas y conserva su energía almacenada hasta el siguiente ciclo de generación.
2. **Etapa Carga principal:** En esta fase el regulador entrega la máxima corriente disponible proveniente del sistema fotovoltaico hacia la batería. Su función es recuperar rápidamente el nivel de carga, permitiendo que la tensión aumente progresivamente hasta alcanzar el valor establecido de absorción.
3. **Etapa Absorción:** Cuando el dispositivo eléctrico alcanza el voltaje de absorción, el regulador mantiene un voltaje constante mientras reduce gradualmente la corriente de carga, este procedimiento permite completar la carga de la batería de manera controlada, favoreciendo la correcta conversión y almacenamiento de energía en las celdas.
4. **Etapa Flotación o mantenimiento:** En esta fase, la batería alcanza su carga total y el regulador disminuye el voltaje, suministrando únicamente la energía necesaria para compensar la autodescarga, el objetivo es mantener la batería en estado óptimo durante periodos prolongados. [4]

3.5. Software de supervisión NODE-RED

Node-RED es una plataforma de programación de código abierto orientada al desarrollo de aplicaciones mediante la interconexión de nodos funcionales, donde cada nodo cumple una tarea específica dentro del flujo de procesamiento de datos, esta herramienta permite la

adquisición, transformación y transferencia de información entre diferentes dispositivos y sistemas mediante una arquitectura gráfica basada en flujos de trabajo.

Su principal característica consiste en la creación de modelos visuales que facilitan la configuración y gestión de procesos automatizados, permitiendo representar de manera estructurada la comunicación entre sensores, equipos electrónicos y plataformas de almacenamiento de datos. Debido a su interfaz intuitiva y modular, Node-RED facilita el desarrollo de sistemas de monitoreo y adquisición de información sin requerir una programación compleja, ya que las operaciones pueden dividirse en etapas independientes mediante nodos especializados para funciones específicas, como lectura de variables, procesamiento de datos y comunicación con dispositivos externos[17]

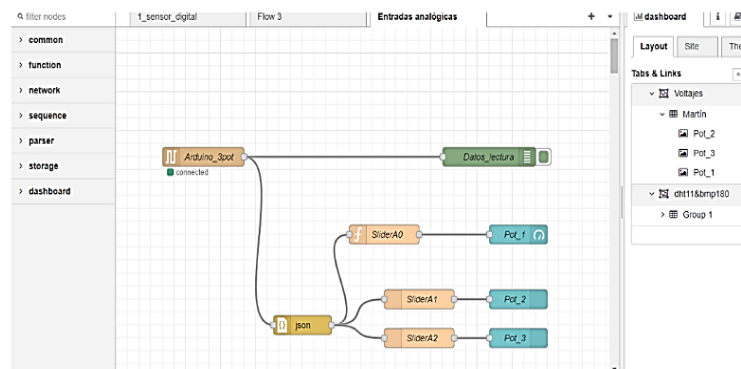


Figura 13. Entorno de programación en NODE-RED

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se realizó la medición, registro y análisis de variables eléctricas y ambientales obtenidas directamente del sistema fotovoltaico. Orientado a evaluar el desempeño energético de los reguladores de carga MPPT y PWM mediante la implementación de un sistema automatizado de monitoreo y procesamiento de datos.

Se aplicó un diseño experimental comparativo de campo, ya que se evaluó el comportamiento de ambos reguladores en configuraciones de captación fija y con seguimiento solar de un eje, bajo condiciones reales de funcionamiento. Las mediciones obtenidas permitieron comparar las variaciones de voltaje, corriente, potencia, energía aprovechada y eficiencia energética. Asimismo, la irradiancia solar, la temperatura ambiente y la temperatura de los módulos se registraron mediante el módulo Datasol MET para relacionar las condiciones ambientales con el desempeño de cada configuración.

El estudio se realizó en el sistema fotovoltaico perteneciente al proyecto de eficiencia energética DIRGI-CP2021-008, conformado por módulos fotovoltaicos, reguladores de carga MPPT y PWM, bancos de baterías, estructuras de captación y cargas eléctricas. Al tratarse de una instalación permanente, fue posible efectuar las mediciones durante su funcionamiento habitual, como se presenta en la Figura 14.

La estructura principal del sistema fotovoltaico no fue modificada. Únicamente se incorporó un sistema de monitoreo mediante comunicación Modbus y Node-RED, que permitió adquirir, visualizar y almacenar las variables necesarias para el análisis. Posteriormente, los datos registrados fueron procesados para comparar el desempeño energético de los reguladores y de las configuraciones evaluadas los cuales se presentan en la sección de análisis y resultados.

4.1.Arquitectura del sistema fotovoltaico experimental y plataforma de adquisición de datos para la evaluación comparativa de reguladores MPPT y PWM.

En la Figura 14 se presenta la arquitectura del sistema experimental implementado para la evaluación de los reguladores de carga MPPT y PWM, donde se detallan los equipos que conforman el sistema, así como la configuración de conexión y comunicación entre cada uno de sus componentes.

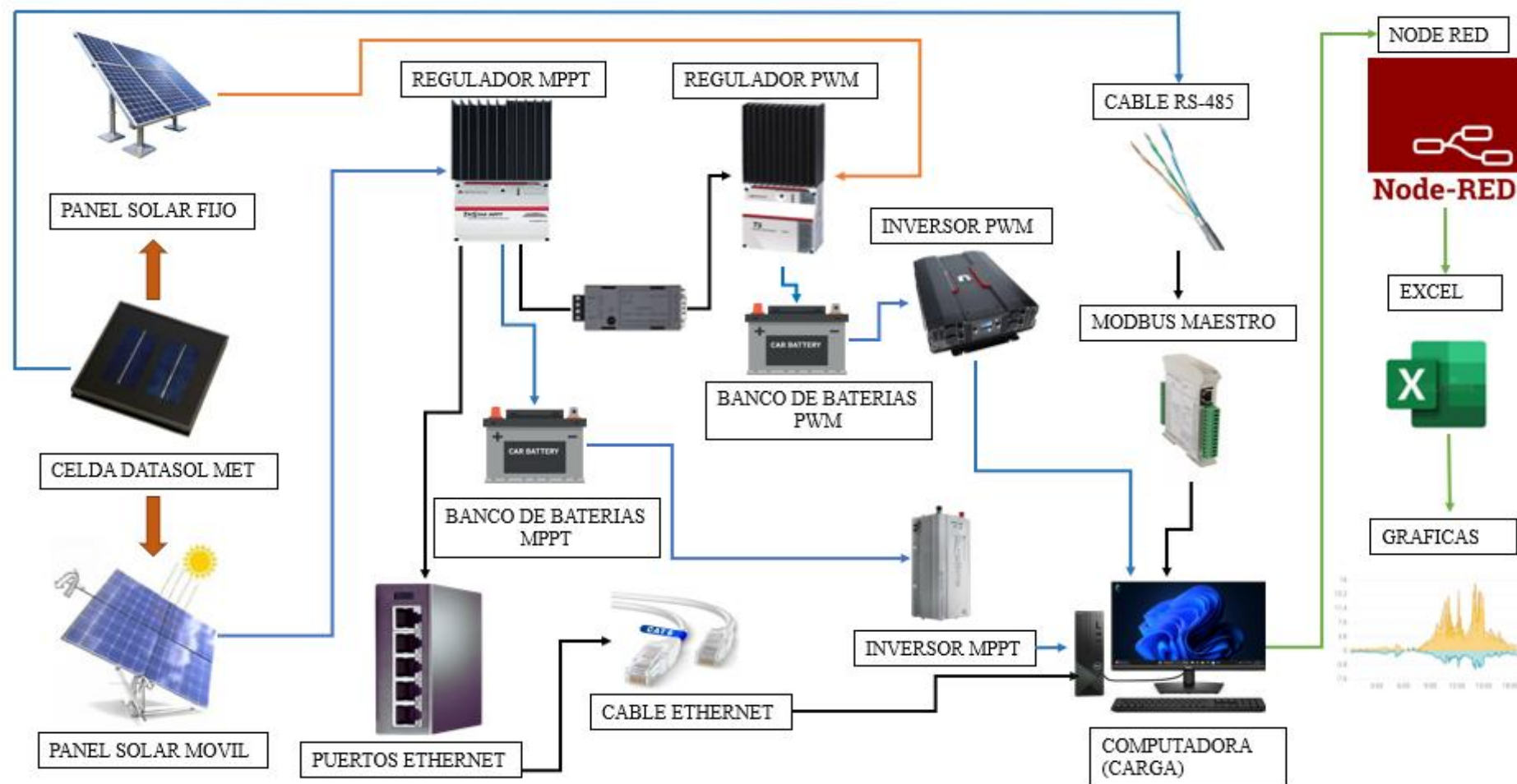


Figura 14. Esquema del sistema de adquisición, monitoreo y procesamiento de datos de los reguladores MPPT y PWM.

4.2. Declaraciones de variables.

4.2.1. Variables Independiente.

Tipo de controlador de carga utilizado MPPT (Máximo Power Point Tracking) y PWM (Pulse Width Modulation).

4.2.2. Variable Dependiente.

Desempeño energético del sistema fotovoltaico, determinado mediante voltaje, corriente, potencia, energía transferida al banco de baterías.

4.3. Área del panel fotovoltaico

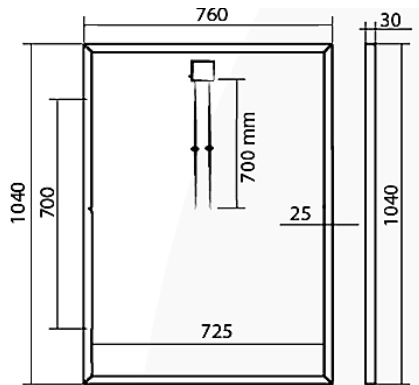


Figura 15. Dimensiones del panel fotovoltaico empleado en los sistemas evaluados.

Debido a que el panel tiene forma rectangular su área se determina mediante la siguiente ecuación:

$$A = b * h \quad (1)$$

Dado que las medidas nos dan en centímetros, para el cálculo lo transformaremos en metros y remplazaremos en la ecuación ya indicada

$$A = 0,76m * 1.04m = 0,79m^2$$

4.3.1. Potencia solar incidente en los paneles del sistema MPPT

El resultado que fue obtenido representa el área correspondiente a cada uno de los paneles de forma individual, para su evaluación del caso de estudio, se requiere multiplicar este valor por los seis paneles considerados, con el objetivo de cuantificar el área total que comprenden todos ello, para esto el cálculo se efectúa siguiendo estrictamente el procedimiento establecido en la ecuación que se presenta a continuación.

$$A = 0,79m^2 * 6 = 4,74m^2$$

Una vez calculada el área, se emplea este valor en la ecuación correspondiente a la ecuación 2, determinar la potencia del sistema MPPT.

Radiación media: $P = P \left(\frac{W}{m^2} \right) * A(m^2)$ (2)

4.3.2. Potencia solar incidente en los paneles del sistema PWM

El arreglo conectado al regulador PWM está conformado por tres paneles. Por tanto, el área total de captación es:

$$A = 0,79m^2 * 3 = 2,37m^2$$

Calculada el área, se emplea este valor en la ecuación correspondiente a la ecuación 2, y determinar la potencia del sistema PWM.

Para determinar exclusivamente la eficiencia interna del regulador se requiere comparar su potencia eléctrica de entrada, calculada con el voltaje y la corriente del arreglo fotovoltaico, con su potencia eléctrica de salida hacia la batería.

4.4. Definición y configuración de los casos de estudio.

El sistema fotovoltaico se evaluó mediante dos configuraciones operativas: una estructura fija y una estructura con seguimiento solar de un eje. Estas configuraciones permitieron analizar la incidencia de la posición de los módulos sobre la captación de radiación solar, las variables eléctricas y el rendimiento energético del sistema.

Tabla 3. Configuración de los casos de estudio y variables eléctricas evaluadas.

CASOS	CONFIGURACION	REGULADORES/CELDA	VARIABLES A MEDIR
C1	Fijo	MPPT y PWM	• Voltaje • Corriente
C2	Seguimiento solar de un eje	MPPT y PWM	• Voltaje • Corriente
C3	Fijo	MPPT, PWM y CELDA	• Potencia • Energía • Eficiencia
C4	Seguimiento solar de un eje	MPPT, PWM y CELDA	• Potencia • Energía • Eficiencia

4.4.1. Sistema fotovoltaico en configuración fija.

De acuerdo con la Figura 16 en la configuración se instalaron módulos fotovoltaicos sobre una estructura con orientación y ángulo de inclinación constantes. Esta disposición permitió evaluar el comportamiento de las variables eléctricas y el rendimiento energético de los reguladores MPPT y PWM bajo condiciones geométricas estables durante el periodo de monitoreo [18].

4.4.2. Configuración con seguidor solar de un eje

La configuración con seguimiento solar de un eje consistió en instalar los módulos fotovoltaicos sobre una estructura móvil, capaz de modificar automáticamente su posición durante el día conforme al desplazamiento aparente del Sol. Este mecanismo permitió mantener una incidencia favorable de la radiación solar sobre la superficie de los módulos, evaluar su efecto en las variables eléctricas y el rendimiento energético del sistema. Esquema de ubicación de los puntos de medición de las variables eléctricas de entrada y salida de los reguladores MPPT y PWM, y de las variables ambientales registradas por la celda meteorológica.

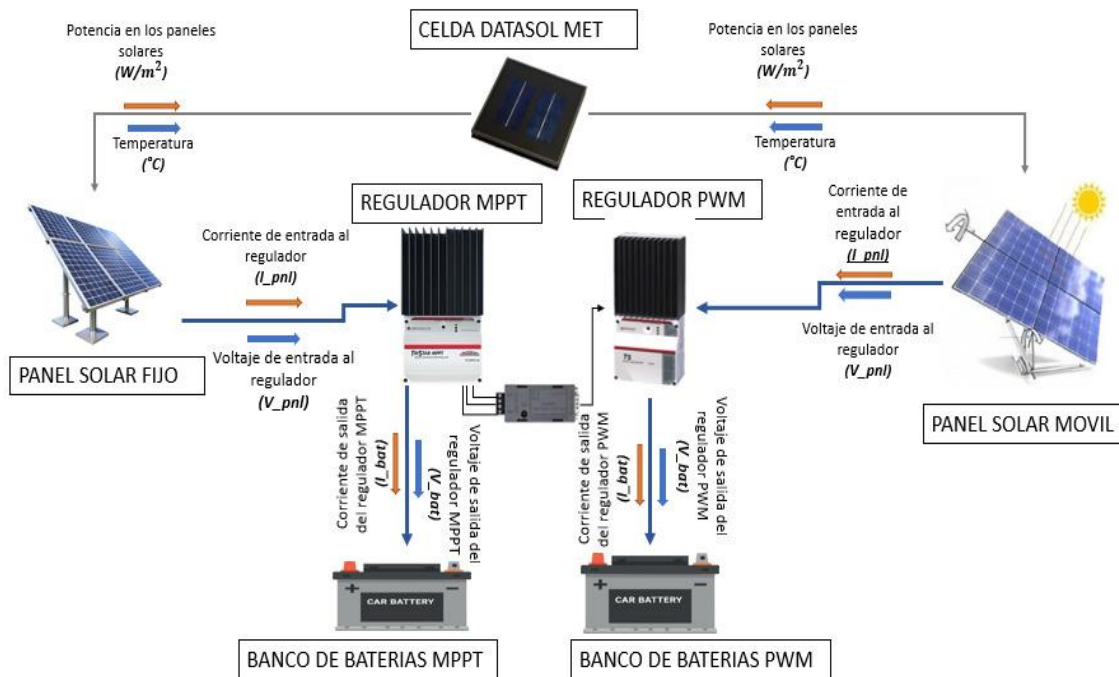


Figura 16. Ubicación de los puntos de medición de las variables eléctricas del sistema fotovoltaico

4.5. Adquisición de datos y monitoreo de mediante un sistema SCADA aplicado en Node-RED

En la Figura 17 se presenta el diagrama de bloques correspondiente al proceso de adquisición de datos, donde se representa la secuencia de comunicación y transferencia de información entre los dispositivos que conforman el sistema experimental.

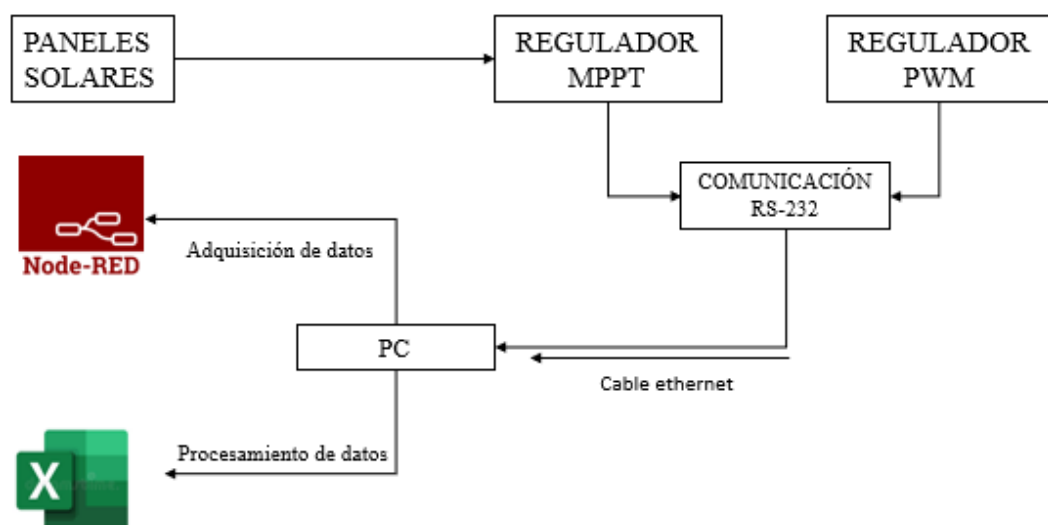


Figura 17. Estructura de monitoreo para dispositivos y sistema SCADA.

4.5.1. Comunicación RS-232 de los reguladores MPPT y PWM

Los reguladores **MPPT** y **PWM** se comunican con el sistema de monitoreo mediante la interfaz serial **RS-232**, que permite transmitir sus variables eléctricas hacia Node-RED para su procesamiento, visualización y almacenamiento, facilitando el análisis comparativo de ambos reguladores.

