



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

PROPUESTA TECNOLÓGICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL
RENDIMIENTO DE REGULADORES DE CARGA MPPT Y PWM EN EL
SISTEMA FOTOVOLTAICO DEL PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA
DIRGI-CP2021-008**

Propuesta Tecnológica previo a la obtención del título de Ingeniero en
Electromecánica.

AUTORES:

Jhony Germán Ati Ganán
Efren Oswaldo Betancourt Burbano

TUTOR:

Ing. Cruz Panchi Luis Rolando Ms.C

LATACUNGA - ECUADOR

MARZO 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Ati Ganán Jhony Germán con cédula de ciudadanía N. 0604863746 y Betancourt Burbano Efren Oswaldo con cédula de ciudadanía N. 0550502322 declaramos ser autores del proyecto de titulación **“IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y EVALUACION DEL RENDIMIENTO DE REGULADORES DE CARGA MPPT Y PWM EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO DEL PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGETICA GIRGI-CP2021-008”**, siendo el Ing. Cruz Panchi Luis Rolando Ms.C, tutor del presente trabajo de titulación; 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 de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, marzo 2026

Ati Ganán Jhony Germán
CC.0604863746
AUTOR 1

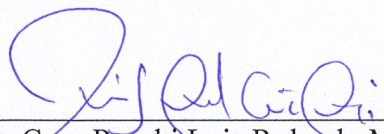
Betancourt Burbano Efren Oswaldo
CC.0550502322
AUTOR 2

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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

“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE REGULADORES DE CARGA MPPT Y PWM EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO DEL PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DIRGI-CP2021-008”, propuesto por el estudiante Ati Ganán Jhony Germán con cédula de ciudadanía N. 0604863746 y Betancourt Burbano Efren Oswaldo con cédula de ciudadanía N. 0550502322, de la Carrera de Electromecánica, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.

Latacunga, marzo 2026




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

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

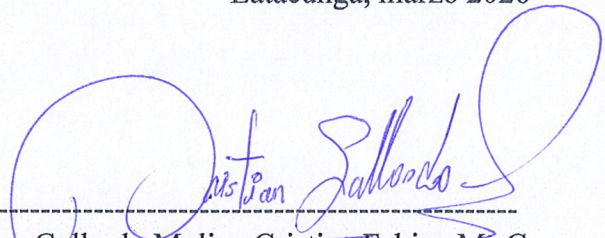
En calidad de lectores, aprueban el presente propuesta tecnológica de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitida por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Ati Ganán Jhony Germán con cédula de ciudadanía N. 0604863746 y Betancourt Burbano Efren Oswaldo con cédula de ciudadanía N. 0550502322, con el título de Proyecto de titulación: **“IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y EVALUACION DEL RENDIMIENTO DE REGULADORES DE CARGA MPPT Y PWM EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO DEL PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGETICA GIRGI-2021-008”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

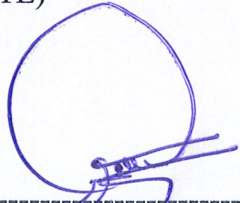
Latacunga, marzo 2026



Ing. Laurencio Alfonso Héctor Luis Ms.C
CC:1758367252
LECTOR 1 (PRESIDENTE)



Ing. Gallardo Molina Cristian Fabian Ms.C
CC:0502847692
LECTOR 2 (MIEMBRO)



Ing. Mauro Darío Albarracín Álvarez Ms.C
CC:0503113730
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por guiar mi camino y recordarme que sin su presencia habría sido difícil alcanzar esta meta.

Expreso también mi sincero agradecimiento a mis padres y a mis hermanos, quienes me brindaron su apoyo constante durante este proceso.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi por la formación brindada y por enseñarme que todo esfuerzo tiene su recompensa.

También a mis amigos y amigas por su motivación. A todos ellos,

¡Muchas Gracias!

Jhony Ati

DEDICATORIA

A mi madre Rosita Ganán, por ser mi mayor fuente de motivación y por enseñarme que, aunque en la vida existan muchos obstáculos que intenten hacernos rendir, la fe en Dios y la valentía nos hacen más fuertes.

Su esfuerzo, sus consejos y cada una de sus lágrimas forman parte de este logro y viven en estas páginas.

También dedico este trabajo a mi padre César Ati y a mis hermanos, Edwin y Victor, por su apoyo constante y por confiar siempre en que este sueño se haría realidad.

A mi hermosa y joven mujer, quien con su dulzura, alegría y amor ha sido una gran inspiración en mi camino.

Te dedico este logro como símbolo de los sueños que compartimos y del hermoso futuro que deseo construir a tu lado, lleno de felicidad, crecimiento y amor.

Jhony Ati

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por guiar cada paso de mi vida y permitirme culminar esta importante etapa académica.

A mis padres y familia, por su apoyo incondicional, sus consejos y por ser mi mayor motivación para alcanzar este logro.

De igual manera, agradezco a los docentes de la carrera, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias durante mi formación universitaria, contribuyendo significativamente a mi desarrollo académico y profesional.

Un agradecimiento especial a mi tutor de tesis, por su orientación, paciencia y apoyo durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de alguna manera colaboraron y aportaron para la realización de esta tesis.

Efren Betancourt

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de tesis principalmente a Dios, por brindarme la vida, la salud y la fortaleza necesaria para superar cada uno de los obstáculos presentados a lo largo de mi formación académica.

A mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y apoyo incondicional han sido el pilar fundamental en mi vida, motivándome siempre a seguir adelante y a no rendirme ante las dificultades.

A mi familia, por su comprensión, consejos y apoyo constante durante este proceso, quienes de una u otra manera contribuyeron para que hoy pueda alcanzar esta meta tan importante.

Finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que creyeron en mí y me brindaron su apoyo durante mi formación profesional.

Efren Betancourt

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y EVALUACION DEL RENDIMIENTO DE REGULADORES DE CARGA MPPT Y PWM EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO DEL PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGETICA GIRGI-CP2021-008”,

Autores:

Ati Ganan Jhony German

Betancourt Burbano Efren Oswaldo

RESUMEN

Los sistemas fotovoltaico aislados requieren dispositivos de control que permitan gestionar de manera mucho mas eficiente la energía generada por los módulos solares hacia los sistemas de almacenamiento. Entre los dispositivos mas utilizados se encuentran los reguladores PWM (Puse Width Modulation) y MPPT (Maximun Power Point Tracking), los cuales presentan diferencias en el principio de funcionamiento y en su eficiencia energética. Sin embargo, en muchas instalaciones no se dispone de estudios experimentales comparativos obtenidos en condiciones reales de operación que permitan evaluar su desempeño dentro de un mismo sistema fotovoltaico. El presente trabajo tuvo como objetivo implementar un sistema de monitoreo y evaluación del desempeño de reguladores de carga MPPT y PWM en el sistema fotovoltaico del proyecto de eficiencia energética DIRGI-CP2021-008 de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Para la adquisición y supervisión de datos se instaló un sistema de comunicación mediante un dispositivo MeterHub y una pantalla de monitoreo, estableciendo comunicación Ethernet con el regulador MPPT y comunicación RS-232 con el regulador PWM. Durante el periodo de pruebas se registraron variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia y energía tanto en la entrada fotovoltaica como en la salida hacia el banco de baterías, con intervalos de registro de un minuto. Los datos fueron procesados mediante hojas de cálculo aplicando el método de integración numérica del área bajo la curva de potencia para determinar la energía generada. Los resultados experimentales mostraron que el regulador MPPT registró una energía total de entrada desde el panel de 52,61 Wh, mientras que el regulador PWM alcanzó 30,22 Wh, obteniéndose un rendimiento energético aproximado del 74,07 %. Estos resultados evidencian un mayor aprovechamiento de la energía solar por parte del regulador MPPT, debido a su capacidad de seguimiento del punto de máxima potencia.

Palabras clave: Sistemas fotovoltaicos, regulador MPPT, regulador PWM, monitoreo energético, eficiencia.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

THEME: 'IMPLEMENTATION OF A SYSTEM FOR MONITORING AND EVALUATING THE PERFORMANCE OF MPPT AND PWM CHARGE REGULATORS IN THE PHOTOVOLTAIC SYSTEM OF THE GIRGI-CP2021-008 ENERGY EFFICIENCY PROJECT'.

Authors: Ati Ganan Jhony German

Betancourt Burbano Efren Oswaldo

ABSTRACT

Off-grid photovoltaic systems require control devices that allow for much more efficient management of the energy generated by solar modules to storage systems. Among the most commonly used devices are PWM (Pulse Width Modulation) and MPPT (Maximum Power Point Tracking) regulators, which differ in their operating principle and energy efficiency. However, in many installations, there are no comparative experimental studies obtained under real operating conditions that allow their performance to be evaluated within the same photovoltaic system. The objective of this work was to implement a system for monitoring and evaluating the performance of MPPT and PWM charge controllers in the photovoltaic system of the DIRGI-CP2021-008 energy efficiency project at the Technical University of Cotopaxi. For data acquisition and supervision, a communication system was installed using a MeterHub device and a monitoring screen, establishing Ethernet communication with the MPPT regulator and RS-232 communication with the PWM regulator. During the testing period, electrical variables such as voltage, current, power, and energy were recorded at both the photovoltaic input and the output to the battery bank, with recording intervals of one minute. The data were processed using spreadsheets, applying the numerical integration method of the area under the power curve to determine the energy generated. The experimental results showed that the MPPT regulator recorded a total input energy from the panel of 52.61 Wh, while the PWM regulator reached 30.22 Wh, obtaining an approximate energy yield of 74.07%. These results show greater use of solar energy by the MPPT regulator, due to its ability to track the maximum power point.

KEYWORDS: Photovoltaic systems, MPPT regulator, PWM regulator, energy monitoring, efficiency.