4.5.2. Registros de variables eléctricas de conversión tomadas desde el documento Modbus TriStar MPPT.

A partir de los registros obtenidos del manual del regulador MPPT que se observan en la Tabla 4 es posible calcular el voltaje y corriente, las cuales permite el escalamiento de las variables a medir.

Tabla 4. Registros Modbus de escalamiento V_PU e I_PU del regulador TriStar MPPT.

Funciones Modbus Compatibles MPPT				
Dirección PDU	Dirección Lógica	Variable	Descripción	Unidad
0x0000	1	V_PU hi	Escala de voltaje, parte entera	V
0x0002	3	I_PU hi	Escala de corriente parte entera	A

Para la evaluación experimental se seleccionaron los registros correspondientes al voltaje de la batería, voltaje del arreglo fotovoltaico, corriente hacia la batería y corriente del arreglo. La

Tabla 5 muestra su ubicación en el documento Modbus del regulador MPPT.

Tabla 5. Registros Modbus empleados para medir voltaje y corriente en el regulador TriStar MPPT.

Documento MODBUS del controlador TriStar MPPT					
Ecuación del voltaje en la batería	0x0018	25	adc_vb_f_med	Voltaje de la batería, filtrado ($\tau \approx 2,5$ s)	V $\frac{n * V_{PU}}{2^{-15}}$
Ecuación del voltaje en las baterías	0x001B	28	adc_vbterm_f	Voltaje en los paneles filtrado	V $\frac{n * V_{PU}}{2^{-15}}$
Ecuación de la corriente en la batería	0x001C	29	adc_ib_f_shadow	Corriente de la batería, filtrada ($\tau \approx 2,5$ s)	A $\frac{n * I_{PU}}{2^{-15}}$
Ecuación de la corriente de los paneles	0x001D	30	adc_ia_f_shadow	Corriente del arreglo fotovoltaico, filtrada ($\tau \approx 2,5$ s)	A $\frac{n * I_{PU}}{2^{-15}}$

4.5.3. Definición de variables eléctricas de conversión tomadas desde el documento Modbus TriStar PWM.

En el regulador PWM, los registros Modbus también entregan valores digitales brutos; sin embargo, su conversión no depende de parámetros V_{PU} e I_{PU} , sino de factores fijos definidos en el documento técnico del equipo. Las variables seleccionadas corresponden al voltaje de la batería, voltaje del arreglo fotovoltaico y corriente de carga.

Tabla 6. Registros Modbus empleados para medir voltaje y corriente en el regulador TriStar PWM.

Funciones Modbus compatibles PWM					
Dirección PDU	Dirección lógica	variable	Descripción de la variable	Unidad	Escalamiento o rango
0x0008	9	adc_vb_f	Voltaje de la batería, filtrado ($\tau \approx 2,5$ s)	V	$n * 96,667 * 2^{-15}$
0x000A	11	adc_vx_f	Voltaje del arreglo fotovoltaico/carga, filtrado ($\tau \approx 2,5$ s)	V	$n * 139,15 * 2^{-15}$
0x000B	12	adc_ipv_f	Corriente de carga, filtrada ($\tau \approx 2,5$ s)	A	$n * 66,667 * 2^{-15}$

Ecuación del voltaje en la batería

Ecuación del voltaje de los paneles

Ecuación de la corriente en la batería

4.5.4. Comunicación y asignación de variables de la celda DATASOL MET a los reguladores.

La celda DATASOL MET registra la irradiancia solar y la temperatura. Estos datos se integran con las variables eléctricas de los reguladores MPPT y PWM, transmitidas mediante comunicación RS-232 hacia el computador, donde Node-RED realiza la adquisición y Excel permite su procesamiento y análisis comparativo como se define en la

Figura 18.

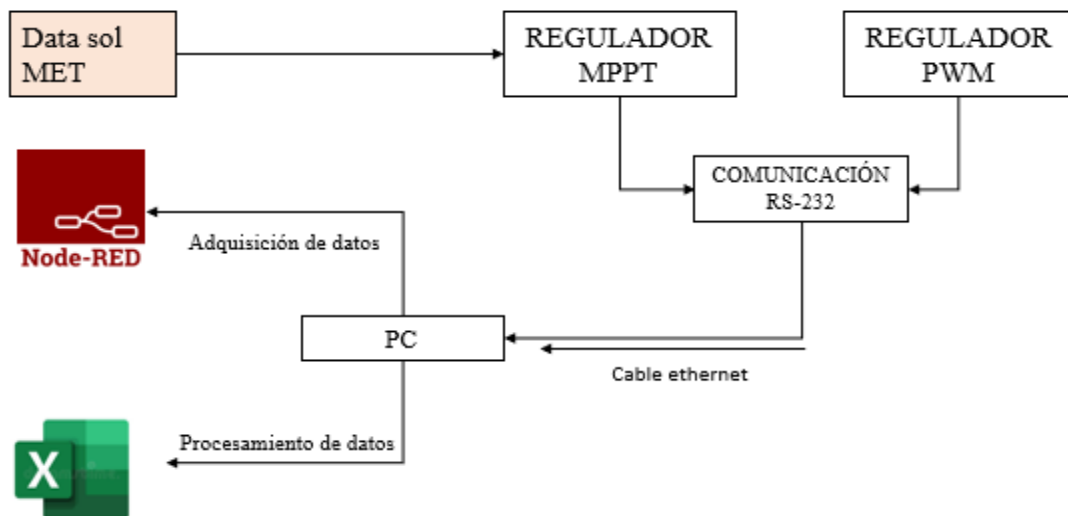


Figura 18. Esquema de adquisición de datos del sistema

4.5.5. Variables registradas por la celda Data Sol MET de acuerdo con su manual de operación.

La celda DataSol MET permite registrar y almacenar de manera sistemática las principales variables meteorológicas que requerimos como son la radiación y la temperatura en las condiciones ambientales. De acuerdo con su manual de operación este equipo integra sensores especializados que facilitan la obtención de datos confiables y continuos por ello constituyen una base fundamental para el análisis climático y la evaluación del comportamiento de nuestro sistema estudiado. Las variables electas son las siguientes como se observa en la Tabla 7

Tabla 7. Registros de variables meteorológicas disponibles en la celda DATASOL MET.

Tipo	Dirección	Detalle	Tipo	Unidad	Descripción
M00	0x0060	xxxx	sin signo	W/m ²	Radiación media
M01	0x0061	xxxx	sin signo	W/m ²	Radiación de semi-celula 1
M02	0x0062	xxxx	sin signo	W/m ²	Radiación de semi-celula 2
M10	0x006A	± xx.x	con signo	°C	Temperatura ambiente
M11	0x006B	± xx.x	con signo	°C	Temperatura del panel fotovoltaico

4.6. Configuración del flujo de adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos mediante Node-RED para el monitoreo y análisis del sistema fotovoltaico.

Este apartado describirá la estructura e integración del sistema SCADA utilizado en la plataforma Node-RED el cual se utilizó para adquirir, visualizar y almacenar los datos del sistema fotovoltaico. La comunicación con los reguladores MPPT y PWM y la celda DATASOL MET se realizó mediante el protocolo Modbus TCP/IP utilizando la dirección IP 172.16.40.197 y el puerto 502, también se utilizó el Unit-ID 1 y la función FC3 (Read Holding Registers), todas estas funciones permitieron leer los registros internos de los dispositivos donde se encuentran almacenadas las variables eléctricas y ambientales requeridas para el monitoreo y estos datos fueron registrados cada segundo y se configuró una reconexión automática para evitar interrupciones.

Aunque los dispositivos utilizan la misma dirección IP cada uno se identifica mediante un rango de registros diferente, para el caso del regulador MPPT se tomó lectura de 60 registros desde la dirección 0 y para el regulador PWM se tomó lectura de 30 registros desde la dirección 0 y por último para la celda DATASOL MET, 20 registros desde la dirección 90.

Finalmente, Node-RED procesa las variables obtenidas como son voltaje, corriente, potencia, irradiancia solar y temperatura y las almacena en archivos CSV con su fecha y hora. Esto permitió supervisar el sistema en tiempo real y disponer de datos históricos para comparar el desempeño energético de los reguladores MPPT y PWM.

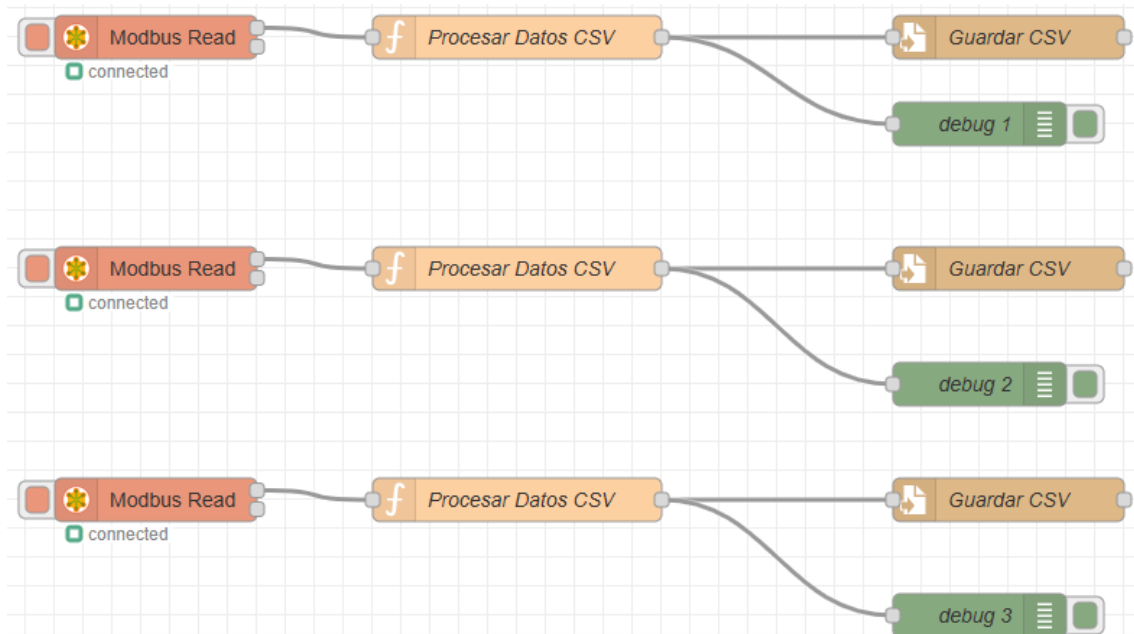


Figura 19. Flujos de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos mediante Node-RED.

4.7.Lectura de registros y aplicación de fórmulas de escalamiento mediante especificaciones técnicas

Los registros de variables eléctricas de los reguladores MPPT y PWM se obtuvieron mediante lectura de registros por comunicación Modbus y los datos adquiridos se almacenaron en formato CSV para su posterior tratamiento en hojas de cálculo de Microsoft Excel, a partir de los valores digitales registrados se aplicaron los procedimientos de escalamiento y conversión definidos en la documentación técnica de cada equipos, para el regulador MPPT se utilizaron los parámetros de escala establecidos en su manual de comunicación por otro lado para el regulador PWM se aplicaron los factores de conversión determinados en su hoja de especificaciones Modbus y con ello se determina los valores originales se transformaron en magnitudes eléctricas reales permitiendo su organización, tabulación y elaboración de las representaciones gráficas empleadas en el análisis y comparación del desempeño energético de ambos reguladores.

4.7.1. Variables eléctrica y ecuaciones de conversión tomadas desde el documento modbus Tirstar MPPT.

Para la evaluación experimental se seleccionaron los registros correspondientes las lecturas de escalamiento se obtuvieron mediante Node-RED y se almacenaron en CSV para su procesamiento en Excel, obteniéndose los siguientes valores de la Tabla 8

Tabla 8. Parámetros de escalamiento registrados en el regulador MPPT

Escalado de voltaje, valor entero(V_PU)	Escalado de corriente, valor entero(I_PU)
180 (V)	80 (A)

A partir de la lectura de los registros en Node-Red, se obtuvieron los factores de escalamiento de voltaje y corriente del regulador: $V_{PU} = 180$ y $I_{PU} = 80$

En síntesis, las variables consideradas para el análisis se organizaron según su clasificación e indicadores, como se presenta en la

Tabla 9

Tabla 9. Variables eléctricas y ecuaciones de conversión del regulador MPPT

Variables a medir	Ecuación
Voltaje en la batería (V)	$n * V_{PU} * 2^{-15}$ (3)
Voltaje de los paneles solares (V)	$n * V_{PU} * 2^{-15}$ (4)
Corriente en la batería (A)	$n * I_{PU} * 2^{-15}$ (5)

$$\text{Corriente de los paneles solares} \quad n * I_{\text{PU}} * 2^{-15} \quad (6)$$

(A)

En la Tabla 10 se muestran los datos adquiridos mediante **Node-RED** se exportaron en formato CSV y se procesaron en Microsoft Excel. Para ello, se realizó su organización, tabulación y conversión a unidades eléctricas, con el propósito de elaborar las representaciones gráficas utilizadas en la sección de análisis y resultados. Los valores digitales registrados se representan mediante la letra **n**.

Tabla 10. Valores digitales registrados en el regulador MPPT

Voltaje de batería, filtrado (n)	Voltaje de paneles solares (n)	Corriente hacia batería, filtrada (n)	Corriente de los paneles solares (n)
9226	9291	46	40

Con estos registrados en el regulador MPPT, sus datos se proceden a aplicar en las ecuaciones de la Tabla 11, y obtener su valor real de voltaje y corriente.

Nota: Como se aprecia Figura 13 Los valores obtenidos se dividirán entre cuatro para determinar el valor correspondiente a cada unidad, debido a que el banco de baterías está conformado por cuatro baterías.

Tabla 11. Conversión de los registros digitales del regulador MPPT

Variables	Ecuación	Sustitución	Resultado	Banco Baterías 4
Voltaje en la batería	$n * V_{\text{PU}} * 2^{-15}$	$9226 * 180V * 2^{-15}$	50,68 V	12,67 V
Voltaje de los paneles solares	$n * V_{\text{PU}} * 2^{-15}$	$9291 * 80V * 2^{-15}$	51,04 V	12,76 V

Corriente en la batería	$n \cdot I_{PU} \cdot 2^{-15}$	$46 \cdot 80A \cdot 2^{-15}$	0,11 A
Corriente de los paneles solares	$n \cdot I_{PU} \cdot 2^{-15}$	$40 \cdot 180 \cdot 2^{-15}$	0,09 A

De esta manera, se validó el funcionamiento del sistema de adquisición y visualización implementado en Node-RED. La concordancia entre los valores registrados por la plataforma, los resultados calculados y las mediciones realizadas directamente en el sistema fotovoltaico confirmó la consistencia de la información obtenida.

En consecuencia, la prueba se consideró satisfactoria y el sistema de monitoreo adecuado para la recolección de las variables eléctricas utilizadas en la investigación.

4.7.2. Variables tomadas desde el documento modbus Tirstar PWM

Los registros de variables eléctricas del regulador PWM se obtuvieron mediante lectura por comunicación Modbus; sus valores digitales se escalaron aplicando los parámetros de escala establecidos en su documentación técnica, como se presenta en la Tabla 6. Registros Modbus empleados para medir voltaje y corriente en el regulador TriStar PWM. Los registros adquiridos se convirtieron aplicando los factores de conversión fijos definidos en su hoja de especificaciones Modbus.

En recapitulación, las variables consideradas para el análisis quedaron organizadas según su clasificación e indicadores como se presenta en la

Tabla 12. Variables eléctricas y ecuaciones de conversión del regulador PWM.

Tabla 12. Variables eléctricas y ecuaciones de conversión del regulador PWM

Varia a medir	Ecuación
---------------	----------

Voltaje en la batería

$$n * 96,667 * 2^{-15} \quad (7)$$

Voltaje de los paneles solares

$$n * 139,15 * 2^{-15} \quad (8)$$

Corriente en la batería

$$n * 66,667 * 2^{-15} \quad (9)$$

Nota. El registro de corriente de carga representa la corriente que circula desde los paneles, a través del regulador, hacia la batería. El registro I_load corresponde únicamente a los equipos conectados al terminal LOAD y no se utiliza para calcular la potencia de los paneles ni de la batería en el regulador (PWM) [19].

Los datos del regulador PWM adquiridos mediante Node-RED fueron exportados y procesados en Microsoft Excel. Posteriormente, se realizó su organización, tabulación y conversión a unidades eléctricas para elaborar las representaciones gráficas empleadas en el análisis de resultados.

Tabla 13. Valores digitales registrados en el regulador PWM

Voltaje de batería, filtrado	Voltaje de paneles solares	Corriente hacia batería, filtrada
4219	2389	32

Con estos registrados de la Tabla 13 en el regulador PWM, todos sus datos se proceden aplicar las ecuaciones correspondientes y obtener su valor real de voltaje y corriente como se muestra en la tabla Tabla 14

Tabla 14. Conversión de los registros digitales del regulador PWM

Variables	Ecuación	Sustitución	Resultado
Voltaje en la batería	$n * 96,667 * 2^{-15}$	$4219 * 96,667 * 2^{-15}$	12,44 V
Voltaje de los paneles solares	$n * 139,15 * 2^{-15}$	$2389 * 139,15 * 2^{-15}$	10.15 V
Corriente en la batería	$n * 66,667 * 2^{-15}$	$32 * 66,667 * 2^{-15}$	0,06 A

La relación entre los registros adquiridos mediante Node-RED, los valores calculados y las mediciones directas validó la seguridad y confiabilidad operativa del sistema de adquisición implementado.

4.7.3. Variables registradas por la celda Data Sol MET de acuerdo con su manual de operación

La celda DATASOL MET permite registrar y almacenar de manera sistemática las principales variables meteorológicas requeridas: radiación solar y temperatura en las condiciones ambientales. De acuerdo con su manual de operación, este equipo integra sensores especializados que facilitan la obtención de datos confiables y continuos, por lo que constituye una base fundamental para el análisis climático y la evaluación del comportamiento del sistema estudiado.

Las variables registradas por la celda DATASOL MET, su clasificación y unidades de medición se detallan en la Tabla 7. Registros de variables meteorológicas disponibles en la celda DATASOL MET. Mientras que su organización resumida para el procesamiento y análisis se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15. Variables meteorológicas seleccionadas de la celda DATASOL MET

Numero	Descripción	Unidad
1	Radiación media	W/m ²
2	Radiación de semi-celula 1	W/m ²
3	Radiación de semi-celula 2	W/m ²
4	Temperatura ambiente	°C
5	Temperatura panel	°C

Estas variables se integraron en la plataforma de adquisición para su registro continuo durante el periodo de monitoreo. Posteriormente, los datos obtenidos se procesaron y organizaron en hojas de cálculo para su análisis correspondiente.

4.7.4. Potencia solar incidente en los paneles del sistema MPPT

Este resultado que fue obtenido representa el área correspondiente a cada uno de los paneles de forma individual, para su evaluación del caso de estudio, se requiere multiplicar este valor por los seis paneles considerados, con el objetivo de cuantificar el área total que comprenden todos

ello, para esto el cálculo se efectúa siguiendo estrictamente el procedimiento establecido en la ecuación que se presenta a continuación.

$$A = 0,79m^2 * 6 = 4,74m^2$$

Para el caso del regulador MPPT la celda nos da los siguientes valores mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores de radiación extraídos de Excel utilizados para el sistema MPPT

Radiación media (W/m^2)	Radiación de semi-celula 1 (W/m^2)	Radiación de semi-celula 2 (W/m^2)
13	12	13

Con los valores obtenidos, el cálculo de la potencia quedaría como se explica en la Tabla 17

Tabla 17. Estimación de la potencia solar incidente en el arreglo

Potencia en (W/m^2)	Ecuación	Reemplazando ecuación	la Potencia en (W)
Radiación media	$P = Potencia \left(\frac{W}{m^2} \right) * a(m^2)$	$P = 13 \left(\frac{W}{m^2} \right) * 4,74m^2$	61,62 W

4.7.5. Potencia solar incidente en los paneles del sistema PWM

El arreglo conectado al regulador PWM está conformado por tres paneles. Por tanto, el área total de captación es:

$$A = 0,79m^2 * 3 = 2,37m^2$$

Tabla 18. Valores de radiación extraídos de Excel utilizados para el sistema PWM

Radiación media (W/m^2)	Radiación de semi-celula 1 (W/m^2)	Radiación de semi-celula 2 (W/m^2)
-----------------------------	--	--

Con los valores obtenidos, el cálculo de la potencia quedaría como se explica en la Tabla 19.

Tabla 19. Estimación de la potencia solar incidente en el arreglo PWM

Potencia en (W/m ²)	Ecuación	Reemplazando ecuación	la Potencia en (W)
Radiación media	$P = Potencia \left(\frac{W}{m^2} \right) * a(m^2)$	$P = 13 \left(\frac{W}{m^2} \right) * 2,37m^2$	30,81 W

La relación entre la potencia solar incidente y la potencia entregada al banco de baterías permite estimar el aprovechamiento global del sistema solar - batería. Para determinar exclusivamente la eficiencia interna del regulador se requiere comparar su potencia eléctrica de entrada, calculada con el voltaje y la corriente del arreglo fotovoltaico, con su potencia eléctrica de salida hacia la batería.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. Comparación experimental entre reguladores MPPT Y PWM

Observación: Cada caso de estudio comprende registros obtenidos en fechas diferentes; sin embargo, todos fueron monitoreados en el mismo intervalo horario, 06:00 a 18:00 h.

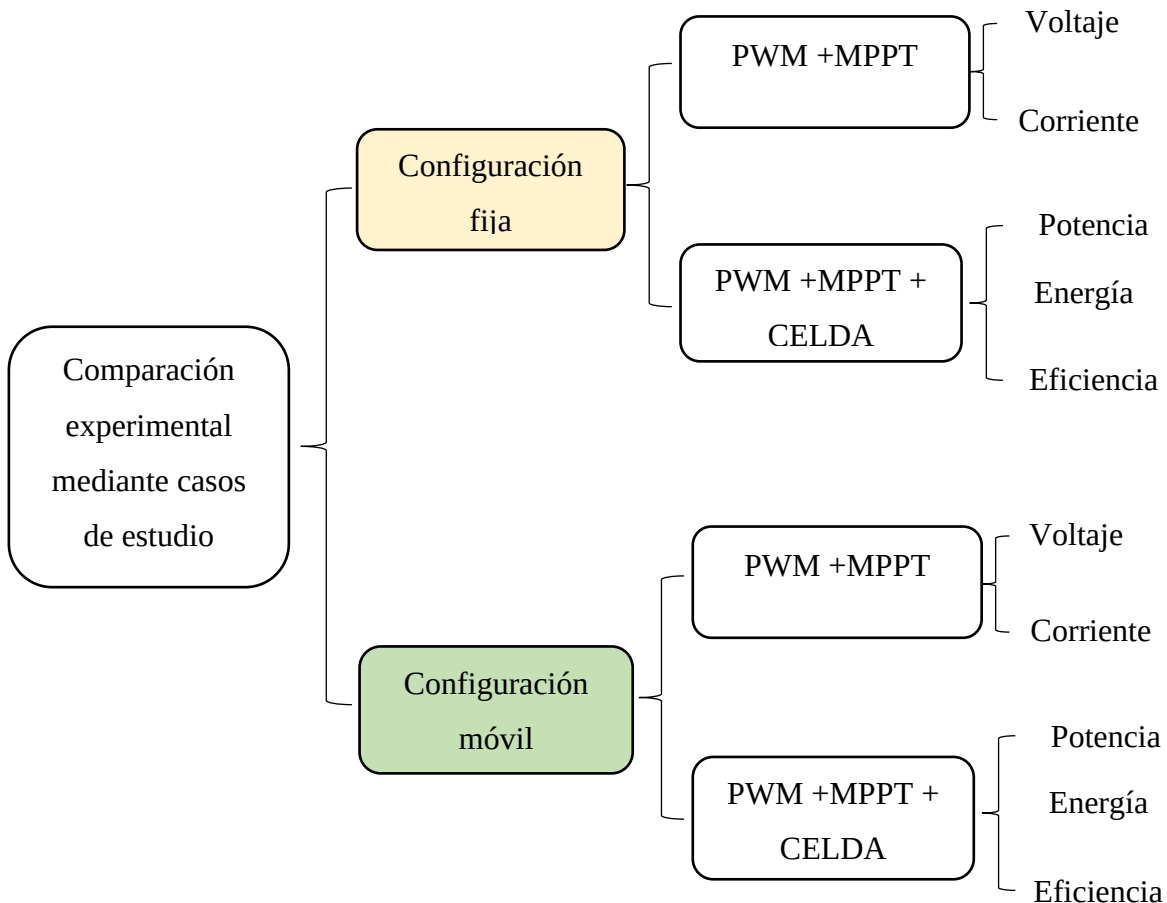


Figura 20. Esquema de comparación experimental de los reguladores PWM y MPPT

5.2. Caso C1: Sistemas fotovoltaicos fijos con reguladores MPPT y PWM:

Durante 4 días de evaluación, comprendidas entre el 2 y 5 de junio de 2026, se evaluó el desempeño energético de los reguladores MPPT y PWM con seguimiento solar del proyecto DIRGI-CP2021-008. Se registraron voltaje y corriente de entrada y salida para comparar la captación, conversión y regulación de la energía fotovoltaica

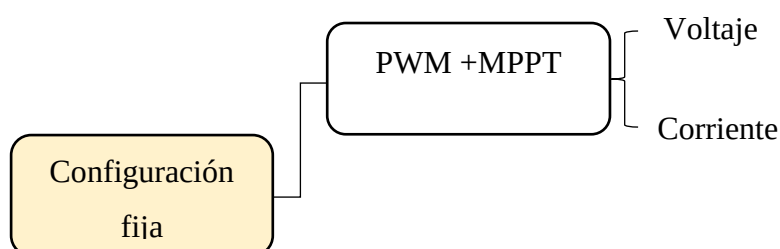


Figura 21. Comparación de los reguladores en configuración fija

5.2.1. Caracterización de los ciclos de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador MPPT

Mediante la recopilación de datos, se obtuvieron registros correspondientes al funcionamiento del regulador MPPT como se indica en la Figura 22.

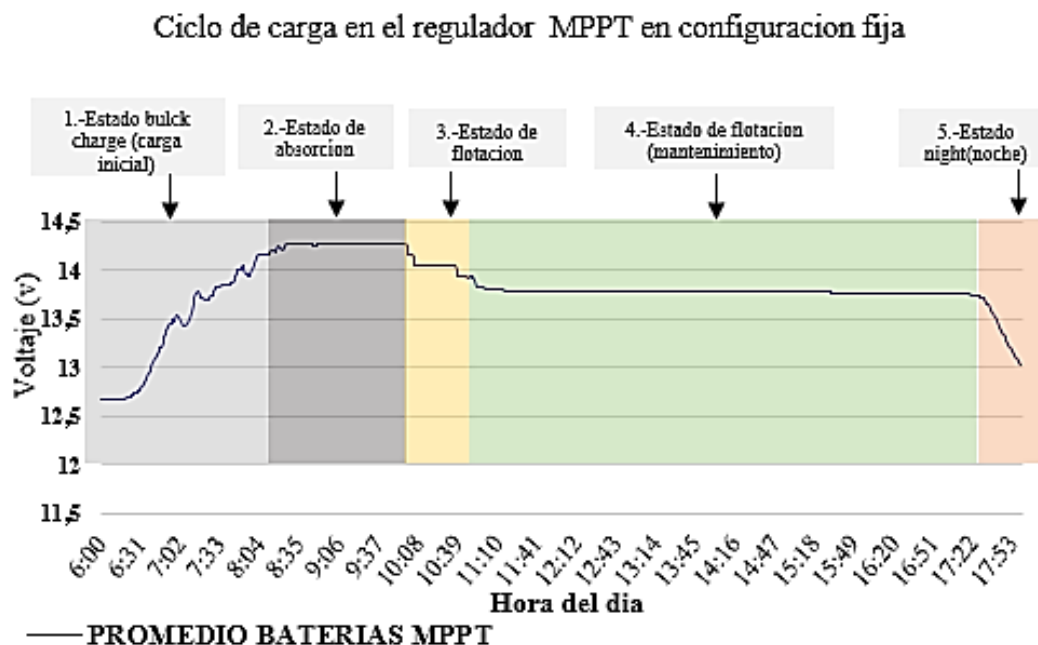


Figura 22. Análisis estados de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador MPPT

Análisis estados de carga MPPT

- Bulk Charge (06:00–08:00 h):** El voltaje aumenta de 12,7 a 14,1 V, mientras el regulador suministra la máxima corriente disponible.
- Absorption (08:00–10:00 h):** El voltaje alcanza 14,2–14,3 V y se mantiene constante para completar la carga de las baterías.
- Float (10:00–11:00 h):** Al alcanzar aproximadamente el 100 % de carga, el regulador reduce el voltaje para evitar la degradación de las baterías.
- Float de mantenimiento (11:00–17:00 h):** El voltaje se estabiliza entre 13,7 y 13,8 V para conservar la carga y prevenir sobrecargas.
- Night:** Al finalizar la generación solar, el voltaje disminuye hasta aproximadamente 13,0 V por la ausencia de aporte energético del arreglo fotovoltaico.

5.2.2. Caracterización de los ciclos de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador PWM

Mediante la recopilación de datos, se obtuvieron registros correspondientes al funcionamiento del regulador PWM como se indica en la Figura 23.

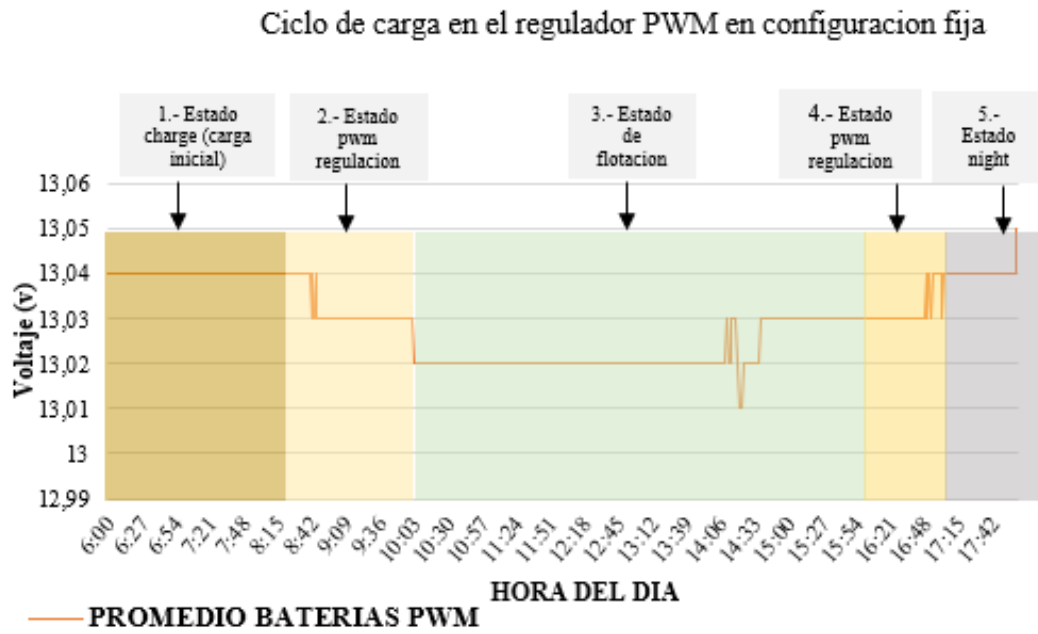


Figura 23. Análisis estados de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador PWM

Análisis estados de carga PWM.

1. **Charge (carga inicial, 06:00–08:30 h):** El voltaje se mantiene alrededor de 13,04 V mientras el controlador transfiere energía hacia la batería.
2. **PWM Regulation (08:30–10:00 h):** El voltaje disminuye a 13,02–13,03 V debido a la regulación de corriente mediante pulsos PWM.
3. **Float (flotación, 10:00–17:00 h):** El voltaje permanece estable en 13,03 V para mantener la carga y evitar sobrecargas.
4. **PWM Regulation (17:00–17:30 h):** El voltaje varía entre 13,02 y 13,03 V ante la disminución de la energía solar disponible.
5. **Night (noche, 17:30–18:00 h):** El voltaje retorna aproximadamente a 13,04 V; finaliza la generación fotovoltaica y la batería alimenta las cargas.

5.2.3. Voltaje de entrada y salida del regulador PWM

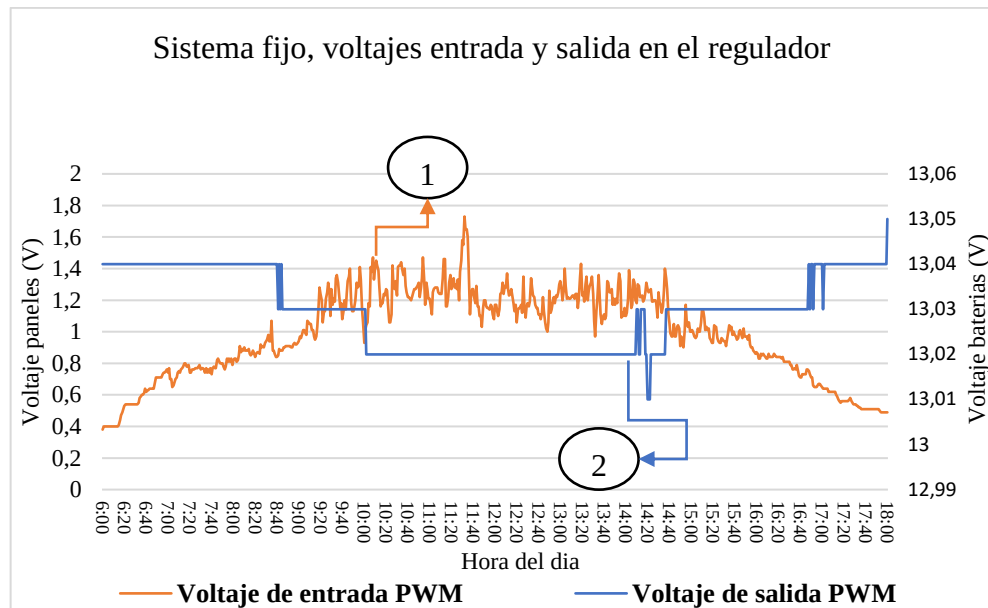


Figura 24. Análisis voltaje de entrada y salida el regulador PWM

En la Figura 24 se analiza el comportamiento de los voltajes de entrada y salida del regulador PWM durante el periodo de monitoreo entre las 06:00 y 18:00 h.

- 1. Voltaje de entrada PWM (línea naranja):** Aumenta de 0,4 V a 1,2 - 1,4 V con el incremento de la irradiancia. Los bajos valores se atribuyen a la carga completa de la batería y ausencia de cargas, por lo que el regulador aplica pulsos de mantenimiento. Al finalizar, disminuye hasta 0,5 V.
- 2. Voltaje de salida PWM (línea azul):** Se mantiene entre 13,00 y 13,05 V, con pequeñas variaciones propias de la regulación PWM, conservando estable la tensión del banco de baterías.

Análisis general: El PWM condiciona el arreglo a la tensión de la batería y regula la corriente mediante pulsos de conexión y desconexión según su estado de carga.

5.2.4. Voltaje de entrada y salida en el regulador MPPT

En la Figura 25 se analiza comportamiento de los voltajes de entrada y salida del regulador MPPT durante el periodo de monitoreo entre las 06:00 y 18:00 h.