UNIVERSIDAD
TÉCNICA DE
COTOPAXI



CENTRO
DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del tema del proyecto de investigación cuyo título versa: **“IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y EVALUACION DEL RENDIMIENTO DE REGULADORES DE CARGA MPPT Y PWM EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO DEL PROYECTO DE EFICIENCIA ENERGETICA GIRGI-CP2021-008”**, presentado por: **Ati Ganan Jhony German y Betancourt Burbano Efren Oswaldo** egresados de la Carrera de Ingeniería Electromecánica perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas** lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, marzo de 2026

Atentamente,

MSc. Alison Mena Barthelotty

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

CI: 0501801252



CENTRO
DE IDIOMAS

ÍNDICE GENERAL

1 INFORMACIÓN GENERAL	1
2 INTRODUCCIÓN.....	2
2.1 Situación Problemática.....	3
2.2 Formulación del problema.....	4
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCION	4
2.3.1 Objeto de Investigación	4
2.3.2 Campo de Acción	4
2.3 BENEFICIARIOS	4
2.3.1 Beneficiarios Directos	4
2.3.2 Beneficiarios Indirectos.....	4
2.4 JUSTIFICACIÓN.....	5
2.5 OBJETIVOS.....	5
2.5.1 General	5
2.5.2 Específicos.....	6
2.5.3 SISTEMA DE TAREAS	6
3 MARCO TEÓRICO	8
3.1 Definición y Aplicación.....	8
3.2 Sistema Fotovoltaicos Aislados.....	9
3.3 Clasificación de los sistemas fotovoltaicos.	9
3.3.1 Componentes del sistema fotovoltaico.....	10
3.3.2 Generador fotovoltaico (panel solar).....	10
3.3.3 Regulador de carga	10
3.3.4 Funcionamiento del regulador de carga.....	11
3.3.5 Banco de baterías.....	12
3.3.6 Inversores	13
3.3.7 Sistema de Monitoreo.....	13

3.4 Reguladores de Carga en Sistemas Fotovoltaicos	14
3.4.1 Regulador PWM (Pulse With Modulation)	14
PWM es una técnica que controla la potencia enviada a una carga variando el ciclo de trabajo, señal periódica digital (ciclo de trabajo). Un ciclo de trabajo es una relación de tiempo, se activa la señal y el periodo total de la señal.	15
Etapas de trabajo en controladores PWM	15
3.4.2 Principio de Funcionamiento.....	15
3.4.4 Etapas de carga en un regulador PWM	16
3.4.5 Limitaciones Técnicas	16
3.5 Regulador MPPT (Máximo Power Point Tracking).....	16
3.5.1 Fundamento Matemático.	17
3.5.2 Convertidor DC-DC	17
3.5.3 Funciones de cada tipo de Convertidor	18
3.6 Algoritmos MPPT	18
3.6.1 Algoritmos MPPT: Método Perturbar y Observar (P&O).....	18
3.6.2 Interpretación Matemática.....	21
3.6.3 Características Técnica de un MPPT.....	23
3.6.4 Sistema de Monitoreo.....	24
3.6.5 Consideraciones prácticas para la selección del controlador MPPT.	24
3.6.6 Mejor Rendimiento del controlador MPPT.....	24
3.7 CUADRO COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE UN MPPT.	25
3.7.1 Comunicación en Serie.....	26
3.7.2 Comunicación en Paralela	27
3.7.3 El protocolo RS – 232	27
3.7.4 Estándares RS232	27
3.7.5 Puerto RS232.....	28
3.7.7 Opciones de Cableado	29
3.7.8 Seleccionando un cable RS232	29

3.8 RS -232 Pinout	30
3.8.1 Tipos de cables de comunicación: directo, cruzado y módem nulo	30
3.8.2 Cable directo (Ethernet).....	30
3.8.3 Cable cruzado (Ethernet)	31
3.8.4 Cable de módem nulo (RS-232)	32
3.8.5 Características técnicas del cable de módem nulo.....	32
3.8.6 Software de supervisión - MSView de Morningstar	33
4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	33
4.1 Declaración de Variables.....	34
4.1.1 Variable Independiente.....	34
4.1.2 Variable Dependiente.	34
4.2 Métodos de cálculo y procedimiento de datos.....	34
4.3 Variables del proceso.....	36
4.3.1 Variables de entrada.	36
4.3.2 Variables de salida.....	36
Funciones y ecuaciones del algoritmo MPPT – Método Perturb & Observe (P&O).....	39
4.4 Diagrama de metodología.....	41
4.5 Instrumentos, equipos y software utilizados.	41
4.5.1 Equipos e instrumentos.....	41
4.5.2 Software de monitoreo.	41
4.6 Implementación del sistema de monitoreo de datos.....	42
4.7 Integración del MeterHub y arquitectura de comunicación.	44
4.8 Configuración del sistema de recopilación de datos.	46
4.9 Metodología de pruebas experimentales	46
4.9.1 Prueba y adquisición de datos sin carga.	46
4.9.2 Pruebas de adquisición de datos con carga.....	46
4.10 Métodos de procesamiento y análisis de datos.....	48

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	48
5.1 Análisis de datos registrados por el sistema de monitoreo	49
5.1.1 Descripción general de los datos adquiridos	49
5.2 Criterios adoptados para el procesamiento de los datos	50
5.2.1 Limitaciones en el uso de la potencia directa registrada	50
5.2.2 Cálculo de potencia entrada y salida	50
5.3 Cálculo de la energía mediante el área bajo la curva	53
5.3.1 Método aplicado	54
5.3.2 Energía acumulada diaria	56
5.4 Análisis del rendimiento energético	57
5.5 Discusión de resultados	60
5.6 Síntesis del capítulo	62
5.7 Presupuesto referencial.....	62
5.7.1 Gastos de personal	63
5.7.2 Gastos de ejecución	63
5.7.3 Gastos de contratación de servicios.....	64
5.7.4 Gastos indirectos	64
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
6.1 Conclusiones.....	65
6.2 Recomendaciones	66
7 REFERENCIAS	67
8 ANEXOS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas Fotovoltaicos Aislados.....	9
Figura 2. Módulo Fotovoltaico.....	10
Figura 3. Esquema del regulador de carga.	11

Figura 4. Carga en 4 etapas: carga inicial, absorción, flotación y almacenamiento.....	11
Figura 5. Compensación de tensiones de absorción y potencia en función de la temperatura de la batería.	12
Figura 6. Compensación de la tensión de carga de la batería en función de su temperatura. ..	12
Figura 7. Banco de Baterías.....	13
Figura 8. Esquema en funcionamiento de un inversor solar.....	13
Figura 9. Resultado mostrados en datos por pantalla.	14
Figura 10. Regulador de carga PWM (Pulse With Modulation)	14
Figura 11. Valores de Señales por ancho de pulso.	15
Figura 12. Etapas en carga por el controlador PWM [10].....	16
Figura 13. Regulador de carga MPPT (Máximo Power Point Tracking).....	17
Figura 14. Algoritmo Completo MPPT [13].	19
Figura 15. Esquema básico de un sistema MPPT.....	22
Figura 16. Comportamiento eléctrico del sistema fotovoltaico mediante curvas I-V y P-V....	23
Figura 17. Mejor rendimiento del controlador MPPT.....	25
Figura 18. Comunicación Serial.	26
Figura 19. Comunicación en Serie.	27
Figura 20. Conexión en Paralelo.	27
Figura 21. Transmisión de Datos.....	28
Figura 22. Tabla de funciones del RS-232.	29
Figura 23. Diferencia de cable RJ45 y RS-232.	30
Figura 24. Cable directo con extremos similares.	31
Figura 25. Comparación de colores en las dos normas.	31
Figura 26. Cables Directos.	32
Figura 27. Cableado en un interfaz RS-232 en una conexión Sub-D9.....	32
Figura 28. Software MSView de Morningstar.	33

Figura 29. Esquema general del sistema fotovoltaico con reguladores MPPT y PWM.....	34
Figura 30. Curva de potencia en función del tiempo [18].	35
Figura 31. Cálculo de área bajo la curva.	35
Figura 32. Interfaz del software de monitoreo durante la adquisición de datos.	42
Figura 33. Diagrama de Metodología.....	43
Figura 34. Pantalla de monitoreo de datos instalada en el sistema fotovoltaico.	44
Figura 35. Esquema de comunicación del sistema de monitoreo mediante MeterHub.....	45
Figura 36. Configuración del registro automático de datos en el software de monitoreo.	46
Figura 37. Sistema solar durante la conexión de cargas eléctricas.....	47
Figura 38. Potencia de entrada y potencia de salida del regulador MPPT en función del tiempo.	51
Figura 39. Potencia de entrada y potencia de salida del regulador PWM.	53
Figura 40. Energía genera entre las 6 y 7 AM por el MPPT.	55
Figura 41. Energía generada entre las 6 y 7 AM por el PWM,	56
Figura 42. Comparación de energía diaria generada por los reguladores MPPT y PWM.	57
Figura 43. Comparación de energía diaria entrada por los reguladores MPPT y PWM.	57
Figura 44. Rendimiento del MPPT y PWM.	59
Figura 45. Comparación del rendimiento energético entre reguladores MPPT y PWM.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO	1
Tabla 2. Sistema de Tareas.	6
Tabla 3. Bloque de decisión para evaluación del sistema.	20
Tabla 4. Variables del sistema fotovoltaico para la evaluación y control del punto de operación.	21
Tabla 5. Criterio de evaluación del signo de dP/dV para la localización del MPPT.....	22
Tabla 6. Comparación de tecnologías fotovoltaicos con MPPT.	25

Tabla 7. Protocolos de comunicación utilizados por cada regulador.	45
Tabla 8. Descripción de las cargas conectadas durante las pruebas.	47
Tabla 9. Variables eléctricas registradas por los reguladores MPPT y PWM.	49
Tabla 10. Valores de tensión, corriente y potencia calculada del regulador MPPT.	51
Tabla 11. Valores de tensión, corriente y potencia del regulador PWM.	52
Tabla 12. Cálculo de energía por intervalo de tiempo.	54
Tabla 13. Energías totales diarias de entrada y salida de los reguladores MPPT y PWM.	56
Tabla 14. Rendimiento energético diario del regulador MPPT y PWM.	58
Tabla 15. Comparación económica y técnica.	61
Tabla 16. Gastos Personales	63
Tabla 17. Gastos Adquisición.	63
Tabla 18. Gastos de contratación de servicios.	64
Tabla 19. Gastos Indirectos.	64
Tabla 20. Presupuesto global del proyecto.	65

1 INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Implementación de un sistema de monitoreo y evaluación del rendimiento de reguladores de carga MPPT y PWM en el sistema fotovoltaico del proyecto de eficiencia energética DIRGI-CP2021-008.

Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas	x
Proyectos de Investigación	

Carrera: Electromecánica.

Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:

Desarrollo de tecnologías de eficiencia energética en el sector de producción de San Felipe.

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

Betancourt Burbano Efren Oswaldo

Ati Ganán Jhony Germán

Ing. Cruz Panchi Luis Rolando

Área de Conocimiento:

Basándonos en la norma CINE-UNESCO, se describen a continuación las áreas de conocimiento:

Tabla 1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO

07 ingeniería, Industria y construcción	07 ingeniería y Profesión Afines	0713 electricidad y Energía

Línea de Investigación:

Energías Alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Eficiencia energética e integración de fuentes de energía renovables.

2 INTRODUCCIÓN

La creciente demanda mundial de energía y la preocupación de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han fomentado el desarrollo y la implementación de diversas fuentes de energía renovable. Entre ellas se encuentra la energía solar fotovoltaica, considerada una de las tecnologías más prometedoras para la producción de electricidad limpia y sostenible. De acuerdo con la International Energy Agency (IEA), la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica ha experimentado un aumento muy rápido durante la última década, lo que la convierte en una de las alternativas más importantes para diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

En el caso de Ecuador, el crecimiento de los sistemas solares autónomos de pequeña escala se ha incrementado de manera significativa en los últimos años, impulsado por la necesidad de diversificar la matriz energética del país y reducir la dependencia histórica de la generación hidroeléctrica. Según el Operador Nacional de Electricidad (CENACE), más de 70% de la energía eléctrica del país proviene de centrales hidroeléctricas, lo que ha evidenciado vulnerabilidades importantes durante períodos de sequía prolongadas que afectan la disponibilidad del recurso hídrico[1]. Esta situación ha atraído el interés en soluciones energéticas descentralizadas basadas en fuentes renovables, especialmente la energía solar fotovoltaica, en instituciones educativas, comunidades rurales de difícil acceso y proyectos orientados a la eficiencia energética.

Dentro de los sistemas fotovoltaicos aislados, uno de los componentes fundamentales es el regulador de carga, cuya función principal es dirigir y controlar el flujo de energía eléctrica entre los módulos solares y el sistema de almacenamiento en baterías, garantizando su correcta operación y prolongando su vida útil. En la práctica, existen dos tecnologías ampliamente utilizadas para esta función: los reguladores de carga tipo PWM (Pulse Width Modulation) y los reguladores MPPT (Máximo Power Point Tracking). Ambas tecnologías presentan diferencias significativas en su principio de funcionamiento, eficiencia energética y respuesta frente a las variaciones de irradiancia solar y temperatura ambiente, influyendo directamente en el rendimiento global del sistema fotovoltaico[2]. Diversos estudios técnicos indican que los reguladores MPPT pueden incrementar la captación de energía entre un 10% y un 30% en comparación de los reguladores PWM, bajo determinadas condiciones operativas [3].

A nivel local, en la Universidad Técnica de Cotopaxi, específicamente en la estación solar del proyecto de eficiencia energética DIRGI-CP2021-008, se dispone de dos reguladores de carga MPPT y PWM operando de manera simultánea dentro del mismo sistema. Sin embargo, anteriormente no se contaba con un sistema de monitoreo que permitiera registrar, procesar y analizar de forma sistemática los parámetros eléctricos del sistema, tales como voltaje, corriente, potencia y energía. La falta de información cuantitativa limita la evaluación objetiva del desempeño energético de los dos reguladores y dificulta la toma de decisiones técnicas orientadas a la optimización del aprovechamiento de la energía generada por el sistema fotovoltaico.

En este contexto, esta tesis propone la implementación y el monitoreo y evaluación del rendimiento de los reguladores de carga MPPT y PWM, basados en la adquisición y procesamiento de datos reales de voltaje, corriente, potencia y energía mediante el uso de dispositivos de comunicación y software especializados, se analizará el comportamiento operativo de cada regulador bajo condiciones reales de funcionamiento. Los resultados obtenidos permitirán establecer criterios técnicos comparativos que aporten al diseño, selección, evaluación y mantenimiento del sistema fotovoltaico, contribuyendo al fortalecimiento de la eficiencia energética para la gestión sostenible de los recursos renovables en el Ecuador.

2.1 Situación Problemática.

Las pequeñas y medianas instalaciones de energía solar son una importante alternativa para generar electricidad a partir de fuentes renovables. Sin embargo, uno de los principales desafíos en este tipo de sistemas es gestionar eficazmente la energía captada por los módulos solares, con el fin de optimizar su aprovechamiento y garantizar una adecuada carga del banco de baterías.

En este contexto, los controladores de carga juegan un papel vital, ya que son los responsables de controlar el flujo de energía entre el generador solar y el sistema de almacenamiento, evitando sobrecargas, descargas profundas y pérdidas innecesarias de energía. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran los reguladores de carga tipo PWM (Pulse Width Modulation) y el MPPT (Máximo Power Point Tracking), que se diferencian por su principio de funcionamiento y en su capacidad de aprovechamiento energético.

En la estación solar del proyecto de eficiencia energética DIRGI-CP2021-008 de la Universidad Técnica de Cotopaxi están funcionando ambos reguladores reguladores. Diversos fabricantes, como Victron Energy, indican que los reguladores MPPT pueden generar un mayor aprovechamiento de la energía disponible en los paneles solares en comparación con los reguladores PWM bajo determinadas condiciones de operación [4].

Actualmente, el sistema fotovoltaico de la universidad carece de monitoreo continuo y registro sistemático de datos, lo que limita la evaluación técnica y dificulta la toma de decisiones para mejorar su eficiencia energética.

2.2 Formulación del problema.

El problema radica en el insuficiente análisis y medición de las variables de operación en el sistema fotovoltaico del proyecto DIRGI-CP2021-008 de la Universidad Técnica de Cotopaxi, lo que limita la comparación experimental de la eficiencia energética de controladores de carga MPPT y PWM bajo las mismas condiciones de operación.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCION

2.3.1 Objeto de Investigación

El objeto de investigación de este estudio consiste en controladores de carga tipo MPPT y PWM utilizados en el sistema de células solares aisladas.

2.3.2 Campo de Acción

Según la clasificación de ciencia y tecnología de la UNESCO, este trabajo se incluye en el campo 3322.05 – Fuentes no convencionales, en particular células solares y tecnologías para la conversión y control de la energía solar.

2.3 BENEFICIARIOS

2.3.1 Beneficiarios Directos

- Investigadores académicos del proyecto DIRGI-CP2021-008.
- Docentes y estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica.

2.3.2 Beneficiarios Indirectos

- Comunidad Universitaria.
- Instituciones interesadas en instalar sistemas fotovoltaicos aislados.
- Proyectos de eficiencia energética del sector público y privado.

2.4 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación responde a una necesidad técnica identificada en el ámbito de los sistemas fotovoltaicos aislados, específicamente en la evaluación del rendimiento energético de los reguladores de carga MPPT y PWM bajo condiciones reales de operación. El análisis comparativo basado en datos experimentales permitirá establecer criterios objetivos para la selección de reguladores de carga, sustentados en información técnica local y no únicamente en especificaciones teóricas proporcionadas por los fabricantes.

Desde un punto de vista económico, los resultados del estudio aportarán información relevante para optimizar la relación costo-beneficio en proyectos fotovoltaicos, considerando que la elección de un controlador de carga adecuado afecta directamente el uso de la energía generada y la vida útil del sistema de almacenamiento. Esto resulta particularmente relevante en instalaciones institucionales y comunitarias donde los recursos económicos son limitados y se requiere maximizar la eficiencia del sistema sin incrementar la inversión inicial.

La repercusión social de la investigación se manifiesta en la mejora del desempeño y la confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos aislados, lo que ayuda a garantizar un suministro más estable de electricidad a los usuarios finales. La disponibilidad de datos técnicos confiables facilita la toma de decisiones fundamentadas, incrementa la calidad del servicio eléctrico y reduce la probabilidad de fallos operativos asociados a una gestión inadecuada de la energía.

Adicionalmente, la investigación evidencia la importancia de fortalecer la capacitación técnica en el análisis e interpretación de datos eléctricos provenientes del sistema de monitoreo. La ausencia de conocimientos especializados en manejo de estos parámetros puede derivar en decisiones incorrectas durante la operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos, afectando su eficiencia y durabilidad. En este sentido, el estudio contribuye al fortalecimiento de capacidades técnicas y académicas en el área de energías renovables.

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 General

Analizar el rendimiento energético de los reguladores de carga MPPT y PWM procesando los datos obtenidos del sistema de monitoreo, para determinar la tecnología con mejor aprovechamiento de la energía solar.

2.5.2 Específicos

- Realizar el levantamiento del sistema fotovoltaico existente, identificando los reguladores de carga MPPT y PWM, sus características eléctricas, configuración y condiciones de operación, con el fin de establecer las variables de análisis.
- Diseñar la red de comunicación para el sistema de monitoreo, definiéndolos equipos, interfaces, protocolos y software necesarios para la adquisición de datos de los reguladores de carga.
- Ejecutar pruebas de comunicación y adquisición de datos eléctricos de los dos reguladores MPPT y PWM, verificando la correcta transmisión y almacenamiento de las variables medidas en el periodo de evaluación.
- Procesar los datos obtenidos mediante la herramienta de análisis, con el propósito de calcular el rendimiento energético de los reguladores de carga MPPT Y PWM y establecer una comparación técnica entre ambos.

2.5.3 SISTEMA DE TAREAS

Tabla 2. Sistema de Tareas.

Objetivos Específicos	Actividades	Resultados previstos	Métodos, medidas e instrumentos.
Realizar el levantamiento del sistema fotovoltaico existente,	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamiento de información técnica del sistema fotovoltaico y de los reguladores de carga instalados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inventario técnico del sistema fotovoltaico y de los 	<ul style="list-style-type: none"> • Observación directa, fichas técnicas,

<p>identificando los reguladores de carga MPPT y PWM y las variables eléctricas disponibles para el análisis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de las variables eléctricas de entrada y salida disponibles en cada regulador. 	<p>reguladores MPPT y PWM.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Listado de variables eléctricas seleccionadas para el monitoreo y análisis. 	<p>registros del sistema.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Manuales técnicos Morningstar.
<p>Desarrollar una red de comunicación para el sistema de seguimiento y recolección de datos de los controladores de carga.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de la arquitectura de la red de comunicación para la recolección de datos. • Selección de los equipos, adaptadores de comunicación y software de monitoreo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Esquema de la red de comunicación del sistema de monitoreo. • Lista de equipos y herramientas necesarias para la adquisición de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diagramas técnicos (Word) • Software MSView
	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración del software de monitoreo y parámetros de 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de monitoreo 	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptadores Morningstar.

<p>Ejecutar pruebas de comunicación y adquisición de datos eléctricos de los reguladores MPPT y PWM.</p>	<p>comunicación de los reguladores.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ejecución de pruebas de comunicación y registro de datos eléctricos durante el periodo de evaluación. 	<p>configurado y operativo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Base de datos con registros eléctricos de los reguladores MPPT y PWM. 	<ul style="list-style-type: none"> • Computador portátil. • Software MSView.
<p>Procesar y analizar los datos obtenidos para comparar el rendimiento energético de los reguladores MPPT y PWM.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Procesamiento de los datos eléctricos mediante una hoja de cálculo en Excel. • Elaboración de gráficos comparativos del rendimiento energético de los reguladores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tablas de valores procesados de potencia y energía. • Tablas y gráficos comparativos del rendimiento energético MPPT vs PWM. 	<ul style="list-style-type: none"> • Microsoft Excel. • Procesamiento y análisis descriptivo de datos.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Definición y Aplicación

En este marco teórico se desarrollan los conceptos básicos necesarios para el análisis, y evaluación del sistema fotovoltaico propuesto.

3.2 Sistema Fotovoltaicos Aislados

Un sistema fotovoltaico aislado permite la producción y almacenamiento de electricidad independiente, sin conexión a la red eléctrica habitual. Estos sistemas están destinados en zonas remotas o rurales donde no llega el suministro eléctrico y se busca resistencia de energética. El uso de paneles solares en el hogar proporciona una forma sostenible y autónomo para cubrir las necesidades energéticas de viviendas e instalaciones agrícolas al mismo tiempo se puede conseguir una cierta independencia energética [5].

Su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico, fenómeno mediante el cual un material semiconductor, generalmente silicio, genera corriente eléctrica de manera directa al ser expuesto a la radiación solar, como se indica en la Figura 1.



Figura 1. Sistemas Fotovoltaicos Aislados.

En los sistemas solares, la energía se obtiene del producto del voltaje y la corriente eléctrica, la relación se expresa mediante la Ecuación (1).

El cual será presente en la sección Materiales y Métodos para describir detalladamente su aplicación y diseño del sistema.

3.3 Clasificación de los sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas solares fotovoltaicos son una tecnología renovable que transforma la energía solar en electricidad. Se clasifican según su conexión a la red eléctrica, aunque la fuente actual usado es el mismo, lo que cambia es el tipo de conexión.

- Sistemas fotovoltaicos aislados
- Sistemas conectados a red.

3.3.1 Componentes del sistema fotovoltaico.

La composición de un sistema fotovoltaico comprende de los siguientes elementos:

3.3.2 Generador fotovoltaico (panel solar)

Un módulo solar, también conocido como panel solar o placa solar, es un dispositivo que capta energía solar para iniciar el proceso de conversión en energía sostenible, todos ellos material semiconductor recubierto de silicio, que es el elemento básico. Las células solares son muy sensibles a la luz y generan electricidad cuando reciben luz solar, como se indica en la Figura 2.



Figura 2. Módulo Fotovoltaico.