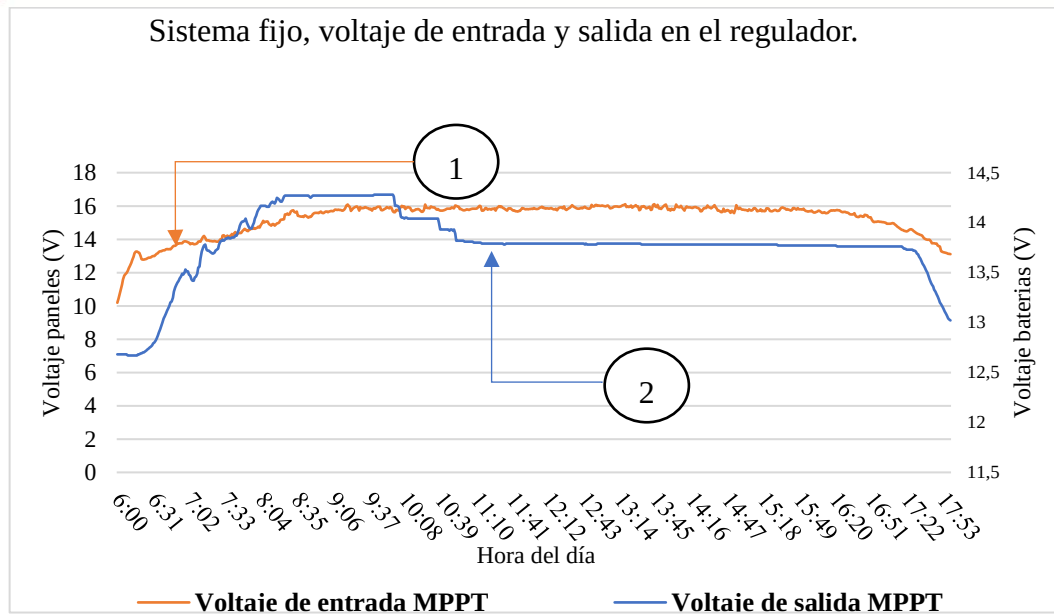


Figura 25. Análisis voltaje de entrada en el regulador MPPT

1. **Voltaje de entrada MPPT (línea naranja):** Aumenta de 10 a 16 V con la irradiancia y permanece estable entre 15 y 16 V durante la jornada.
2. **Voltaje de salida MPPT (línea azul):** Inicia en 12,8 V, alcanza 14,2 V durante la carga, disminuye a 13,8 V en flotación y finaliza cerca de 13 V.

Análisis general: La Figura 25 evidencia la conversión DC-DC del regulador MPPT, que adapta el voltaje del arreglo a las condiciones de carga del banco de baterías.

5.2.5. Corrientes de entrada y salida en el regulador MPPT

En la

Figura 26 se analiza el comportamiento de las corrientes de entrada y salida del regulador MPPT

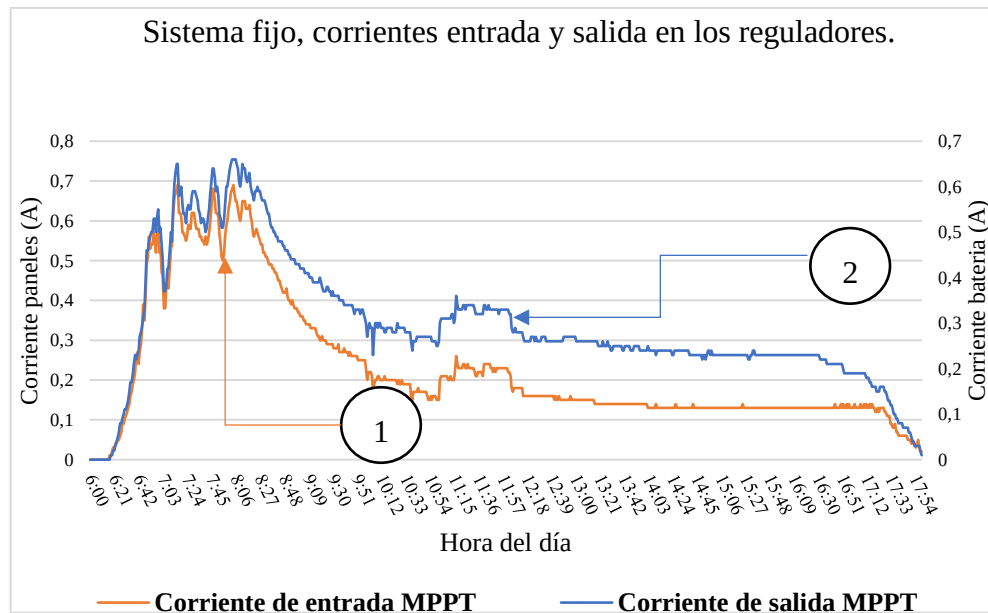


Figura 26. Análisis corriente de entrada y salida el regulador MPPT

1. **Corriente de entrada MPPT (línea naranja):** Aumenta hasta 0,68 A durante las primeras horas y disminuye progresivamente a 0,15 - 0,20 A según la irradiancia y demanda de carga.
2. **Corriente de salida MPPT (línea azul):** Alcanza 0,65 A durante la carga inicial y se estabiliza entre 0,25 y 0,35 A durante la regulación y mantenimiento.

Análisis general:

La

Figura 26 evidencia que el regulador MPPT ajusta la corriente transferida según la disponibilidad solar y el estado de carga de la batería. La reducción de ambas corrientes indica la transición hacia la etapa de mantenimiento.

5.2.6. Análisis de voltaje en los reguladores MPPT y PWM.

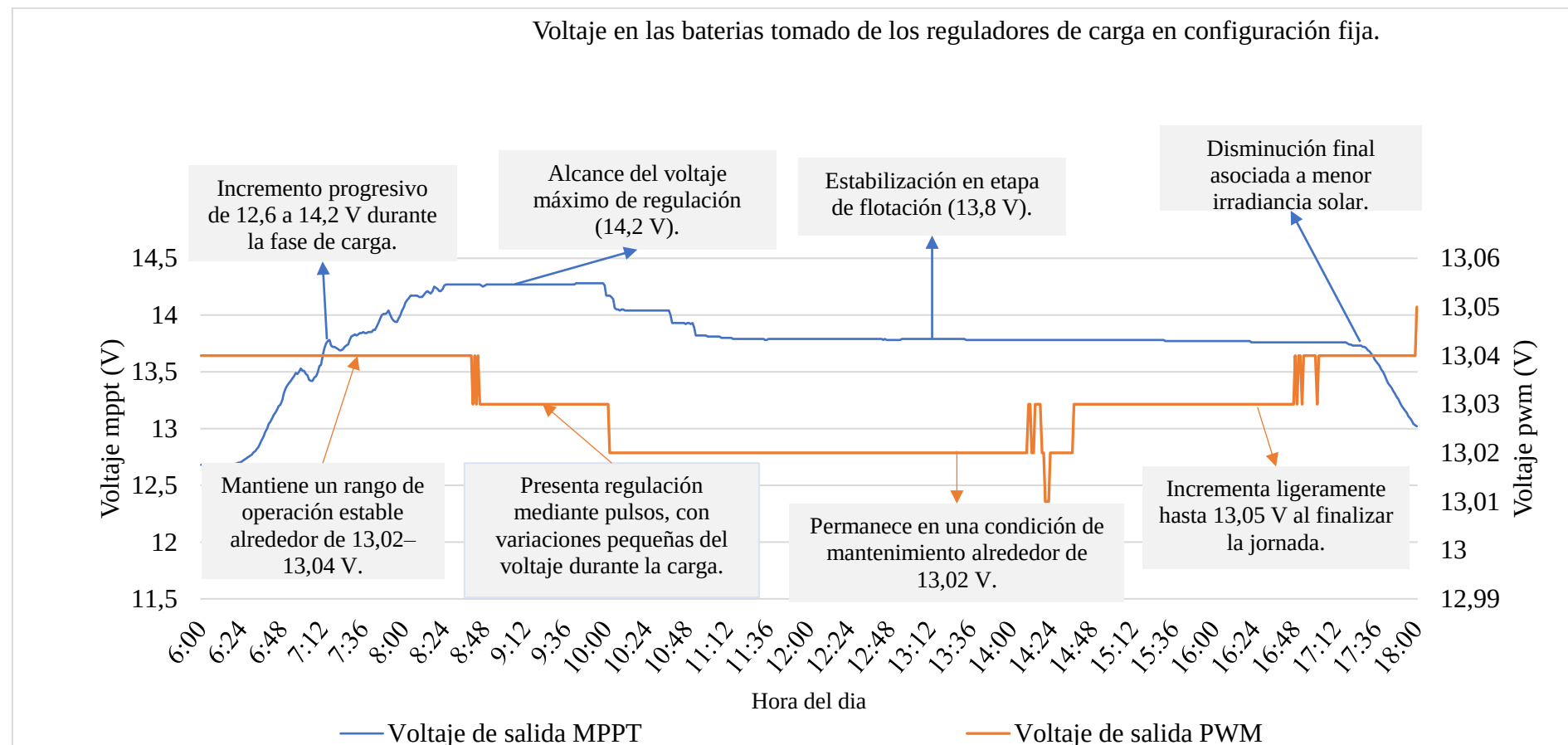


Figura 27. Estados de carga de los reguladores MPPT y PWM

5.2.7. Interpretación comparativa

En la Figura 27 se evidencia diferentes estrategias de control, en consecuencia, las gráficas reflejan dos estrategias distintas las cuales son, el MPPT favorece una recuperación progresiva del estado de carga, mientras que el PWM mantiene la batería dentro de un intervalo de voltaje estrecho mediante regulación pulsada.

5.3.Caso C2: seguimiento solar de un eje (Móvil) con los reguladores MPPT y PWM.

Mediante la recopilación de datos durante un periodo de tres días, se obtuvieron registros correspondientes al funcionamiento del regulador MPPT y PWM. La información recolectada permitió analizar su comportamiento eléctrico, evaluar su desempeño operativo y establecer una comparación técnica entre los voltajes de salida de cada regulador, este análisis se realizó los días 11,12 y 15 de junio del año 2026

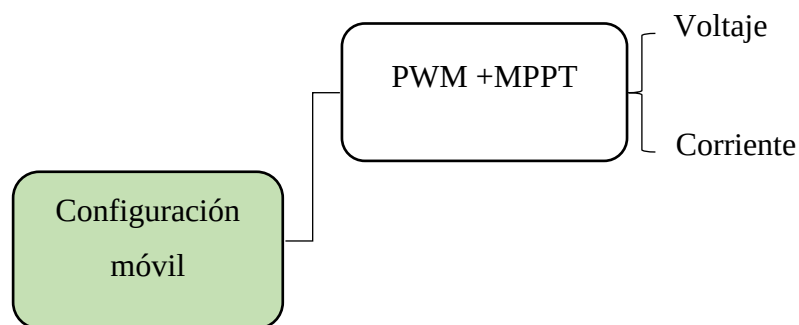


Figura 28. Comparación de los reguladores en configuración móvil

5.3.1. Caracterización de los ciclos de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador MPPT

Los valores fueron registrados y representados gráficamente en Microsoft Excel como se observa en la Figura 29.

Ciclo de carga solar en el regulador MPPT en configuración móvil

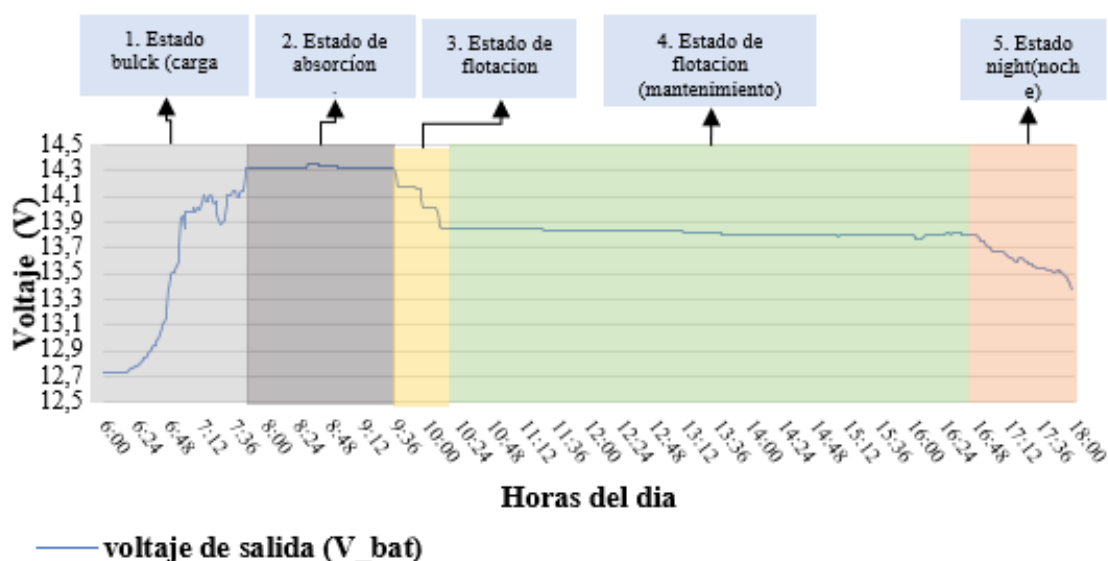


Figura 29. Análisis estados de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador MPPT

Análisis estados de carga MPPT

1. Durante la etapa Bulk, la batería inicia con bajo estado de carga incrementando progresivamente su tensión entre las 06:30 y 07:50 debido al aumento de irradiancia solar y su voltaje sube entre 12,7V a 14,3V en lo cual es el voltaje requerido para ingresar en la etapa de absorción.
2. En absorción alcanza el voltaje se mantiene en (14,30 - 14,35 V),
3. En el estado de flotación reduce el voltaje de 14,35 V a 13,76 V debido que la batería llegó al 100 % de la carga
4. Flotación de mantenimiento la tensión se mantiene estable entre 13,76 - 13,86 V para evitar sobrecarga.
5. Finalmente, ante la disminución de irradiancia, ingresa en modo noche con una reducción de voltaje hasta 13,38 V

5.3.2. Caracterización de los ciclos de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador PWM

Los valores fueron registrados y representados gráficamente en Microsoft Excel como se observa en la Figura 30.

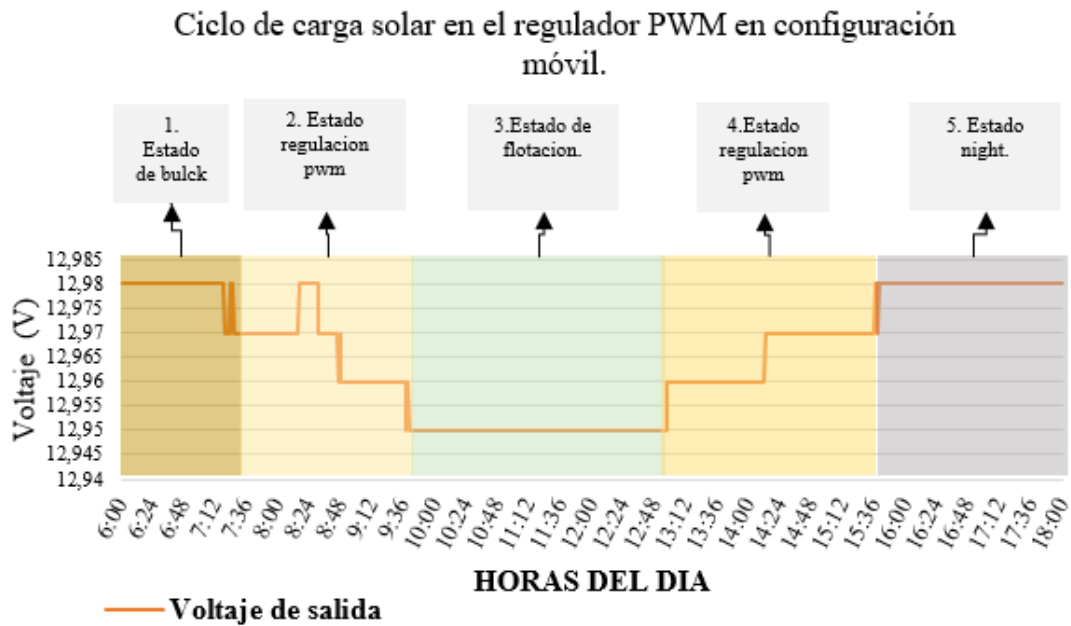


Figura 30. Análisis estados de carga y evaluación del comportamiento del banco y de baterías mediante el regulador PWM

Análisis estados de carga en el regulador PWM

1. **Estado Bulk:** la batería inicia con una tensión estable cercana a **12,98 V**, sin presentar una condición de descarga profunda.
2. **Regulación PWM:** el controlador ajusta la tensión de carga reduciéndola ligeramente hasta **12,96 V** mediante control de energía entregada.
3. **Estado de flotación:** la batería mantiene una tensión estable alrededor de **12,95 V** donde el regulador limita la corriente para conservar el nivel energético.
4. **Recuperación energética:** Se evidencia un incremento progresivo del voltaje hasta **12,97 V** asociado a variaciones en la disponibilidad de generación fotovoltaica.
5. **Estado Night:** Ante la disminución de irradiancia solar, el regulador finaliza la carga y mantiene la batería en reposo con una tensión cercana a **12,98 V**.

5.3.3. Voltaje de entrada y salida de los reguladores MPPT

La Figura 31 muestra el comportamiento del voltaje de entrada y salida del regulador MPPT en el sistema con seguimiento solar de un eje

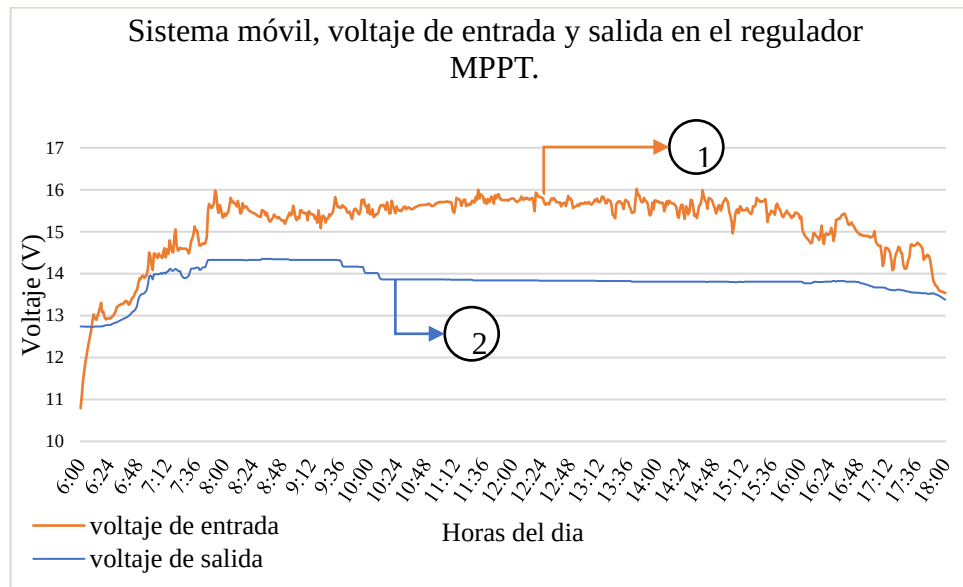


Figura 31. Análisis voltaje de entrada y salida el regulador MPPT

Análisis de los voltajes en el regulador MPPT

1. El voltaje de entrada (V_{pnl}) presenta un incremento asociado al aumento de irradiancia solar, estabilizándose alrededor de 15,5 V–16 V durante la generación fotovoltaica con ligeras variaciones por fluctuaciones de radiación.
2. El voltaje de batería (V_{bat}) mantiene una regulación estable cercana a 14 V durante la etapa de carga, reduciéndose posteriormente a aproximadamente 12 V al alcanzar el estado de carga completo y así evitar sobrecargas y preservando la vida útil del banco de baterías.