3.3.3 Regulador de carga

Un controlador de carga es un dispositivo electrónico cuya función es controlar el estado de carga batería para garantizar y realizar una carga óptima y así alargar su vida útil si el esquema se muestra en la Figura 3 [6].



Figura 3. Esquema del regulador de carga.

3.3.4 Funcionamiento del regulador de carga

Los cargadores de cuatro etapas mantienen una tensión de flotación relativamente alta para completar la carga, lo que puede afectar la batería si el cargador permanece conectado por largos periodos. Para mejorar este proceso se utilizan cargadores de cuatro etapas, que incorporan una fase de almacenamiento después de la flotación. En esta etapa, activada tras cierto tiempo de inactividad, la tensión se mantiene cercana a la de circuito abierto de la batería, reduciendo el gaseado y la corrosión. Además, periódicamente el cargador realiza una breve recarga para compensar la autodescarga y prevenir la sulfatación. Este comportamiento se indica en la Figura 4 [7].

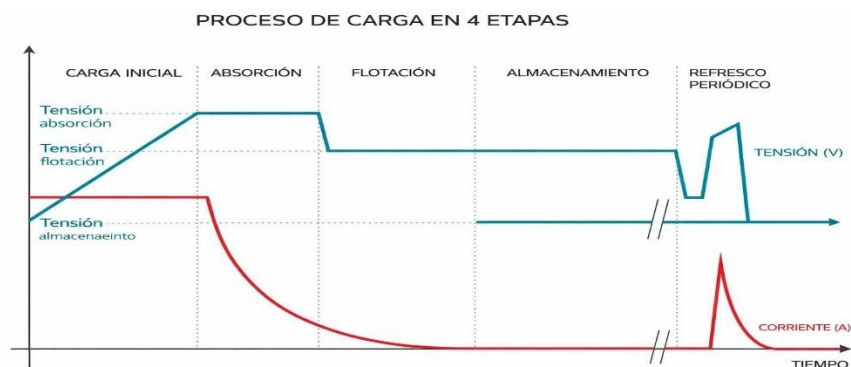


Figura 4. Carga en 4 etapas: carga inicial, absorción, flotación y almacenamiento.

Otra ventaja de los cargadores que incorporan una etapa de almacenamiento es que permiten aplicar una tensión de flotación más alta, lo que favorece una carga más completa de la batería. Sin embargo, esta tensión solo se mantiene durante un tiempo limitado, generalmente entre 8 y 24 horas, dependiendo del cargador. Posteriormente, el sistema pasa a la etapa de

almacenamiento, reduciendo así el riesgo de oxidación en la placa positiva. Este comportamiento se indica en la Figura 5.

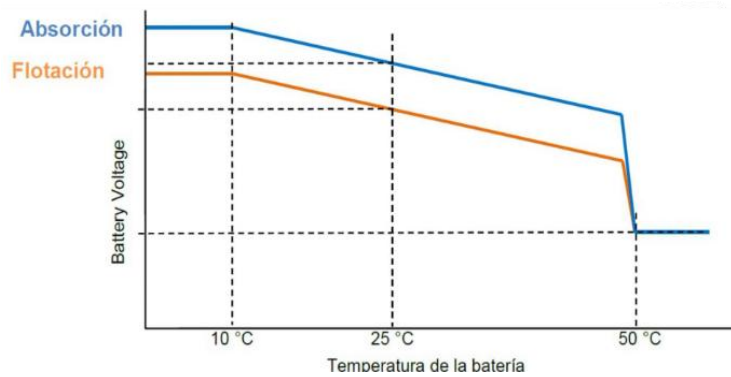


Figura 5. Compensación de tensiones de absorción y potencia en función de la temperatura de la batería. Esta temperatura influye directamente en el desempeño de las baterías. A bajas temperaturas su capacidad disminuye, mientras que a temperaturas altas puede aumentar ligeramente, aunque esto reduce su vida útil.

Por ello, algunos cargadores incorporan sensores de temperatura que ajustan la tensión de carga mediante un factor de corrección indicado por el fabricante. Este comportamiento se indica en la Figura 6.

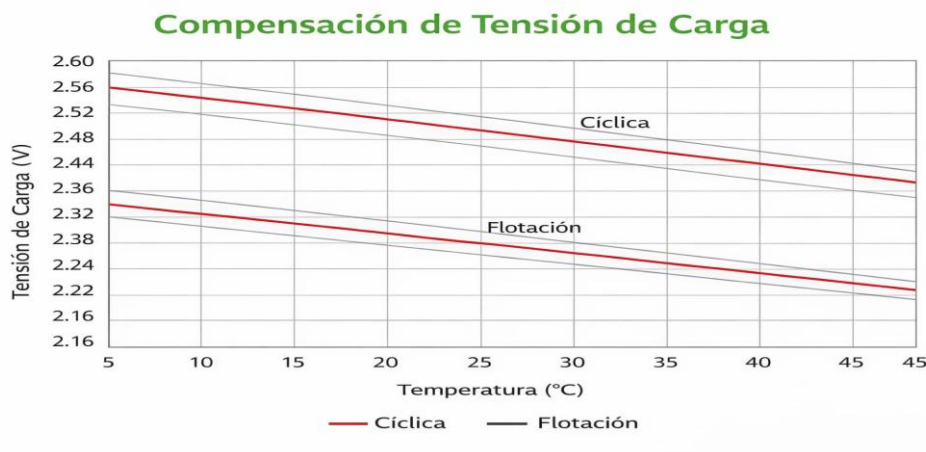


Figura 6. Compensación de la tensión de carga de la batería en función de su temperatura.

3.3.5 Banco de baterías

Un banco de baterías es un conjunto de baterías conectadas en serie o paralelo o una combinación de ambos. Su finalidad es almacenar la energía solar que capta, como se indica en la Figura 7.

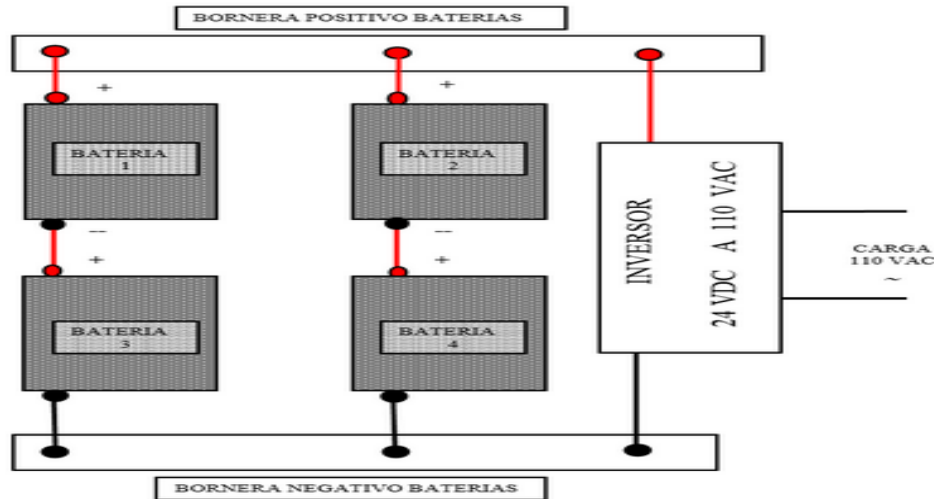


Figura 7. Banco de Baterías.

3.3.6 Inversores

Un inversor solar, también conocido como inversor fotovoltaico, es un dispositivo importante en cualquier sistema solar. Su función principal es convertir la corriente continua (DC) producida por los paneles solares en corriente alterna (AC) que puede ser utilizada en hogares o negocios, es el componente principal de cualquier instalación de paneles solares, como se indica la Figura 8.

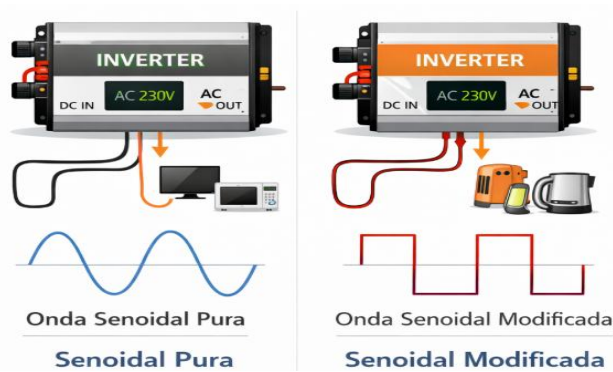


Figura 8. Esquema en funcionamiento de un inversor solar.

3.3.7 Sistema de Monitoreo

El sistema de monitoreo permite registrar variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia y estado de carga, facilitaría la evaluación de la eficiencia energética del sistema, por ejemplo como se indica la Figura 9.



Figura 9. Resultado mostrados en datos por pantalla.

3.4 Reguladores de Carga en Sistemas Fotovoltaicos

Un controlador de carga es un dispositivo encargado de controlar el flujo de energía entre un panel energía solar y un banco de baterías que garantiza protección contra sobrecargas y descargas profundas, además de ajustar la transmisión de potencia. Hay dos tecnologías principales:

Controladores PWM: Siempre funcionan con voltaje de batería.

Controladores MPPT: Operan en el punto de corriente máxima.

3.4.1 Regulador PWM (Pulse With Modulation)

El regulador PWM es dispositivo electrónico que controla la carga de la batería mediante la modulación por ancho de pulso, conectando y desconectando el panel solar a alta frecuencia a través de un transistor de potencia (Mosfet). Estos reguladores son adecuados para sistemas de energía solar de tamaño pequeño y mediano, y son más accesibles que otros tipos de reguladores, como se indica en la Figura 10 [8].

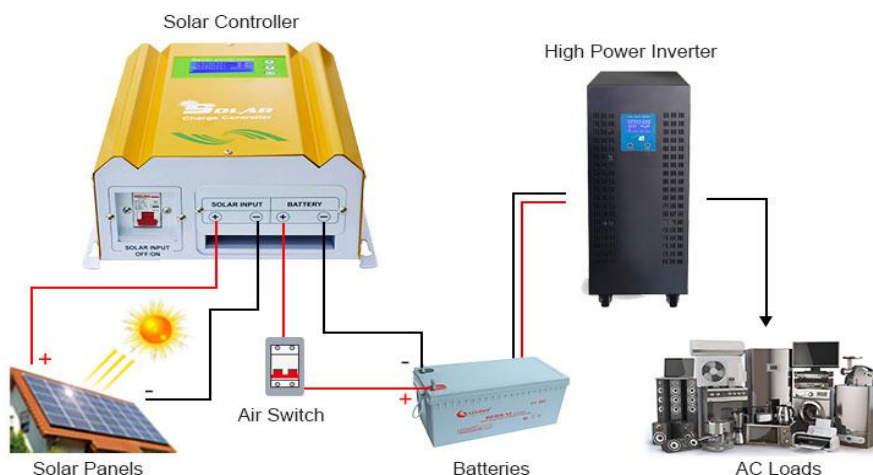


Figura 10. Regulador de carga PWM (Pulse With Modulation)

PWM es una técnica que controla la potencia enviada a una carga variando el ciclo de trabajo, señal periódica digital (ciclo de trabajo). Un ciclo de trabajo es una relación de tiempo, se activa la señal y el periodo total de la señal.

Etapas de trabajo en controladores PWM

El **ciclo de trabajo (Duty Cycle)** es un parámetro utilizado en los sistemas de modulación, ancho de pulso (PWM), que describe el tiempo restante de la señal estado activado durante un período de tiempo determinado. Este parámetro generalmente se expresa por ciento y permite controlar la cantidad de energía suministrada a la carga. Relaciones entre el tiempo activo y el período total de la señal, como se indica en la Ecuación (2).

Básicamente consiste en activar una salida digital durante un tiempo determinado y luego apagarla por debajo del resto, creando así impulsos positivos que se repiten constantemente. Por lo tanto la frecuencia es constante (es decir, el tiempo entre activaciones de pulso) y también lo es el ancho pulso (etapa de trabajo) el valor promedio del voltaje de salida se ajusta al valor analógico deseado, permite un control efectivo de señal, como se indica la Figura 11 [9].

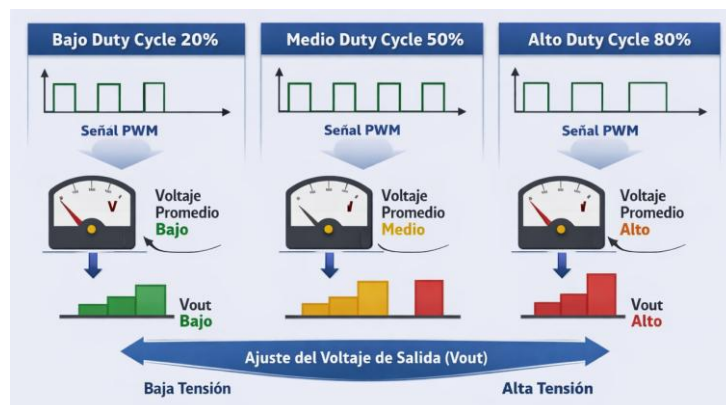


Figura 11. Valores de Señales por ancho de pulso.

Voltaje promedio en señales PWM

En los controladores PWM, el voltaje promedio aplicado a una carga depende directamente de la etapa de trabajo y su señal. Al cambiar la proporción mientras la señal se mantiene alta en cada período, es posible controlar el valor medio del voltaje suministrado. Esta relación entre el voltaje de la señal y el ciclo de trabajo se describe mediante la ecuación (3).

3.4.2 Principio de Funcionamiento

En los controladores basados en **modulación por ancho de pulso (PWM)**, el voltaje promedio aplicado a la carga puede ajustarse cambiando el tiempo de trabajo de la señal de conmutación en la cantidad de tiempo que la señal permanece en el estado activo mientras controla la cantidad de energía transferida del panel solar a la batería. Esta relación entre el ciclo de trabajo y el voltaje del panel se describe mediante la ecuación (4).

3.4.4 Etapas de carga en un regulador PWM

El proceso de carga mediante PWM se divide en tres etapas principales:

Carga a granel (Bulk): Se aplica el máximo voltaje y corriente permitidos para recuperar rápidamente la batería hasta aproximadamente el 80% de su capacidad, sin riesgo de sobrecarga.

Carga de absorción: El voltaje se mantiene constante mientras la corriente disminuye progresivamente, permitiendo completar la carga hasta cerca del 100% sin sobrecalentamiento.

Carga de flotación: El voltaje se reduce a un nivel seguro ($\approx 13.2\text{--}13.4\text{ V}$ en sistemas de 12 V) para mantener la batería completamente cargada, compensando pequeñas pérdidas sin dañarla. Estas etapas pueden visualizarse claramente, como se indica en la Figura 12.

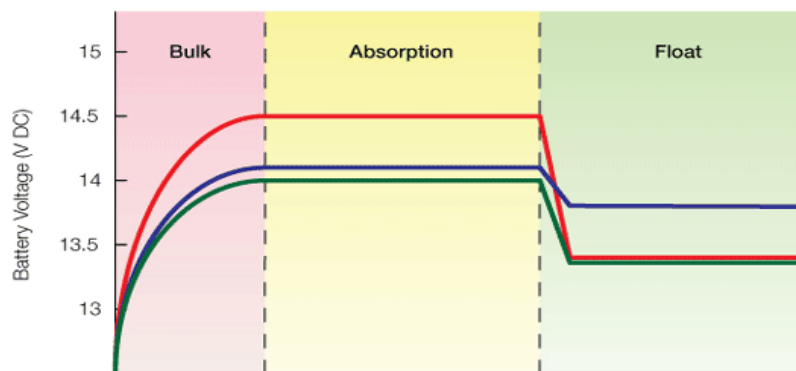


Figura 12. Etapas en carga por el controlador PWM [10].

3.4.5 Limitaciones Técnicas

- No incorpora convertidor DC – DC
- Pérdida de corriente cuando el voltaje del panel es mayor que el voltaje de la batería.
- Eficiencia promedio entre 70% y 80%.

3.5 Regulador MPPT (Máximo Power Point Tracking)

El regulador MPPT es un dispositivo electrónico avanzado que utiliza un convertidor DC-DC y un algoritmo de seguimiento de potencia máxima para obtener la mayor potencia del panel solar. Los controladores MPPT proporcionan mayor eficiencia y mejor mantenimiento de la batería, en comparación con PWM, estos controladores se recomiendan en más sistemas solares grandes, que deben tener un efecto significativo, como se indica en la Figura 13.

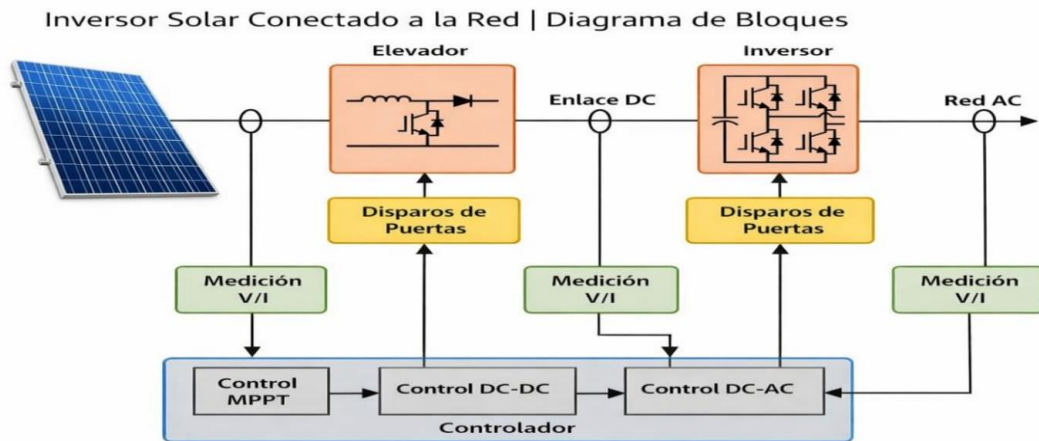


Figura 13. Regulador de carga MPPT (Máximo Power Point Tracking).

3.5.1 Fundamento Matemático.

El punto de máxima potencia (MPP) constituye un principio esencial en la optimización energética de sistemas eléctricos y fotovoltaicos. Dicho punto se alcanza cuando la variación de la potencia respecto al voltaje se anula, lo cual se expresa en la Ecuación (5).

Dado que la potencia eléctrica se define como el producto del voltaje y la corriente, se obtiene la diferencial que caracteriza el comportamiento de la corriente respecto a tensión, esta condición expresa en la Ecuación (6).

3.5.2 Convertidor DC-DC

Los convertidores fotovoltaicos CC-CC son muy importantes en los sistemas de energía solar. Controlan la circulación de la electricidad entre los paneles solares, las baterías y la red eléctrica.

Estos convertidores cambian los niveles de voltaje para satisfacer las necesidades de los usuarios. Su diseño facilita el buen funcionamiento de los paneles solares, incluso con cambio de luz solar o sombras [11].

3.5.3 Funciones de cada tipo de Convertidor

Buck: Cumple la función de reducir el voltaje de entrada proveniente del panel solar para adecuarlo a las necesidades de baterías o dispositivos. Su principio de operación se expresa en la Ecuación (7).

Boost: Se caracteriza por su capacidad de aumentar el voltaje de entrada, es importante en muchas aplicaciones de sistemas de energía renovable y electrónica de potencia. Su principio de funcionamiento se expresa en la Ecuación (8).

3.6 Algoritmos MPPT

Los tres algoritmos MPPT más comunes son:

Perturbar y observar (P&O): Este algoritmo perturba el voltaje operación para lograr el máximo efecto. Aunque hay varias opciones mejorando y más optimizando con este algoritmo.

Conductancia Incremental: Este algoritmo, que se indica a continuación, compara conductancia incremental con conductancia instantánea en una célula solar. Dependiente a partir del resultado aumenta o disminuye el voltaje hasta el punto máximo.

Voltaje de circuito abierto fraccional: Este algoritmo se basa en el principio de que el voltaje del punto máximo de potencia es siempre una fracción constante del voltaje en circuito abierto [12].

3.6.1 Algoritmos MPPT: Método Perturbar y Observar (P&O)

Este algoritmo es uno de los métodos mas utilizados en los controladores. MPPT por su sencillez y buena respuesta en sistemas solares como se ve en la Figura 14. El algoritmo calcula la variación de potencia ΔP para ajustar el voltaje de referencia.

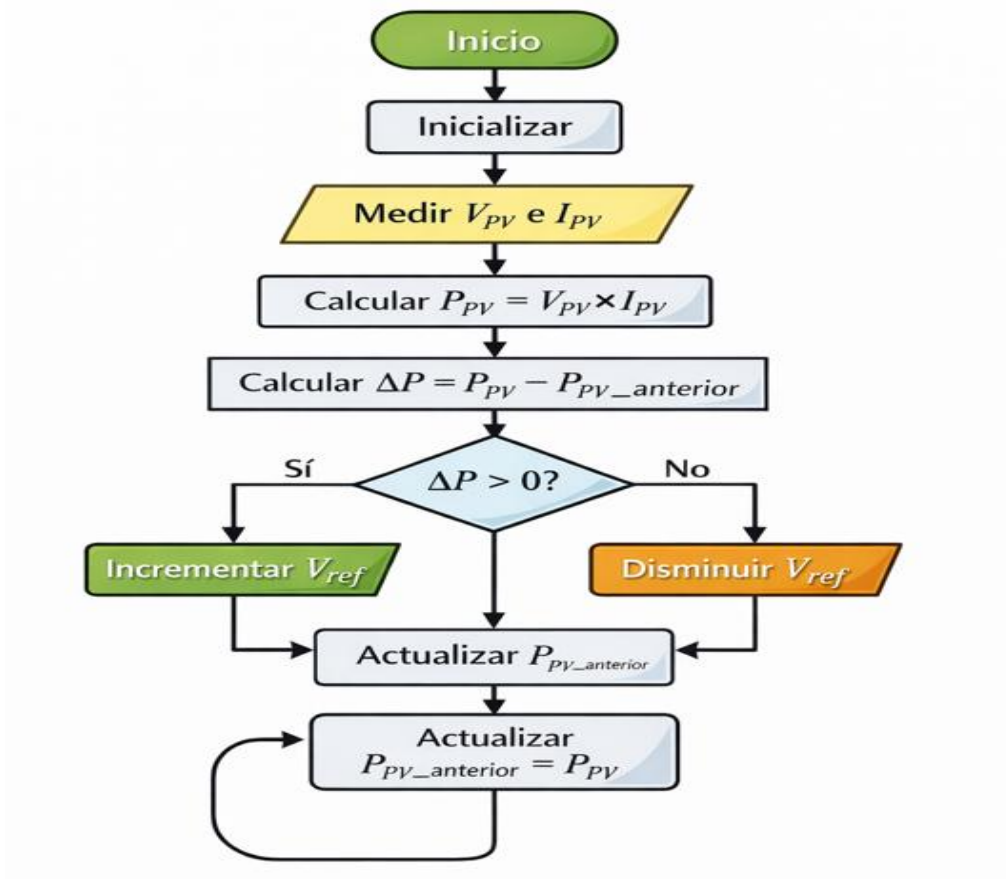


Figura 14. Algoritmo Completo MPPT [13].