5.3.4. Voltaje de entrada y salida de los reguladores PWM

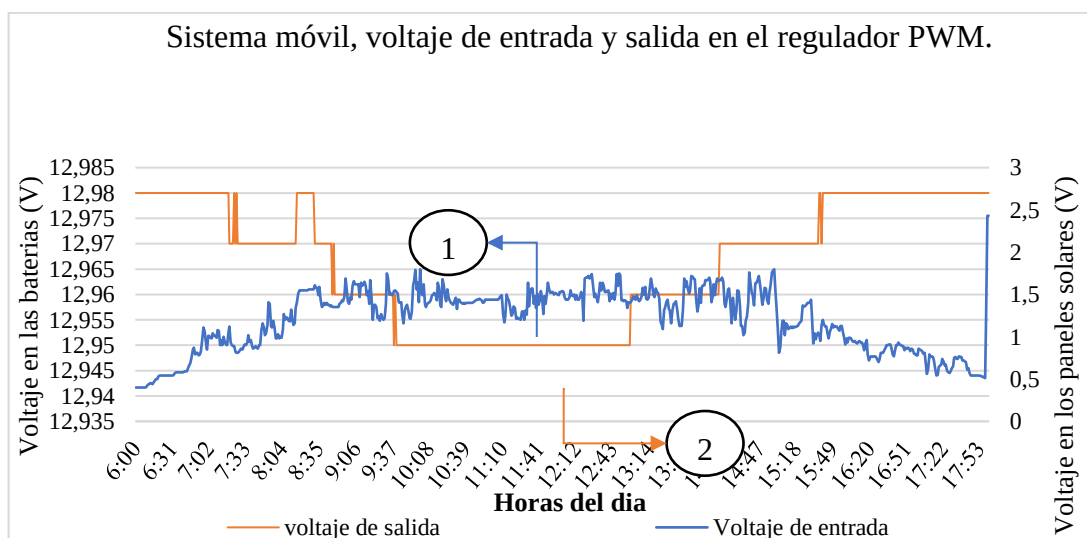


Figura 32. Voltajes de entrada y salida del regulador PWM

La Figura 32 muestra el comportamiento del **voltaje de entrada y salida del regulador PWM**.

1. El voltaje de entrada representada por la línea de color azul, presenta variaciones leves manteniéndose aproximadamente entre 12,94 V y 12,97 V, con un incremento durante las primeras horas y una mayor estabilidad alrededor del mediodía, al caer la noche se observa una ligera disminución hacia el final de la jornada.
2. El voltaje de salida representada por la línea color naranja, presenta cambios escalonados asociados a la variación de la energía suministrada por los paneles solares, el sistema mantiene un comportamiento estable evidenciando que el regulador PWM responde a las variaciones de generación solar mientras conserva el voltaje de la batería dentro de un rango reducido.

5.3.5. Corriente en la entrada y salida del regulador MPPT.

En la Figura 33 se indica las corrientes mediante el regulador

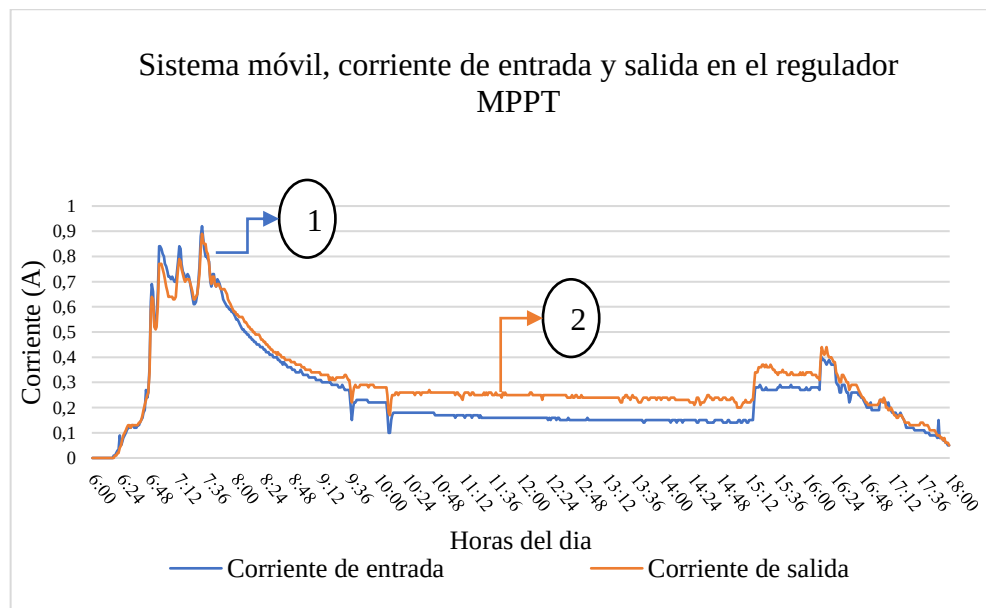


Figura 33. Análisis corriente de entrada y salida el regulador MPPT

Análisis de las corrientes en el regulador MPPT

1. La corriente de entrada (línea azul) corresponde a la generación fotovoltaica entregada al regulador, presenta su mayor aporte entre las 06:00 am y 07:35 am, disminuyendo progresivamente hasta estabilizarse en aproximadamente 0,22 A.
2. La corriente de salida (línea naranja) representa la corriente suministrada hacia el banco de baterías, manteniendo un comportamiento similar a la entrada, evidenciando el proceso de transferencia energética para la carga del sistema de almacenamiento.

5.3.6. Análisis comparativo del comportamiento del ciclo de carga de baterías mediante reguladores PWM y MPPT en sistemas fotovoltaicos aislados

El análisis comparativo para evaluar el comportamiento del ciclo de carga del banco de baterías utilizando ambas tecnologías de regulación, considerando parámetros eléctricos como el **voltaje de batería, corriente de carga, estados de carga y evolución temporal del proceso energético**. En la Figura 34 se presenta el voltaje en las baterías de los dos reguladores y como fueron el comportamiento de cada uno de ellos mediante el periodo de evaluación.

Voltaje en las baterías tomado de los reguladores de carga MPPT y PWM en configuración móvil.

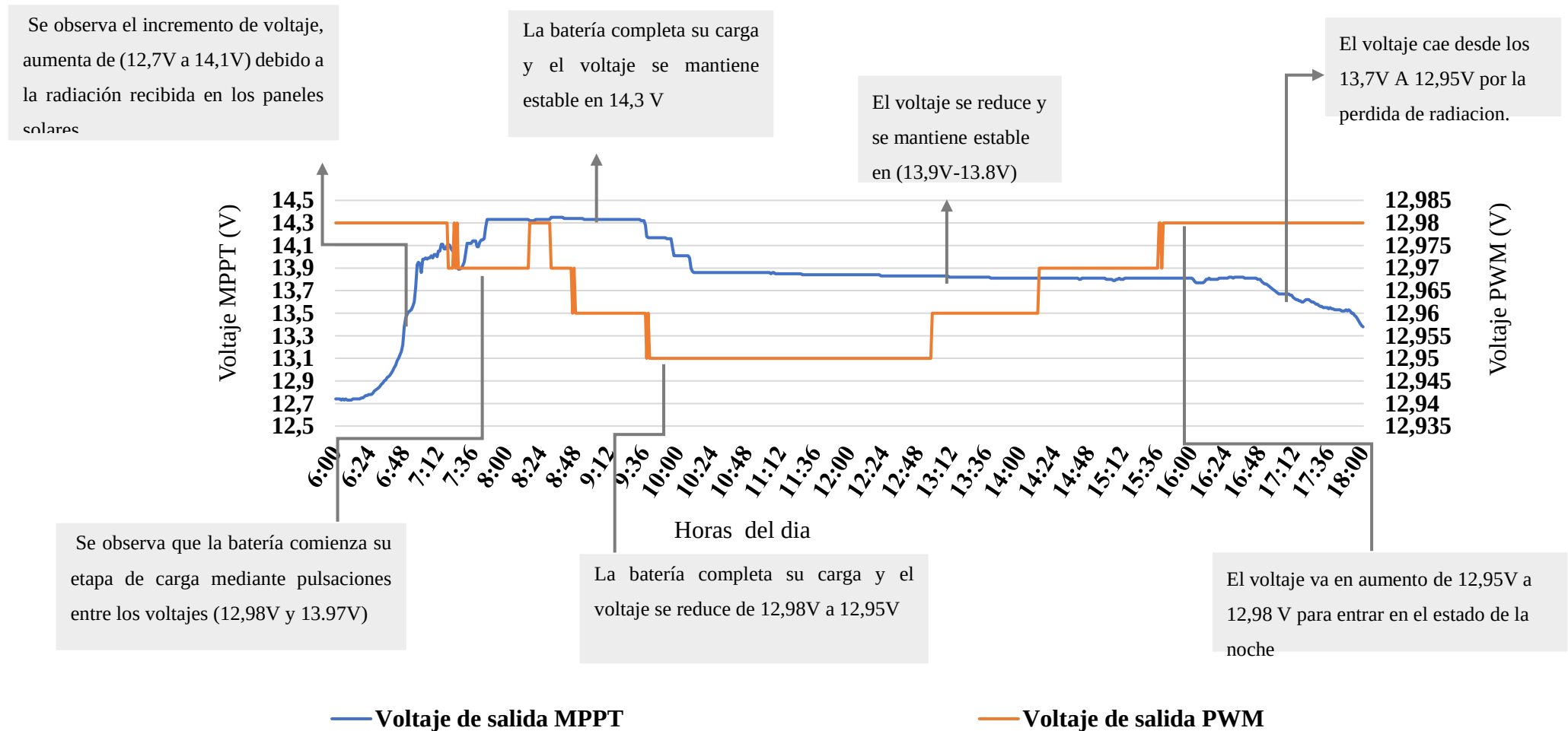


Figura 34. Comparación en los estados de carga de los reguladores MPPT y PWM

Interpretación comparativa

Para el caso analizado (C2), se determinó que el regulador con mayor eficiencia y mejor aprovechamiento del recurso energético disponible corresponde a la tecnología MPPT ya que aprovecha mejor la energía del sistema fotovoltaico con una salida de voltaje de 14.3 V debido a su capacidad de operar permanentemente en el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico. En el caso del PWM observamos que su voltaje es constante y se mantiene en 12,97V con una variación de 0,03 V.

5.4.Caso C3: Sistema fijo regulador MPPT+PWM+ CELDA en los días 7 al 9 de julio del año 2026 en un intervalo horario de 6:00 a 18:00h

En el periodo de tres días de evaluación, correspondientes del 7 al 9 de julio de 2026, se evaluaron los reguladores MPPT y PWM en sistema fijo del proyecto DIRGI-CP2021-008. Se registraron voltaje y corriente de entrada y salida para comparar la captación, conversión y regulación de la energía fotovoltaica.

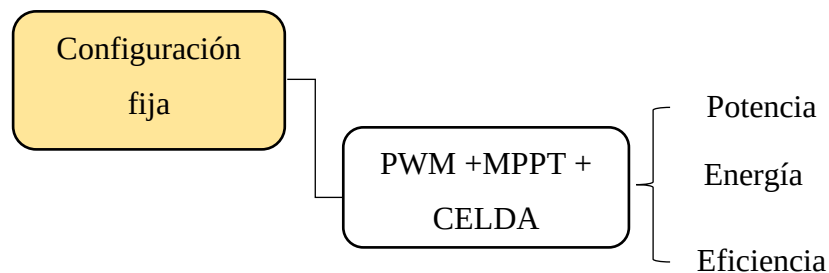


Figura 35. Comparación de los reguladores + celda en configuración fija

5.4.1. Potencia solar máxima disponible registrada por la celda DATASOL MET MPPT.

El sistema MPPT utiliza seis paneles de 160 W. Cada panel posee un área de 0,79 m², por lo que el área total de captación alcanza 4,74 m². La gráfica relaciona la potencia solar disponible con la potencia que el regulador entrega al banco de baterías.

La Figura 36 se muestra la comparación de las potencias en los reguladores MPPT.

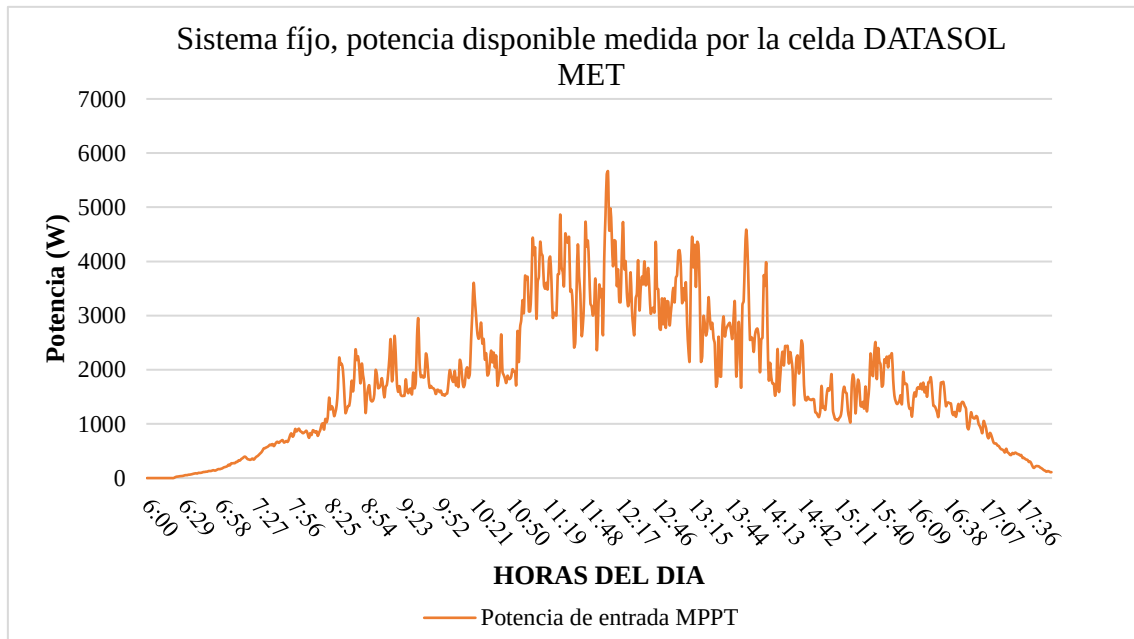


Figura 36. Análisis potencia de entrada MPPT.

La potencia solar de entrada calculada con la irradiancia registrada por la celda DATASOL MET. Esta aumenta desde las 06:00, alcanza un máximo cercano a 6500 W durante la mañana y luego disminuye conforme se reduce la radiación solar.

5.4.2. Potencia solar máxima disponible registrada por la celda DATASOL MET PWM.

El sistema PWM utiliza tres paneles de 160 W. Cada panel posee un área de 0,79 m², por lo que el área total de captación alcanza 2,37 m². La gráfica permite evaluar la relación entre la potencia solar disponible y la potencia que el regulador entrega al banco de baterías.

En la Figura 37 se representa las ondas de radiación solar y carga en la batería:

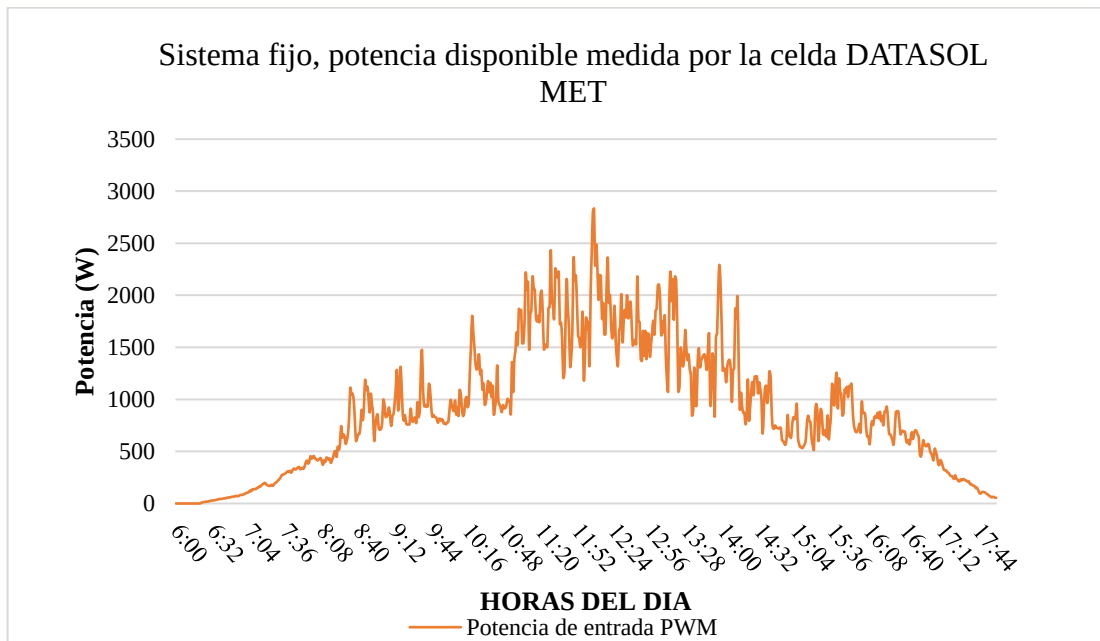


Figura 37. Potencia entrada y salida PWM

La potencia solar de entrada calculada con la irradiancia registrada por la celda DATASOL MET. Esta aumenta durante la mañana, alcanza valores cercanos a 3000 W y disminuye progresivamente conforme se reduce la radiación solar.

5.4.3. Evaluación del rendimiento energético del regulador de carga MPPT.

La Tabla 20 representa el rendimiento energético tomado en el punto máximo de potencia del regulador MPPT en configuración fijo. La potencia de entrada fue de 767,4849 W, mientras que la potencia de salida entregada por el regulador hacia las baterías alcanzó 708,7167 W. La energía de entrada fue de 5,0827, frente a una energía de salida de 4,6935, lo que representa una eficiencia de 92,34 %.