El algoritmo corresponde al método Perturb and Observe (P&O), cuyo objetivo es maximizar la potencia extraída del generador fotovoltaico mediante el ajuste repetitivo del voltaje de referencia. A continuación, explicaremos de mejor manera.

1.Inicio

El sistema activa el algoritmo dentro del microcontrolador que gobierna el convertidor DC-DC

2.Inicializar

En esta etapa definimos las variables iniciales:

$P_{pv_anterior}$ → Potencia medida en el ciclo anterior

V_{ref} → Voltaje de referencia inicial

Paso de perturbación ΔV

Variables del ADC

Esta etapa establece las condiciones iniciales del lazo de control.

3. Medición de variables eléctricas

Las dos únicas variables físicas que el sistema mide directamente son:

Voltaje del panel fotovoltaico (V_{pv}): Se obtiene mediante un divisor resistivo y se digitaliza.

Corriente del panel fotovoltaico (I_{pv}): Se mide con sensor tipo shunt o hall y se digitaliza.

4. Cálculo de la potencia instantánea.

La potencia instantánea en el sistema solar se calcula como el producto de tensión y corriente del panel. Esta relación se indica en la Ecuación (9). Y se mostrará en la sección de materiales y métodos a utilizar en el algoritmo.

5. Cálculo de variación de potencia.

El algoritmo compara la potencia actual con la anterior para determinar la variación. Esta relación se expresa en la Ecuación (10).

6. Decisión lógica: comparación clave

En la Tabla 3 se presenta el bloque de decisión que evalúa.

$$\Delta P > 0?$$

Tabla 3. Bloque de decisión para evaluación del sistema.

<i>Caso 1: $\Delta P > 0$</i>	<i>Caso 2: $\Delta P \leq 0$</i>
Significa que la última perturbación incrementó la potencia. El sistema continúa perturbando en la misma dirección. En la imagen esto se representa como: Incrementar V_{ref} Esto indica que el punto de acción será acercándose al controlador MPPT.	Significa que la potencia disminuyó tras la perturbación. El sistema invierte dirección del ajuste. En la imagen esto representa como: Disminuir V_{ref} Esto implica que el sistema se estaba alejando del MPP.

7. Variables controladas realmente por el sistema.

El algoritmo modifica V_{ref} , pero físicamente actúa y el duty cycle del convertidor DC-DC, al modificar:

- Cambiar la resistencia aparente del panel.
- El punto de trabajo se mueve a lo largo de la curva $I - V$.
- Se ajusta el voltaje del panel hacia el punto máximo de potencia.

8. Actualización de variables.

Como parte del proceso iterativo del algoritmo, se actualiza la variable de potencia anterior para permitir la comparación en el siguiente ciclo. Esta operación se expresa en la Ecuación (11).

Variables que miden y que comparan exactamente

En la siguiente Tabla 4 se presentan las variables consideradas para el análisis del sistema, detallando qué parámetros se miden y cuáles son los valores de referencia con los que se comparan. Estas variables permiten evaluar el comportamiento del sistema y determinar su desempeño en función de los criterios técnicos establecidos

Tabla 4. Variables del sistema fotovoltaico para la evaluación y control del punto de operación.

TIPO	VARIABLE	DESCRIPCIÓN
Medida	V_{pv}	Voltaje instantáneo del panel
Medida	I_{pv}	Corriente instantánea del panel
Calculada	P_{pv}	Potencia instantánea
Comparación	ΔP	Diferencia entre potencia actual y anterior
Controlada	V_{ref}	Variable ajustada para mover el punto de operación

3.6.2 Interpretación Matemática

La Tabla 5 presenta el criterio matemático empleado para determinar la ubicación del punto de operación con respecto al punto máximo potencia MPP, analizando el signo derivada de la potencia con respecto al voltaje.

Tabla 5. Criterio de evaluación del signo de dP/dV para la localización del MPPT.

Si:	Si:
$\frac{dP}{dV} > 0$	$\frac{dP}{dV} < 0$
El sistema está antes del MPP.	El sistema está después del MPP.

Cuando oscila alrededor de cero, el sistema está operando en el punto de máximo efecto.

Algoritmo P&O: Implementa un control iterativo discreto basado en la evaluación incremental de la potencia fotovoltaica. La decisión de ajuste se fundamenta en el signo de la variación de potencia, modificando el voltaje de referencia del convertidor DC-DC hasta converger al punto donde la derivada de potencia respecto al voltaje es nula, como se indica en la Figura 15.

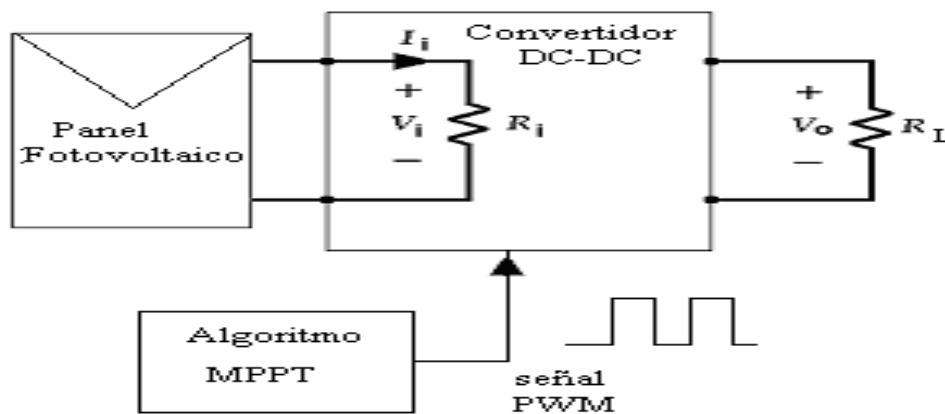


Figura 15. Esquema básico de un sistema MPPT

Los ingenieros que diseñan inversores solares implementan algoritmos MPPT, maximizar la energía generada por los sistemas fotovoltaicos. Estos algoritmos controlan el voltaje por lo que el sistema está funcionando en el “punto de máxima potencia” estos algoritmos MPPT se utilizan en controladores de sistemas fotovoltaicos para ajustar potencia máxima según la irradiancia y la temperatura, como se indica en la Figura 16.

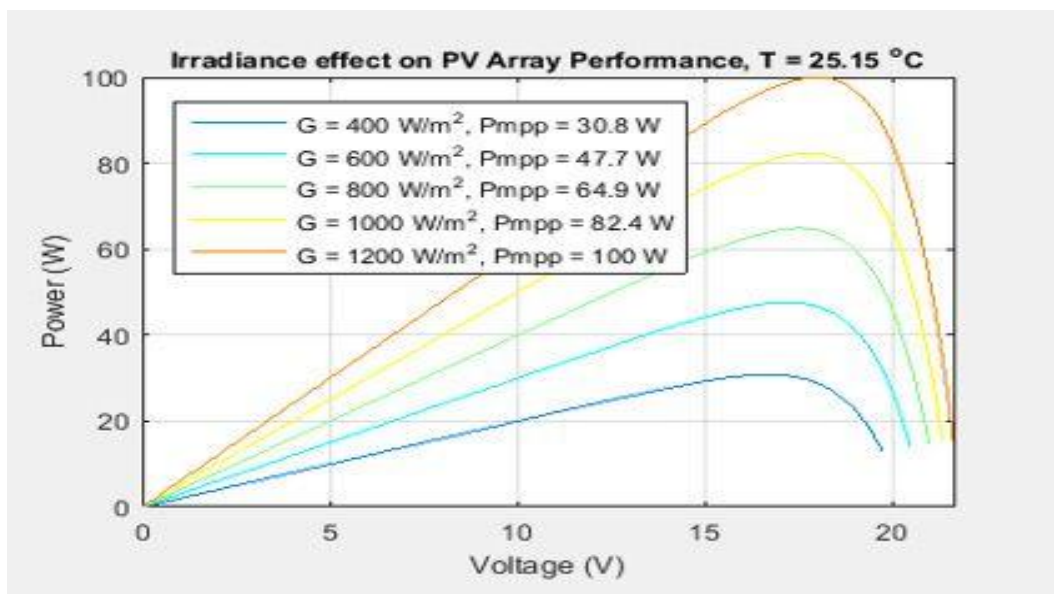


Figura 16. Comportamiento eléctrico del sistema fotovoltaico mediante curvas I-V y P-V.

3.6.3 Características Técnica de un MPPT.

- Los controladores estándar pueden ofrecer mejoras significativas en la recolección de energía, normalmente entre 20% y un 30% más de energía que los controladores PWM.
- Eficiencia entre 95% y 99%.
- Incremento de energía captada entre 15% y 30% respecto a PWM.
- Mejor desempeño en condiciones variables.
- Evaluación del Rendimiento Energético.

La eficiencia del regulador se define como la relación entre la potencia de salida y la potencia entrada. Esta condición se expresa en la Ecuación (12).

Para la comparación entre tecnologías se consideran:

- Energía generada Wh
- Potencia Promedio W
- Tiempo de Carga
- Eficiencia del Regulador
- Respuesta ante variaciones de irradiancia.

3.6.4 Sistema de Monitoreo

El sistema de monitoreo implementado en el proyecto DIRGI-CP2021-008 permite:

- Medición en tiempo real variables eléctricas.
- Registro histórico de datos.
- Comparación experimental entre MPPT y PWM.
- Análisis estadístico del rendimiento.

3.6.5 Consideraciones prácticas para la selección del controlador MPPT.

- Al seleccionar un controlador MPPT, es importante comprobar su compatibilidad con voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y corriente de cortocircuito (I_{sc}) del sistema fotovoltaico, evitando sobrecargas que podrían causar daños o pérdidas de eficiencia.
- Asimismo, se debe considerar su resistencia a las condiciones ambientales, incluyendo protección contra el polvo y la humedad (clasificación IP) y compensación de temperatura para realizar un seguimiento óptimo del punto de potencia máxima.
- Por último, sistemas más grandes, es recomendable incorporar funciones de monitorización y conectividad que permitan supervisar el rendimiento y optimizar el mantenimiento del sistema.

3.6.6 Mejor Rendimiento del controlador MPPT.

En los sistemas solares actuales, la optimización de la recolección de energía es esencial para mejorar su eficacia. Controlador de seguimiento de punto máximo power (MPPT) permite que los paneles solares funcionen en momentos óptimos, ajuste dinámica frente a cambios de radiación y temperatura [14]. Implementación correcta el controlador MPPT maximiza la transferencia de energía y mejora la eficiencia general del sistema solar, como se indica en la Figura 17. Demuestra su contribución al uso óptimo de la energía producida.

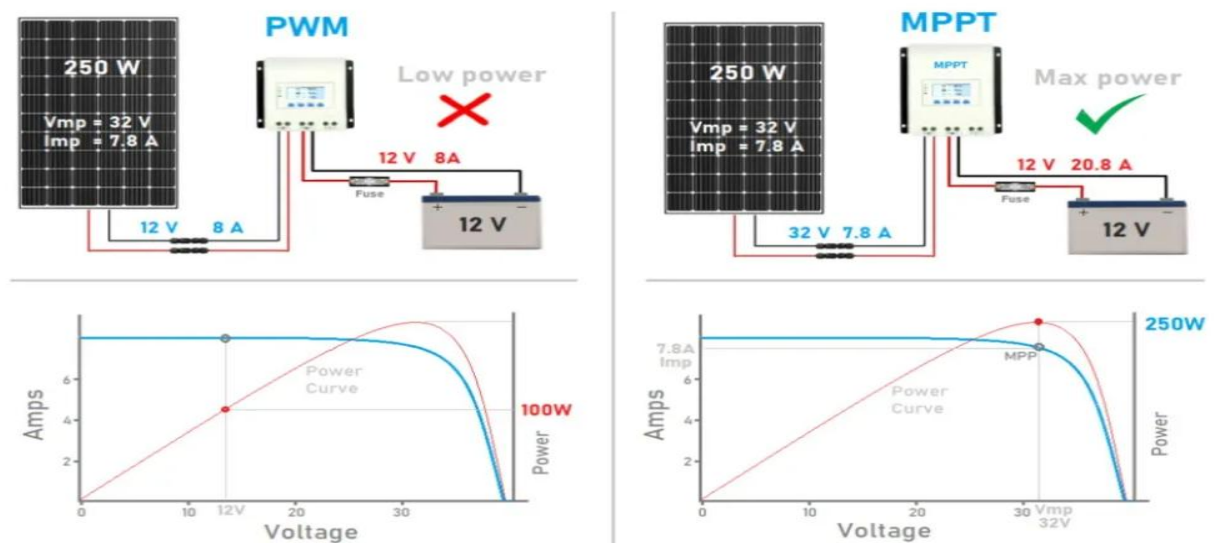


Figura 17. Mejor rendimiento del controlador MPPT.

3.7 CUADRO COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE UN MPPT.

La Tabla 6 presenta una comparación de las principales técnicas MPPT, resaltando sus características operativas principales, ventajas técnicas y su efecto en el rendimiento sistema solar.

Tabla 6. Comparación de tecnologías fotovoltaicos con MPPT.

TECNOLOGIA	CARACTERÍSTICA PRINCIPAL	VENTAJA TECNICA	IMPACTO EN EL SISTEMA FV
Conversión de dos etapas	Uso de convertidor reductor y elevador (buck–boost)	Amplio rango de operación de voltaje	Mayor estabilidad y eficiencia ante variaciones de irradiancia
MPPT de múltiples entradas	Varios canales MPPT independientes	Optimización individual por arreglo solar	Mejor rendimiento en sistemas con sombras.
Semiconductores Silicio (SiC) y nitruro de galio (GaN)	Dispositivos de alta velocidad y bajas pérdidas	Mayor eficiencia y mejor gestión térmica	Diseño más compacto y mayor densidad de potencia.

Control digital con aprendizaje automático	Algoritmos predictivos basados en datos	Ajuste anticipado ante cambios ambientales	Seguimiento más preciso y menor pérdida de energía.
--	---	--	---

3.7.1 Comunicación en Serie

En la comunicación serie, los datos se envían en forma de pulso binario, este 1 binario significa lógica alta o 5 voltios, 0 significa lógica baja o 0 voltios. Esta comunicación puede adoptar muchas formas según la naturaleza y el tipo de transmisión de datos. Este modo de transmisión de datos se clasifica en simplex, half dúplex y full dúplex, hay un transmisor y receptor para cada modo de transmisión, como se indica en la Figura 18.



Figura 18. Comunicación Serial.

Es importante saber que (puerto) es el nombre de las interfaces que permiten comunicación entre dos dispositivos porque los dispositivos electrónicos solo entienden bits. Es decir, a partir de ceros y unos, toda la información se envía a través de la puerta en bits. La comunicación en serie, es ese tipo de comunicación que utiliza un puerto serie. En este caso, todos los bits se envían secuencialmente, es decir digamos que primero se envía un bit, luego otro, luego otro y así sucesivamente, como se indica en la Figura 19.

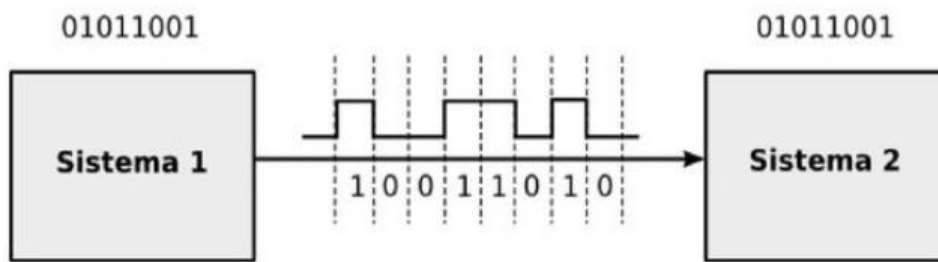


Figura 19. Comunicación en Serie.

3.7.2 Comunicación en Paralela

Esta segunda forma de comunicación donde todos los bits se envían simultáneamente. Al principio se podría pensar que la comunicación paralela es más rápida. Sin embargo gracias al desarrollo de la tecnología, la comunicación serie es más rápida y utilizada mucho más [15].

En cambio, la comunicación serial solo requiere dos conexiones: RX (recepción) y TX (transmisión), como se indica en la Figura 20.

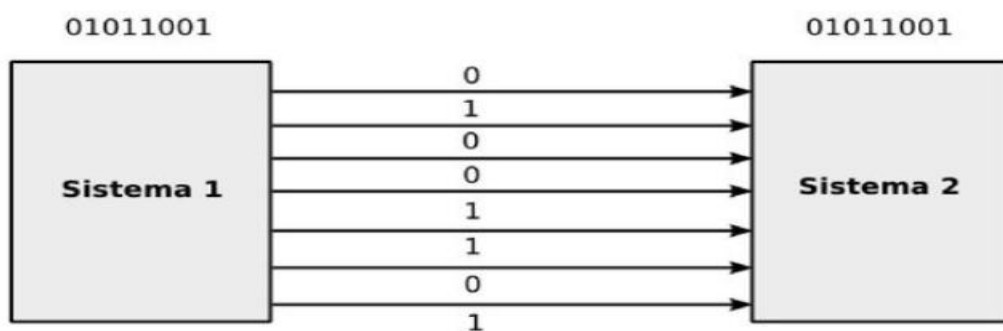


Figura 20. Conexión en Paralelo.

3.7.3 El protocolo RS – 232

La comunicación entre equipos de procesamiento de datos y periféricos se realiza mediante transmisión digital en modo serie o paralelo. En la comunicación serie, como en el protocolo RS232, los datos se envían bit a bit por línea, lo que los hace adecuados para distancias más largas. La transmisión en paralelo, por otro lado, envía varios bits a la vez. En varias líneas, más utilizado para distancias cortas o cuando se requiere alta velocidad y curso de transferencia.

3.7.4 Estándares RS232

El RS232 presenta como ventaja su capacidad de transmitir datos a través de líneas telefónicas mediante el uso de módems, los cuales convierten la información digital en señales compatibles

con la red telefónica y posteriormente la reconvierten a formato digital en el extremo receptor. De manera formal, RS232 establece una conexión en serie entre el terminal de datos (DTE), generalmente una computadora, y un equipo de comunicación de datos (DCE), como un módem que proporciona intercambio binario de información a través de conexiones especiales entre pasadores, como se indica en la Figura 21.

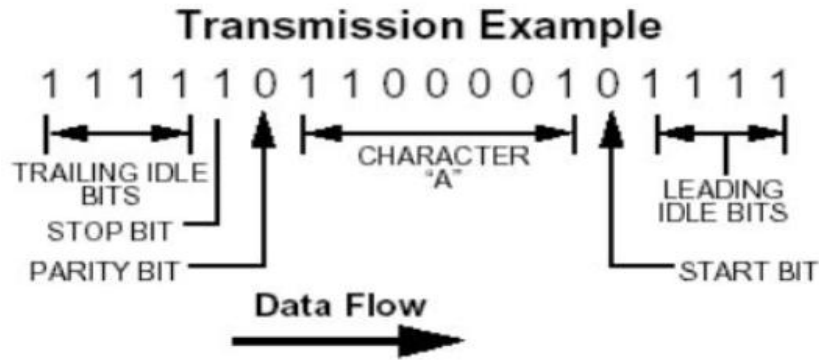


Figura 21. Transmisión de Datos.

3.7.5 Puerto RS232

Además de su uso en líneas telefónicas, el protocolo RS232 es muy utilizado al conectar dispositivos de recopilación de datos a sistemas informáticos, en este tipo de comunicaciones la computadora actúa como un equipo terminal de datos (DTE). A pesar de ello, cuando se requiere conectar dos dispositivos DTE entre sí, se utiliza un cable de modem nulo, el cual posee un cable interno cruzado que permite la comunicación directa sin necesidad de un equipo de comunicación (DCE), como se indica en la Figura 22.

RS-232 Function	Pin Number		Input to DTE	Input to DCE
	DB25	DB9		
Shield	1			
Transmit Data (TD)	2	3		
Receive Data (RD)	3	2		
Request to Send (RTS)	4	7		
Clear to Send (CTS)	5	8		
DCE Ready (DSR)	6	6		
Signal Ground (SG)	7	5		
Received Line Signal Detector (DCD)	8	1		
DTE Ready (DTR)	20	4		
Ring Indicator (RI)	22	9		

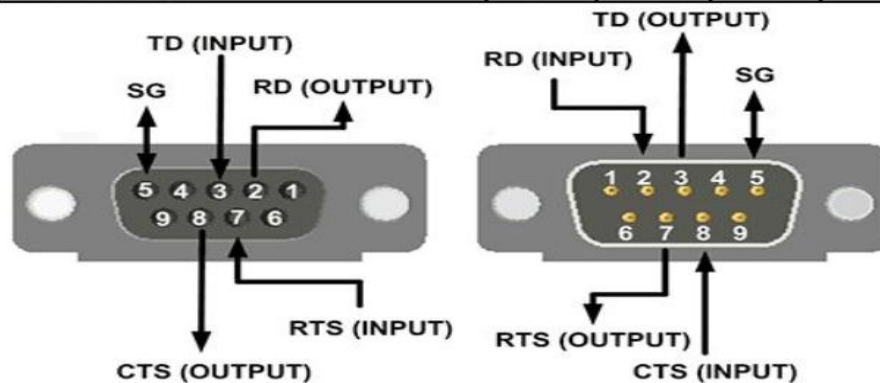


Figura 22. Tabla de funciones del RS-232.

3.7.7 Opciones de Cableado

Antes las computadoras usaban puertos seriales de 25 pines, pero cuando apareció la IBM PC AT, “Computadora Personal de Tecnología Avanzada fabricada por IBM” empezaron a usar puertos de 9 pines. Con la incorporación de puertos de 9 pines en las nuevas computadoras, se desarrolló un cable específico, como el RS-232, que permitía la correcta interconexión de los pines necesarios. A continuación, se describe su funcionamiento con mayor detalle.