Tabla 20. Evaluación del rendimiento del regulador MPPT

POTENCIA ENTRADA	PONTECIA SALIDA
767,4849 W	708,7167 W
ENERGÍA DE ENTRADA	ENERGÍA DE SALIDA
5,08268146Wh	4,69348808Wh
EFICIENCIA	
92,34%	

La Figura 38 muestra la variación de la potencia durante el día. La línea azul representa la potencia de entrada desde la celda y la línea naranja, la potencia de salida entregada por el

regulador a las baterías. Ambas curvas aumentan durante la mañana hasta alcanzar un valor máximo cercano a 12 W; después disminuyen progresivamente y se mantienen alrededor de 3 W durante la tarde, hasta caer al finalizar la jornada. La diferencia entre las curvas refleja las pérdidas producidas durante la regulación.

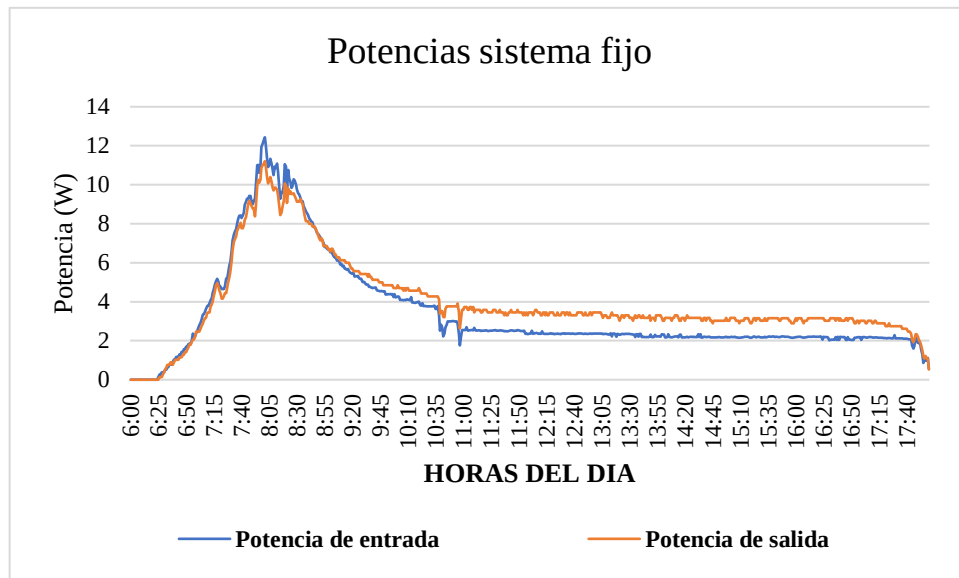


Figura 38. Desempeño entrada y salida en el regulador MPPT.

El sistema fijo presenta un buen desempeño energético. Aunque la potencia y la energía de salida son menores que las de entrada, el regulador conserva la mayor parte de la energía captada, con una eficiencia de 92,34 %. Además, la similitud entre las curvas demuestra que la salida responde de manera estable a las variaciones de la potencia.

Con respecto al regulador PWM no fue posible calcular su rendimiento energético ya que se registró una corriente de entrada nula. Esta circunstancia se origina porque la operación del regulador se encuentra condicionada por el banco de baterías motivo por el cual el valor de la corriente de entrada resultó ser cero.

5.5.Caso C4: Sistema con seguimiento solar de un eje en los reguladores MPPT y PWM en los días 7 al 9 de julio del año 2026 en un intervalo horario de 6:00 a 18:00h

Para este caso C4, se registraron las variables eléctricas de voltaje y corriente tanto en la entrada como en la salida de cada regulador. Los datos recopilados permitieron caracterizar su comportamiento eléctrico, evaluar su desempeño operativo y establecer una comparación técnica entre ambas tecnologías en términos de captación, conversión y regulación de la energía generada por el sistema fotovoltaico.

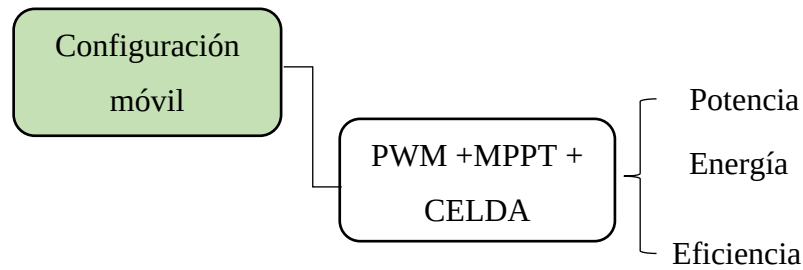


Figura 39. Comparación de los reguladores + celda en configuración móvil

5.5.1. Potencia solar máxima disponible medida en la celda DATASOL MET, MPPT.

El sistema MPPT con seguimiento solar de un eje utiliza seis paneles de 160 W, con un área total de captación de 4,74 m². La gráfica relaciona la potencia solar disponible con la potencia entregada por el regulador al banco de baterías.

En la Figura 40 se representa la potencia de entrada y salida.

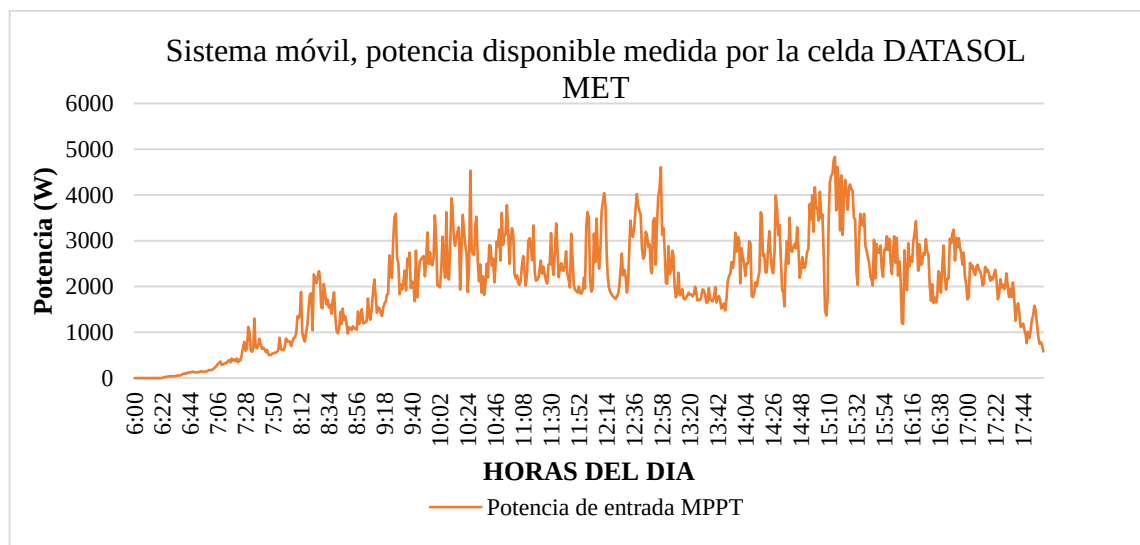


Figura 40. Potencia de entrada y salida del regulador MPPT.

La línea naranja: representa la potencia de entrada calculada con los registros de la celda DATASOL MET. Esta aumenta durante la mañana y alcanza valores cercanos a 4800 W. La captación se mantiene elevada durante la tarde debido al seguimiento de la trayectoria solar.

5.5.2. Potencia solar máxima disponible registrada por la celda DATASOL MET, PWM.

El sistema PWM utiliza seis paneles de 160 W. Cada panel tiene un área de 0,79 m², por lo que el área total de captación alcanza 2,37 m². La gráfica relaciona la potencia solar disponible con la potencia entregada por el regulador al banco de baterías.

En la Figura 41 se representa las ondas de radiación solar y carga en las baterías.

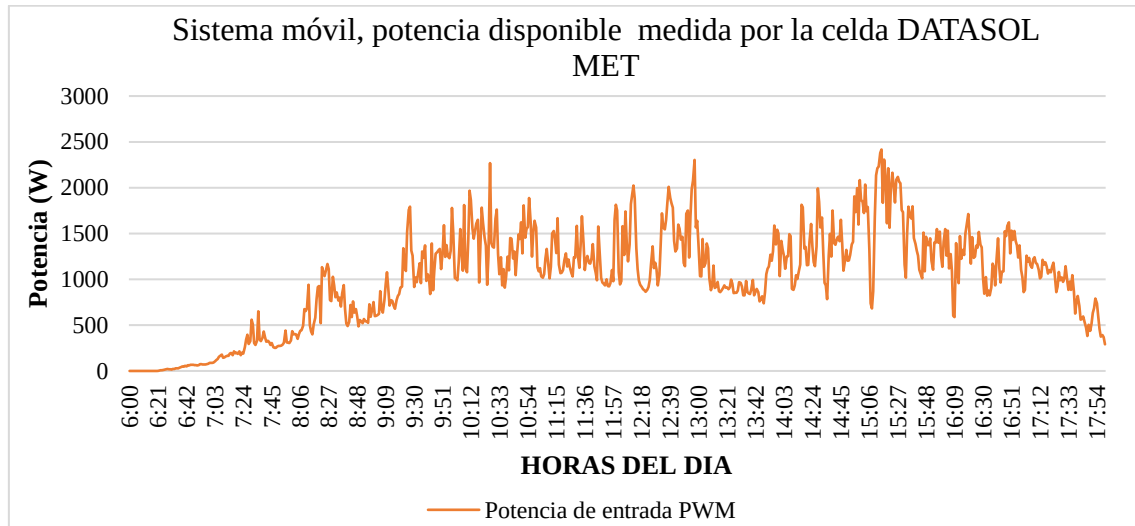


Figura 41. Potencia incidente en los paneles solares medidos por la celda Datasol Met.

La línea naranja: representa la potencia de entrada calculada con los datos de la celda DATASOL MET. Esta aumenta desde las primeras horas, presenta fluctuaciones durante el día y alcanza valores cercanos a 2400 W, debido a los cambios de irradiancia recibida por los paneles.

5.5.3. Evaluación del rendimiento energético del regulador de carga MPPT.

La Tabla 21 presenta el rendimiento energético del regulador MPPT tomado desde el punto máximo de potencia en la configuración móvil. Se tomó la potencia que alcanzó un valor de 1078,1455 W, mientras que la potencia de salida entregada por el regulador hacia las baterías fue de 1021,8395 W. Asimismo, la energía de entrada fue de 6,6966, frente a una energía de salida de 6,3468, obteniendo una eficiencia del 94,78 %.

Tabla 21 Evaluación del rendimiento del regulador MPPT.

POTENCIA ENTRADA	POTENCIA SALIDA
1078,1455	1021,8395
ENERGÍA DE ENTRADA	ENERGÍA DE SALIDA
6,6965559Wh	6,34682919Wh
EFICIENCIA	
94,77%	

La Figura 42 muestra que línea azul representa la potencia de entrada desde la celda y la línea naranja corresponde a la potencia de salida entregada por el regulador a las baterías. Durante la mañana, ambas curvas aumentan rápidamente y presentan variaciones, con valores máximos cercanos a 13 W. Después disminuyen y se mantienen relativamente estables durante el mediodía. En la tarde se observa un nuevo incremento cercano a 5 W, seguido de una reducción gradual hasta finalizar la medición.

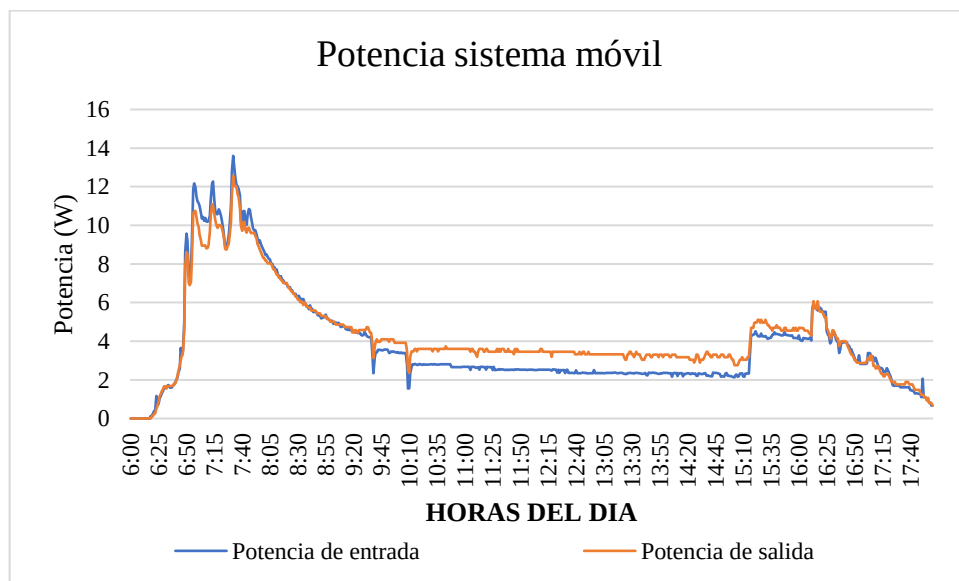


Figura 42. Desempeño entrada y salida en el regulador MPPT.

El sistema móvil alcanzó un buen desempeño energético. La cercanía entre las curvas de entrada y salida indica que el regulador transfirió la mayor parte de la energía captada hacia las baterías. Aunque se registraron pequeñas pérdidas durante el proceso de regulación, la eficiencia del **94,78 %** confirma un aprovechamiento adecuado de la energía producida por la celda fotovoltaica.

De la misma manera para el regulador PWM no fue posible calcular su rendimiento energético ya que se registró una corriente de entrada nula. Esta circunstancia se origina porque la operación del regulador se encuentra condicionada por el banco de baterías motivo por el cual el valor de la corriente de entrada resultó ser cero

6. Gastos de ejecución

Corresponde a la adquisición de equipos, materiales e insumos necesarios para la implementación del sistema experimental como se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22. Gastos correspondientes al desarrollo de proyecto de tesis.

Equipos/Materiales	Cantidad	Precio Unitario	Total
Panel solar monocristalino de 160W	12	\$ 50	\$ 600
Tornillo de $\frac{1}{2}$ pulgada	70	\$ 0,15	\$ 10,50
Platina de $\frac{1}{8}$	1	\$ 6,50	\$ 6,50
Envío de Courier	1	\$ 25	\$ 25
Total			\$ 642

6.1. Costos indirectos

Asociados a los recursos complementarios requeridos para el desarrollo y culminación del proyecto.

Tabla 23. Costos indirectos al desarrollo del proyecto.

DETALLE	TOTAL
Transporte	\$ 75
Alimentación	\$ 60
Total	\$ 135

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- La caracterización técnica permitió identificar los componentes, configuraciones y parámetros operativos del sistema fotovoltaico que se encontraban conformados por módulos solares, reguladores PWM y MPPT, bancos de baterías, estructuras fijas y móvil, inversor y celda Datasol MET. Esto nos permitió la selección de las variables eléctricas y para evaluar su desempeño energético.
- El sistema de adquisición implementado mediante comunicación Modbus TCP/IP, RS-485 y Node-RED permitió registrar continuamente el voltaje, la corriente, la potencia, la irradiancia y la temperatura. La coincidencia entre los datos registrados, los valores calculados y las mediciones directas confirmó la confiabilidad del sistema de monitoreo para el análisis experimental.
- En términos generales, se cumplió el objetivo de evaluar el desempeño energético de los reguladores PWM y MPPT bajo configuraciones fija y móvil. Los resultados demostraron que la combinación del regulador MPPT con seguimiento solar de un eje constituye la alternativa con mejor respuesta energética con valores de 14,2V y con un rendimiento de 94,77% dentro de las condiciones analizadas.

7.2.Recomendaciones

- Se recomienda utilizar reguladores MPPT en sistemas fotovoltaicos donde se requiera maximizar la captación y transferencia de energía, esto especialmente cuando existan variaciones de irradiancia o se empleen estructuras con seguimiento solar.
- Mantener operativo el sistema de monitoreo mediante Modbus y Node-RED, verificando periódicamente las direcciones de los registros, factores de escalamiento, conexiones, almacenamiento de datos y correspondencia con mediciones realizadas mediante instrumentos calibrados.
- Implementar un programa de mantenimiento preventivo que incluya limpieza de los módulos, revisión del mecanismo de seguimiento Y verificación de los reguladores y control periódico del estado de las baterías, con el propósito de conservar la confiabilidad y eficiencia del sistema.

8. REFERENCIAS

- [1] I. De Regil y F. Navarrete, «Energías renovables y cambio climático: desafío global y regional», Universidad del Valle de Atemajac, México, 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Navarrete-Baez/publication/400153302_Energias_renovables_y_cambio_climatico_desafio_global_y_regional/links/697a621a7247bc6473dbce8e/Energias-renovables-y-cambio-climatico-desafio-global-y-regional.pdf
- [2] P. A. España Martínez, «Estudio de la eficiencia de un controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para un sistema fotovoltaico OFF GRID», 2020.
- [3] L. M. Gómez Páez, W. E. Guacaneme Muñoz, A. F. Rodríguez Benavides, F. Santamaría Piedrahita, y C. L. Trujillo Rodríguez, «Design of a charge regulator for application in an isolated micro grid with photovoltaic generation», *Sci. Tech.*, vol. 23, n.º 2, pp. 143-150, jun. 2018, doi: 10.22517/23447214.18081.
- [4] Morningstar Corporation, «Manual del usuario de TriStar MPPT». 2016, marzo de 2010. [En línea]. Disponible en: www.morningstarcorp.com
- [5] M. Ávila, E. Flores, J. Cobos, y M. Álvarez, «Sistemas fotovoltaicos en sectores del ecuador con difícil acceso y/o desprovistos de servicio eléctrico: un estudio desde las experiencias latinoamericanas.», *Scopus*, vol. Vol. 21, n.º Num. 2, pp. 1-16, dic. 2023.

- [6] A. F. Serna Ruiz, E. J. Marín García, y S. L. Alzate Plaza, «Herramienta para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos aislados», *Lámpsakos*, vol. 1, n.º 16, p. 61, dic. 2016, doi: 10.21501/21454086.1936.
- [7] V. Mosquera y F. Daniel, «Estudio e implementación de un sistema fotovoltaico aplicado a luminarias: caso de estudio Unidad educativa Dr. Francisco Falquez Ampuero».
- [8] J. S. Patiño Abella, J. S. Tello Reyes, y J. A. Hernández Mora, «Desarrollo de un regulador de carga para sistemas fotovoltaicos aplicando instrumentación virtual», *Ingeniería*, vol. 14, n.º 2, pp. 13-18.
- [9] L. F. Bustos Márquez, S. B. Sepúlveda Mora, D. Guevara Ibarra, y B. Medina Delgado, «Controlador de carga MPPT con método de estimación del estado de carga basado en conteo de amperios hora y voltaje a circuito abierto», *Ingeniería*, vol. 28, n.º 2, p. e18722, abr. 2023, doi: 10.14483/23448393.18722.
- [10] E. Ramírez, I. Mendoza, E. Torres, E. Serrano, y J. Serrano, «Banco de pruebas didáctico para aprendizaje y medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos.», vol. 20, Revista UIS Ingenierías, Colombia, pp. 1-9, 2 de enero de 2021.
- [11] C. L. Cortés Cortés, G. S. Gómez Gómez, F. Betancur Londoño, S. X. Carvajal Quintero, y N. Guerrero González, «Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con micro inversores: caso de estudio Manizales», *TecnoLógicas*, vol. 23, n.º 47, pp. 1-21, ene. 2020, doi: 10.22430/22565337.1403.
- [12] L. B. Lara Atiaja y J. M. Vega Tigasi, «Control de cargas dc prioritarias con regulador PWM en modo "load control" y supervisión energética de una Microred fotovoltaica aislada», 2025.
- [13] P. Díaz, «Confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos: aplicación a la electrificación rural.», Universidad Politécnica De Madrid, España, 2003. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Diaz-20/publication/39425082_Confiabilidad_de_los_sistemas_fotovoltaicos_autonomos_Aplicacion_a_la_electrificacion_rural/links/02e7e52b2c932b22cf000000/Confiabilidad-de-los-sistemas-fotovoltaicos-autonomos-Aplicacion-a-la-electrificacion-rural.pdf
- [14] D. Mejía, I. Torres, y J. Díaz, «Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos», *Redalyc*, vol. V.12, n.º No. 45, El Hombre y la Máquina, Cali, Colombia, pp. 1-13, diciembre de 2014.

- [15] MORNINGSTAR, «Manual de instalación y operación», 2016. [En línea]. Disponible en: www.morningstarcorp.com
- [16] Morningstar Corporation, «TriStar MODBUS Specification». 31 de junio de 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.morningstarcorp.com>
- [17] J. M. Nieblas Manríquez, L. K. Pacheco Alvarado, H. C. Piña Alcántara, A. E. Cervantes Martínez, y J. Olguin Camacho, «Node-RED: Una Herramienta de Acceso Libre para el Control de Velocidad en Motores Trifásicos», *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.*, vol. 7, n.º 6, pp. 5009-5221, ene. 2024, doi: 10.37811/cl_rcm. v7i6.9076.
- [18] J. Carhuapoma y J. Cayatopa, «Análisis comparativo de eficiencia energética de panel fotovoltaico fijo respecto a otro con seguidor solar», Universidad Nacional De Jaén, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unj.edu.pe/items/c6507e8f-8b65-4423-8a4f-b13fe9e5edc0>
- [19] M. Bordón, «Estudio y análisis de un regulador de carga de baterías.», Universidad Carlos III De Madrid, España-Madrid, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/entities/publication/c23c8c64-f1c6-4197-a9f1-6af57491e711>
- [20] S. Ruminto, H. Hadiani, y A. Ardaneshwara, «Optimisasi SCADA di MPS dengan FINS UDP vs Modbus TCP via Node-RED», vol. Volume 13, *The Indonesian Journal of Computer Science*, Indonesia, pp. 1-17, agosto de 2024.

9. ANEXOS

Los anexos reúnen la documentación técnica y complementaria que respalda la investigación. Se incluye la factura de compra de los módulos fotovoltaicos, que acredita su adquisición y procedencia; los planos eléctricos del sistema aislado y de las configuraciones asociadas a los reguladores PWM y MPPT, los manuales técnicos de los registros Modbus empleados para obtener y convertir las variables eléctricas; y las evidencias fotográficas de las mediciones realizadas con el multímetro digital y el equipo Fluke IRR1-SOL. También se presenta la programación desarrollada en Node-RED para adquirir, procesar y almacenar los datos experimentales. En conjunto, esta documentación permite verificar los equipos, la configuración eléctrica, la instrumentación y el procedimiento aplicado durante la evaluación energética.

Anexo A: Factura de adquisición de los módulos fotovoltaicos.



HERNANDEZ BOSMEDIANO PATRICIA LIZETH
LIDERTEC SOLUTIONS

Dirección Matriz: GEOVANNY CALLES OE6-245 Y CONCORDIA
Dirección Establecimiento: GEOVANNY CALLES OE6-245 Y CONCORDIA
Contribuyente Especial Nro:
OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD: NO
CONTRIBUYENTE RÉGIMEN RIMPE

R.U.C.: 1753867207001

FACTURA

No. 001-100-000000263
NÚMERO DE AUTORIZACIÓN
2804202601175386720700120011000000002631234567815
FECHA DE AUTORIZACIÓN
28/04/2026 09:17:17

AMBIENTE: PRODUCCION
EMISIÓN: NORMAL

CLAVE DE ACCESO



2804202601175386720700120011000000002631234567815

Razón Social / Nombres y Apellidos: Carlos Javier Sangoquiza Pilatasig Guía Remisión:

Fecha Emisión: 28/04/2026 Identificación: 0504044033

Cod. Principal	Cod. Auxiliar	Descripción	Cant	Precio Unitario	Descuento	Total Sin Impuestos
NERM160-8160	PANEL SOLAR MONO PERC160W	PANEL SOLAR MONO PERC 160W	12.00	50.0000	0.00	600.00

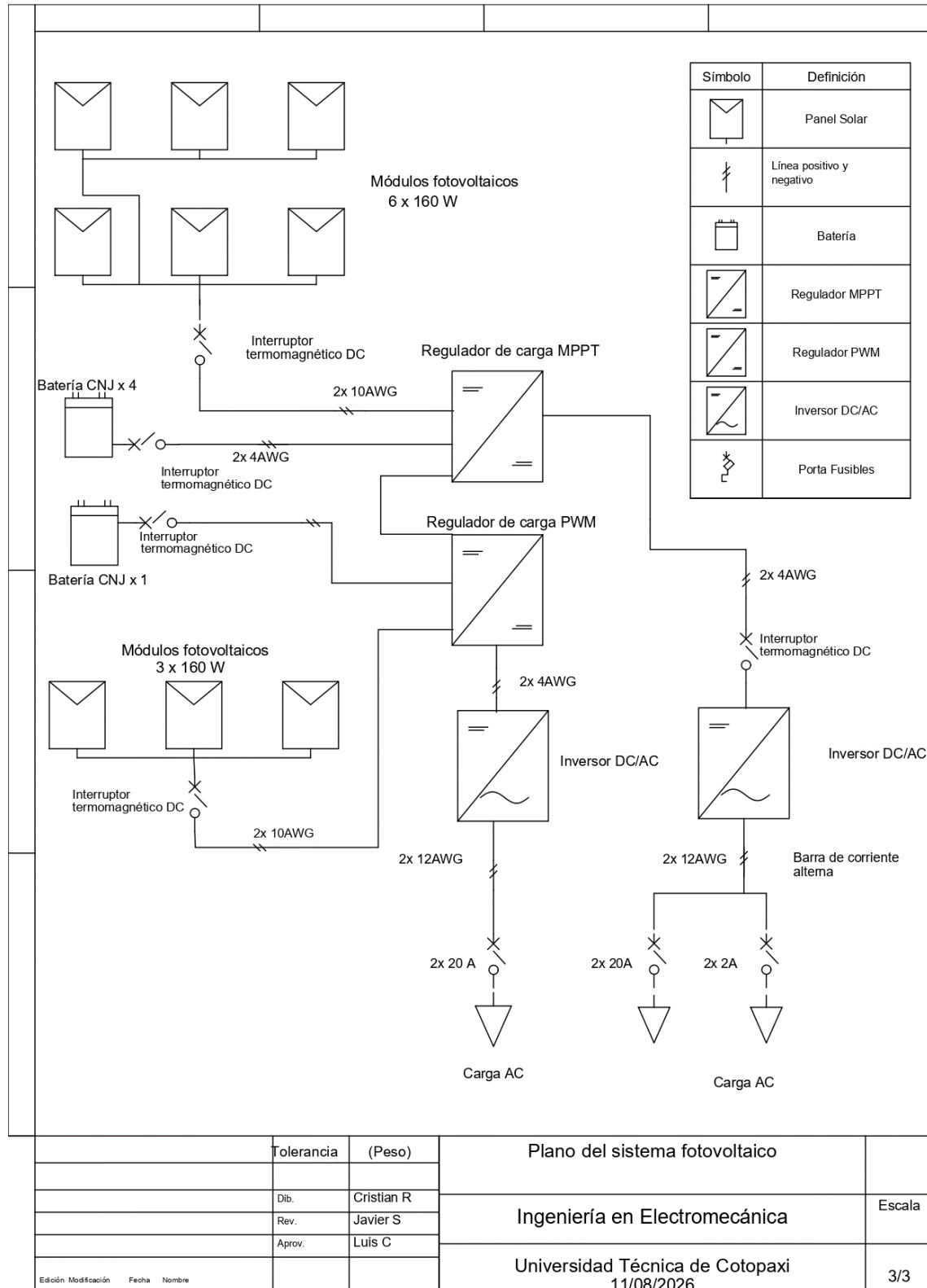
Información Adicional

Teléfono: 0987801036
Email: javiersangoquiza120@gmail.com

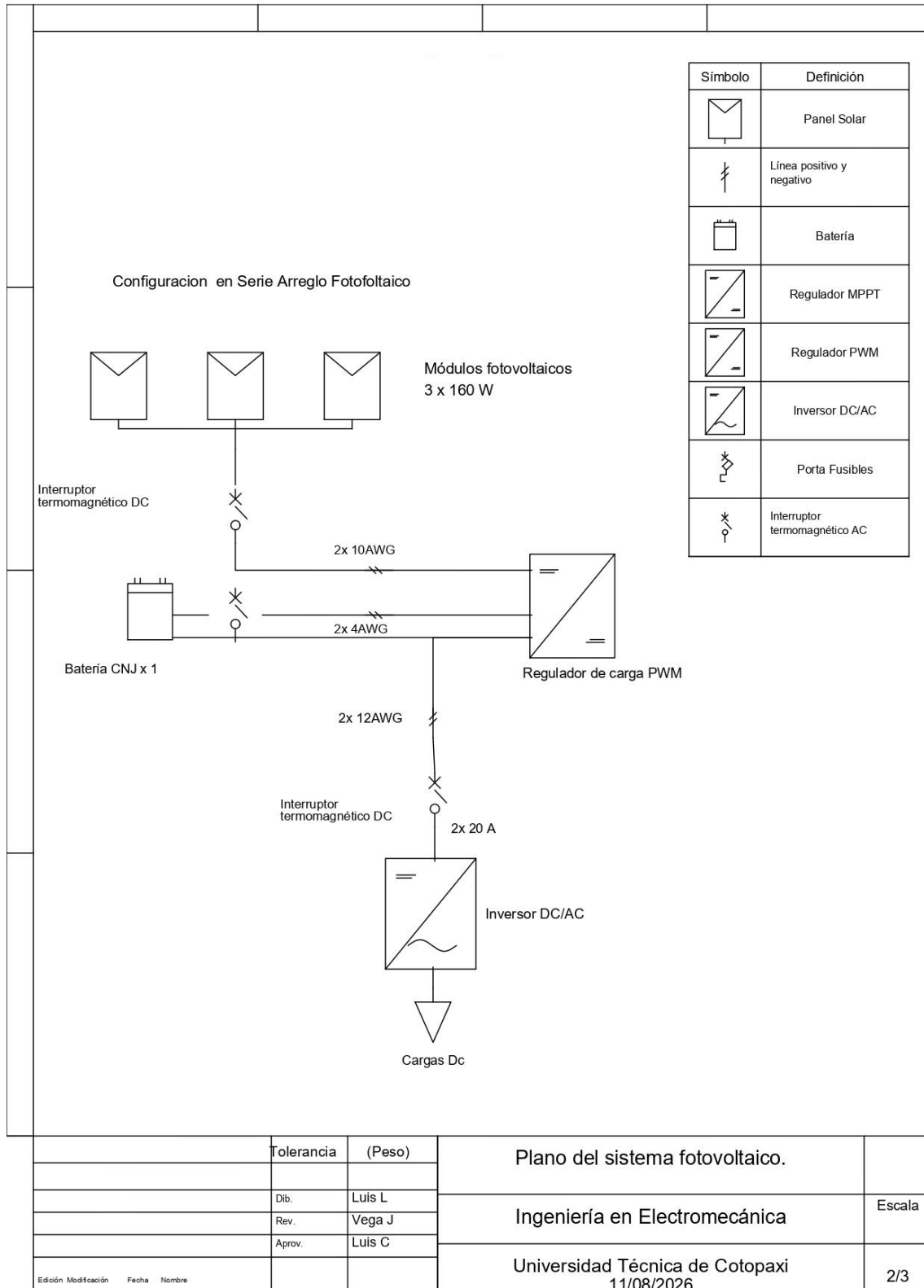
SUBTOTAL 15%	0.00
SUBTOTAL 5%	0.00
SUBTOTAL 0%	600.00
SUBTOTAL no objeto de	0.00
SUBTOTAL exento de IVA	0.00
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS	600.00
TOTAL Descuento	0.00
IVA 15%	0.00
IVA 5%	0.00
IMPORTE TOTAL	600.00

Forma Pago
SIN UTILIZACION DEL SISTEMA FINANCIERO

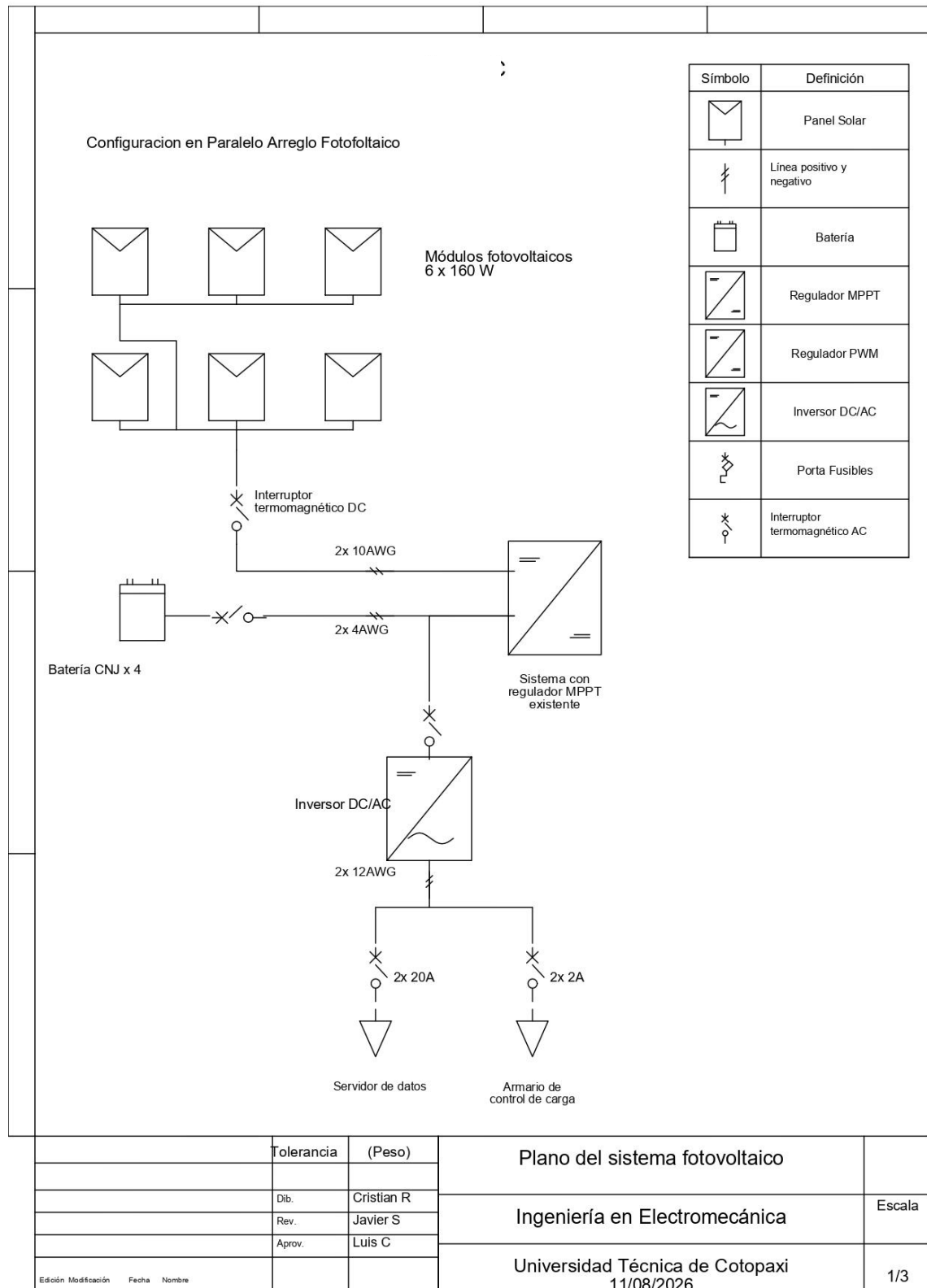
Valor
600.00



Anexo C: Plano del sistema fotovoltaico conectado al regulador PWM.



Anexo D: Plano del sistema fotovoltaico conectado al regulador MPPT.



Anexo E: Registros Modbus del regulador tomado de la pgn.3 del manual TriStar MPPT.

TriStar MPPT MODBUS Document

Supported MODBUS Functions

Read Holding Registers (0x03) and Read Input Registers (0x04)

RAM

PDU Addr	Log ical Addr	Variable name	Variable description	Units	Signed	Scaling or Range	WS	SNMP	
Scaling Values									
0x0000	1	V_PU hi	Voltage scaling, whole term	V		-			
0x0001	2	V_PU lo	Voltage scaling, fractional term	-		-			
0x0002	3	I_PU hi	Current scaling, whole term	A		-			
0x0003	4	I_PU lo	Current scaling, fractional term	-		-			
0x0004	5	ver_sw	Software Version	-		-			
0x0005 - 0x0017	6-9	RESERVED							
Filtered ADC									
0x0018	25	adc_vb_f_med	Battery voltage, filtered ($\tau \approx ?s$)	V	√	$n \cdot V_{PU} \cdot 2^{-15}$			
0x0019	26	adc_vbterm_f	Batt. Terminal voltage, filtered ($\tau \approx ?s$)	V	√	$n \cdot V_{PU} \cdot 2^{-15}$			
0x001A	27	adc_vbs_f	Battery Sense voltage, filtered ($\tau \approx ?s$)	V	√	$n \cdot V_{PU} \cdot 2^{-15}$			
0x001B	28	adc_va_f	Array voltage, filtered ($\tau \approx ?s$)	V	√	$n \cdot V_{PU} \cdot 2^{-15}$	D		
0x001C	29	adc_ib_f_shadow	Battery current, filtered ($\tau \approx ?s$)	A	√	$n \cdot I_{PU} \cdot 2^{-15}$			
0x001D	30	adc_ia_f_shadow	Array current, filtered ($\tau \approx ?s$)	A	√	$n \cdot I_{PU} \cdot 2^{-15}$			
0x001E	31	adc_p12_f	12 volt supply, filtered ($\tau \approx ?s$)	V	√	$n \cdot 18.612 \cdot 2^{-15}$	D		
0x001F	32	adc_p3_f	3 volt supply, filtered ($\tau \approx ?s$)	V	√	$6.6 \cdot 2^{-15}$			
0x0020	33	adc_pmeter_f	MeterBus voltage, filtered ($\tau \approx ?s$)	V	√	$n \cdot 18.612 \cdot 2^{-15}$			
0x0021	34	adc_p18_f	1.8 volt supply, filtered ($\tau \approx ?s$)	V	√	$n \cdot 3 \cdot 2^{-15}$			
0x0022	35	adc_v_ref	reference voltage	V	√	$n \cdot 3 \cdot 2^{-15}$			
Temperatures									
0x0023	36	T_hs	Heatsink temperature	C	√	-127 to +127	D		
0x0024	37	T_rts	RTS temperature (0x80 = disconnect)	C	√	-127 to +127			
0x0025	38	T_batt	Battery regulation temperature	C	√	-127 to +127	D		
Status									

<http://www.morningstarcorp.com>

3/29

MS-002582 v11

Anexos F: Registros Modbus del regulador tomado de la pgn.4 TriStar PWM.

TriStar MODBUS Specification

V 07

Supported Modbus Functions

Read Holding Registers (0x03) and Read Input Registers (0x04)

RAM

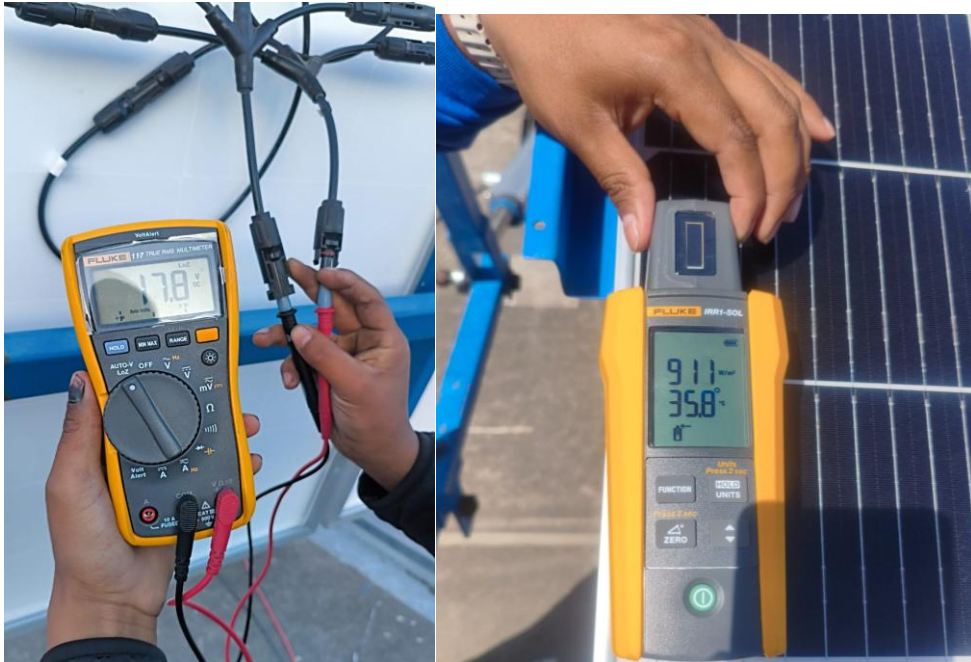
PDU Addr	Logical Addr	Variable name	Variable description	Units	Scaling or Range	WS	SNMP
0x0000	1		Internal Use				
0x0001	2		Internal Use				
0x0002	3		Internal Use				
0x0003	4		Internal Use				
0x0004	5		Internal Use				
0x0005	6		Internal Use				
0x0006	7		Internal Use				
0x0007	8		Internal Use				
0x0008	9	adc_vb_f	Battery voltage, filtered ($\tau \approx 2.5s$)	V	$n \cdot 96.667 \cdot 2^{-15}$	D	
0x0009	10	adc_vs_f	Battery sense voltage, filtered ($\tau \approx 2.5s$)	V	$n \cdot 96.667 \cdot 2^{-15}$		
0x000A	11	adc_vx_f	Array/Load voltage, filtered ($\tau \approx 2.5s$)	V	$n \cdot 139.15 \cdot 2^{-15}$	D	
0x000B	12	adc_ipv_f	Charging current, filtered ($\tau \approx 2.5s$)	A	$n \cdot 66.667 \cdot 2^{-15}$	D	
0x000C	13	adc_iloa_f	Load current, filtered ($\tau \approx 2.5s$)	A	$n \cdot 316.67 \cdot 2^{-15}$		
0x000D	14	Vb_f	Battery voltage, slow filter ($\tau \approx 2.5s$)	V	$n \cdot 96.667 \cdot 2^{-15}$		
0x000E	15	T_hs	Heatsink temperature	°C	-128 to +127	D	
0x000F	16	T_batt	Battery temperature (RTS connected) (0x80 if not connected)	°C	-128 to +127	D	
0x0010	17	V_ref	Charge regulator reference voltage	V	$n \cdot 96.667 \cdot 2^{-15}$	D	
0x0011	18	Ah_r_HI	Ah resetable, HI word	Ah	n·0.1	D	
0x0012	19	Ah_r_LO	Ah resetable, LO word	-		D	
0x0013	20	Ah_t_HI	Ah total, HI word	Ah	n·0.1		
0x0014	21	Ah_t_LO	Ah total, LO word	-			
0x0015	22	hourmeter_HI	hourmeter, HI word	h	0 to $(2^{24}-1)$		
0x0016	23	hourmeter_LO	hourmeter, LO word	-			
0x0017	24	Alarm_LO	alarm bitfield	-		D	
0x0018	25	fault	fault bitfield	-			
0x0019	26	dip_switch	dip switch settings at power on switch[1..8] in bits[0..7]	-			
0x001A	27	control_mode	Control mode (0=charge, 1=load, 2=diversion)	-		D	
0x001B	28	control_state	Control state	-		D	
0x001C	29	d_filt	PWM Duty Cycle	-	0-255	D	
0x001D	30	Alarm_HI*	Alarm bitfield (continued from	-		D	

<http://www.morningstarcorp.com>

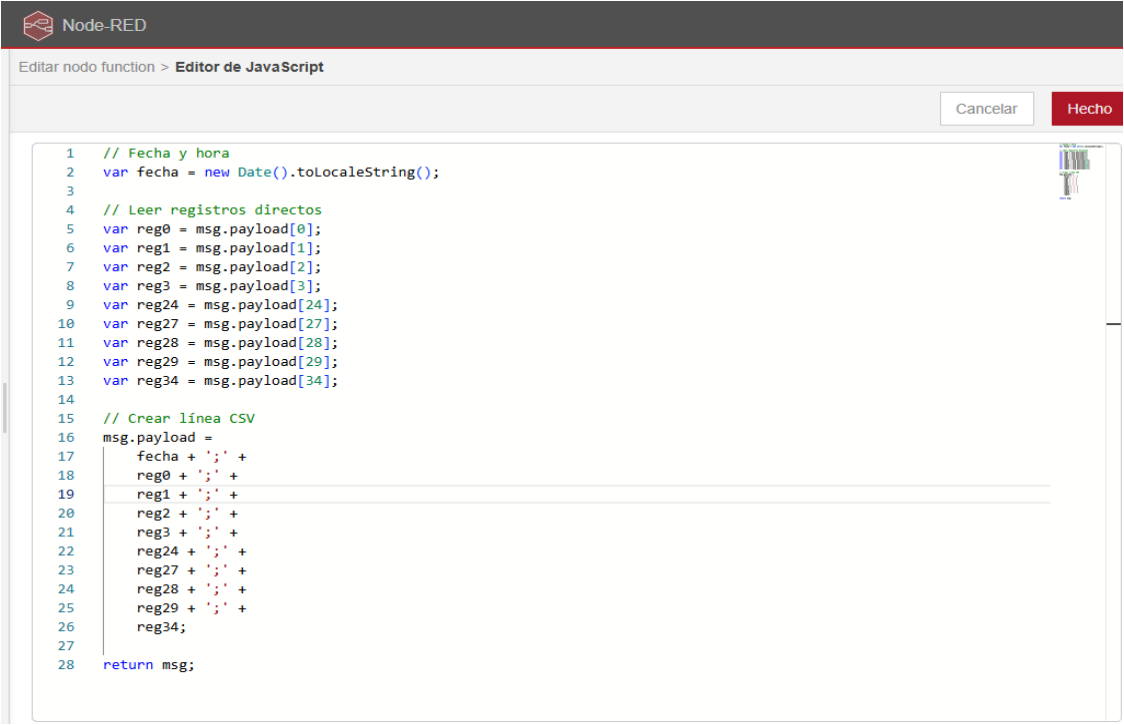
4/30

31 January 2020

Anexo G: Medición de voltaje de salida del panel y ángulo de inclinación equipo Fluke IRR1-SOL.



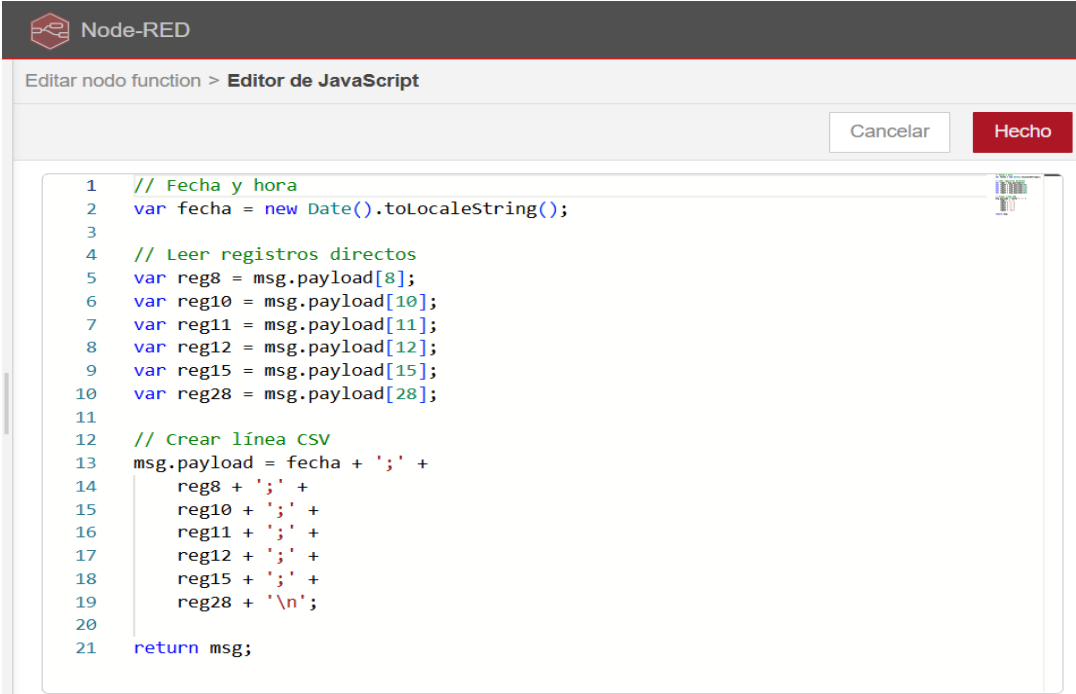
Anexo H: Programación del nodo Function en Node-RED para la adquisición y almacenamiento de registros Modbus del regulador MPPT.



```

1 // Fecha y hora
2 var fecha = new Date().toLocaleString();
3
4 // Leer registros directos
5 var reg0 = msg.payload[0];
6 var reg1 = msg.payload[1];
7 var reg2 = msg.payload[2];
8 var reg3 = msg.payload[3];
9 var reg24 = msg.payload[24];
10 var reg27 = msg.payload[27];
11 var reg28 = msg.payload[28];
12 var reg29 = msg.payload[29];
13 var reg34 = msg.payload[34];
14
15 // Crear línea CSV
16 msg.payload =
17   fecha + ';' +
18   reg0 + ';' +
19   reg1 + ';' +
20   reg2 + ';' +
21   reg3 + ';' +
22   reg24 + ';' +
23   reg27 + ';' +
24   reg28 + ';' +
25   reg29 + ';' +
26   reg34;
27
28 return msg;
  
```

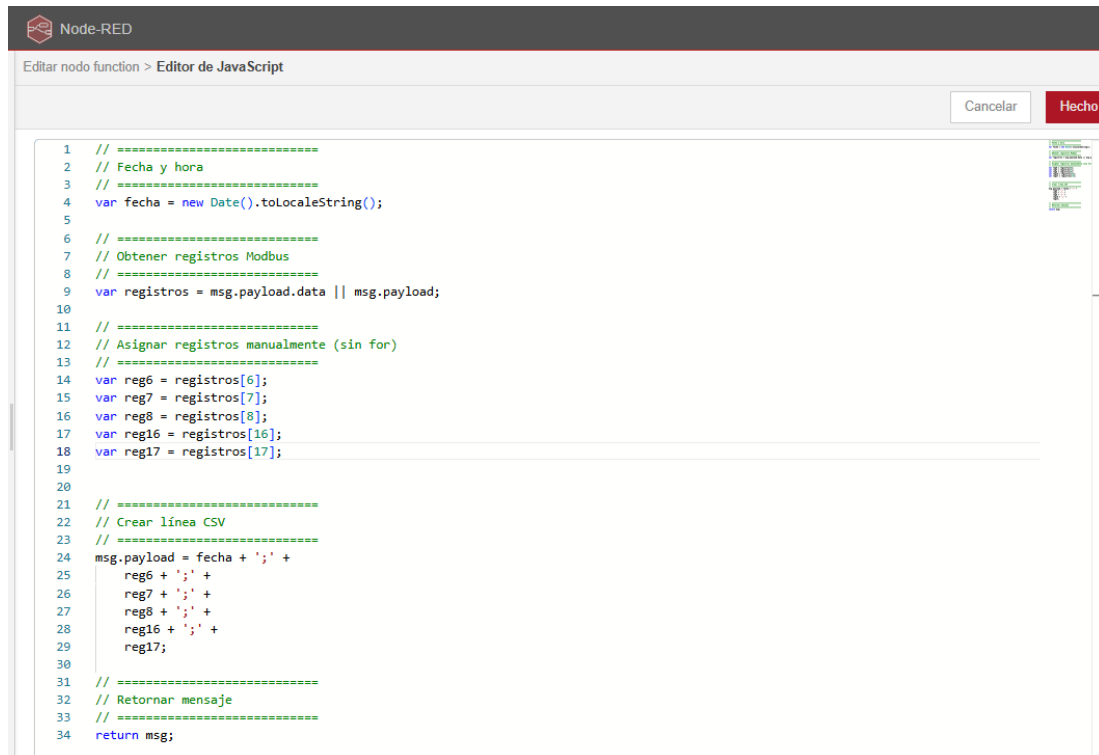
Anexo I: Programación del nodo Function en Node-RED para la adquisición y almacenamiento de registros Modbus del regulador PWM.



```

1 // Fecha y hora
2 var fecha = new Date().toLocaleString();
3
4 // Leer registros directos
5 var reg8 = msg.payload[8];
6 var reg10 = msg.payload[10];
7 var reg11 = msg.payload[11];
8 var reg12 = msg.payload[12];
9 var reg15 = msg.payload[15];
10 var reg28 = msg.payload[28];
11
12 // Crear línea CSV
13 msg.payload = fecha + ';' +
14   reg8 + ';' +
15   reg10 + ';' +
16   reg11 + ';' +
17   reg12 + ';' +
18   reg15 + ';' +
19   reg28 + '\n';
20
21 return msg;
  
```

Anexo J: Programación del nodo Function en Node-RED para la adquisición y almacenamiento de registros Modbus la celda DATASOL MET.



```

1 // =====
2 // Fecha y hora
3 // =====
4 var fecha = new Date().toLocaleString();
5
6 // =====
7 // Obtener registros Modbus
8 // =====
9 var registros = msg.payload.data || msg.payload;
10
11 // =====
12 // Asignar registros manualmente (sin for)
13 // =====
14 var reg6 = registros[6];
15 var reg7 = registros[7];
16 var reg8 = registros[8];
17 var reg16 = registros[16];
18 var reg17 = registros[17];
19
20
21 // =====
22 // Crear línea CSV
23 // =====
24 msg.payload = fecha + ';' +
25   reg6 + ';' +
26   reg7 + ';' +
27   reg8 + ';' +
28   reg16 + ';' +
29   reg17;
30
31 // =====
32 // Retornar mensaje
33 // =====
34 return msg;

```

Anexo K: Informe de similitud acreditado por la plataforma Turnitin.



Página 1 de 77 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::1:3628859074

Critian Remache

Tesis_Reguladores_V1

 Quick Submit

 Quick Submit

 Universidad Técnica De Cotopaxi

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3628859074

Fecha de entrega

17 ago 2026, 9:23 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

17 ago 2026, 9:51 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS_FINAL_RC_SC_v1.pdf

Tamaño del archivo

3.9 MB

73 páginas

13.549 palabras

73.070 caracteres



Página 1 de 77 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid::1:3628859074

Anexo L: Porcentaje similitud Turnitin.



Página 2 de 77 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3628859074

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 11 palabras)

Fuentes principales

- 6% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Página 2 de 77 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3628859074