- RS232 puede usar conectores de 25, 9 o 4 pines.
- 25 pines = versión completa antigua.
- 9 pines = versión más moderna y común.
- 4 pines = versión básica.
- Si los pines no coinciden, se usa un adaptador.

3.7.8 Seleccionando un cable RS232

En el sistema implementado, el regulador MPPT establece comunicación con el equipo de monitoreo mediante interfaz Ethernet, lo que permite una transmisión de datos de mayor velocidad y estabilidad dentro de una red local. Por otro lado, el regulador PWM utiliza un

protocolo de comunicación serial RS-232 para la transferencia directa de información hacia la computadora, empleando un enlace punto a punto. Esta diferencia en los métodos de comunicación responde a las características tecnológicas propias de cada controlador, como se indica en la Figura 23.

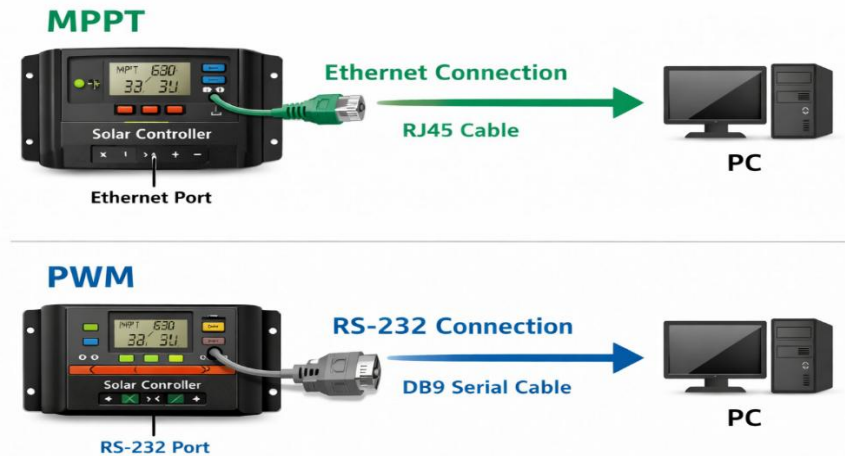


Figura 23. Diferencia de cable RJ45 y RS-232.

3.8 RS -232 Pinout

3.8.1 Tipos de cables de comunicación: directo, cruzado y módem nulo

En sistemas de seguimiento y recogida de datos, la correcta selección en medio físico de comunicación es un aspecto fundamental para garantizar la transferencia adecuada de información entre dispositivos.

Normas de Cables

3.8.2 Cable directo (Ethernet)

El cable recto o estándar T568B es un tipo de cable de par trenzado que se utiliza en redes, un área local para conectar una computadora a un núcleo red, como una interconexión dispositivos de diversa naturaleza, como una computadora o conmutador, en este caso de que ambos extremos de cable deban estar en la misma dirección [16].

Su función es permitir la transmisión de datos en una red local utilizando protocolos como TCP/IP. El cable recto tiene ambos extremos con el mismo estándar (T568A) como se indica en la figura 24.

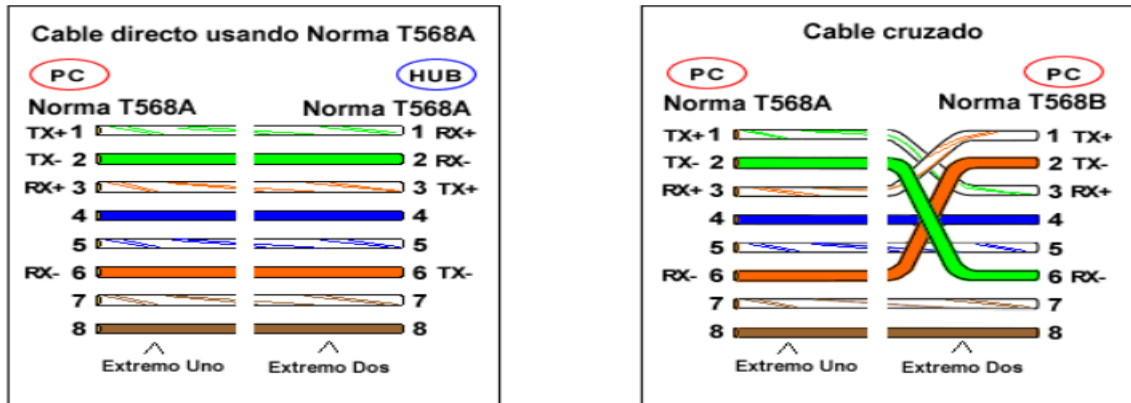


Figura 24. Cable directo con extremos similares.

3.8.3 Cable cruzado (Ethernet)

La norma T568A O cable cruzado también pertenece al estándar Ethernet y utiliza conectores RJ45; sin embargo, presenta una diferencia en su configuración interna, ya que intercambia los pares de transmisión y recepción. Aunque en la actualidad muchas interfaces modernas incorporan detección automática (Auto-MDI/MDIX), el concepto de cable cruzado sigue siendo relevante en términos teóricos, como se indica en la Figura 25

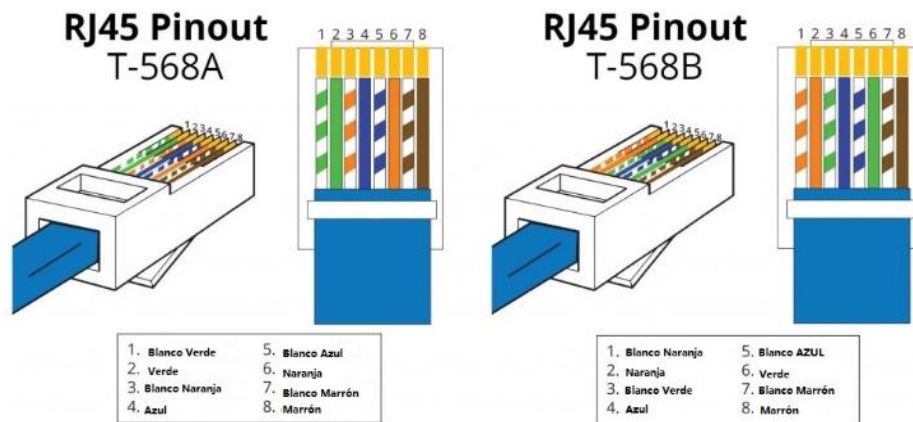


Figura 25. Comparación de colores en las dos normas.

Son los T568A y T568B. Permiten cableado directo (desde el ordenador al switch o hub) o unión (PC a PC) como se indica la Figura 26.

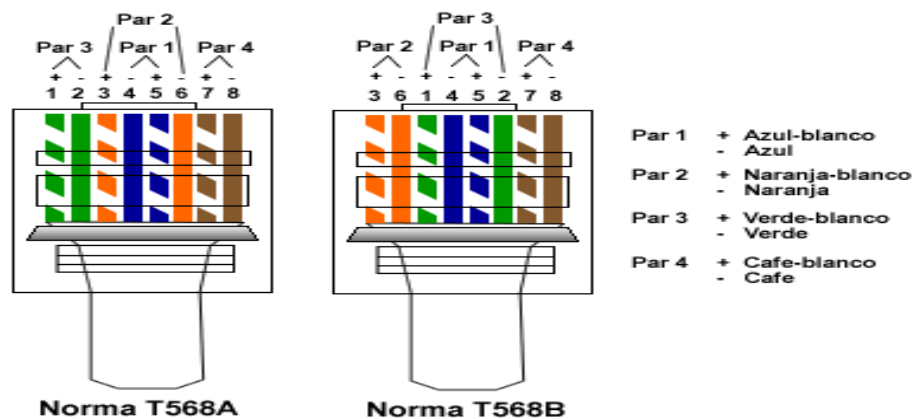


Figura 26. Cables Directos.

3.8.4 Cable de módem nulo (RS-232)

A diferencia de los anteriores, el cable de módem nulo pertenece al ámbito de la comunicación serial bajo el estándar RS-232. Este emplea conectores DB9 o DB25 y se caracteriza por cruzar internamente las líneas de transmisión (TX) y recepción (RX), permitiendo la comunicación directa entre dos dispositivos del tipo DTE (Data Terminal Equipment), como puede ser una computadora y otro equipo de adquisición de datos. No se trata de una comunicación en red, sino de un enlace punto a punto, como se indica en la Figura 27 [17].

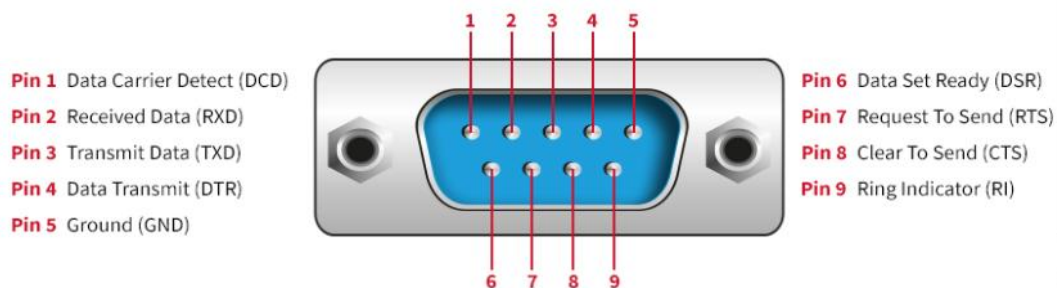


Figura 27. Cableado en un interfaz RS-232 en una conexión Sub-D9.

3.8.5 Características técnicas del cable de módem nulo

El cable de módem nulo incorpora:

- Cruce interno de las líneas de transmisión y recepción, permitiendo la comunicación directa entre dispositivos RS-232.
- Señales de control de flujo (RTS/CTS, DTR/DSR o XON/XOFF), que garantizan la sincronización y regulación de la transferencia de datos.

- Posible utilización de líneas auxiliares como RI y DCD para funciones adicionales, incluyendo suministro de alimentación auxiliar en aplicaciones específicas.
- Blindaje y conexión a tierra, lo que reduce interferencias electromagnéticas y mejora la integridad de la señal.

3.8.6 Software de supervisión - MSView de Morningstar

El software MSView de Morningstar es una aplicación basada en Windows que permite a los usuarios conectarse a los productos Morningstar compatible a un Pc, para ajustar y observar la configuración de los productos Morningstar y los datos del sistema fotovoltaico en tiempo real, como se indica en la Figura 28.



Figura 28. Software MSView de Morningstar.

4 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.

Este estudio fue diseñado utilizando un enfoque cuantitativo, experimental y comparativo, debido a que se realizó la medición, registro y análisis de variables eléctricas obtenidas directamente de un sistema fotovoltaico en operación. El estudio es de carácter aplicado, ya que se orienta a evaluar el rendimiento energético de los reguladores de carga MPPT y PWM implementando un sistema de seguimiento y procesamiento de datos.

El método experimental permitió observar el comportamiento real de ambos reguladores bajo condiciones normales de funcionamiento, sin cambiar la configuración básica del sistema fotovoltaico. De los datos registrados, se efectuó un análisis comparativo con el fin de identificar diferencias en el aprovechamiento energético entre ambas tecnologías.

El estudio se realizó en el sistema fotovoltaico perteneciente al proyecto de eficiencia energética DIRGI-CP2021-008, el cual está conformado por módulos fotovoltaicos, reguladores de carga tipo MPPT y PWM, banco de baterías y cargas eléctricas. El sistema opera de manera autónoma

y se encuentra instalado de forma permanente lo que permitió realizar la evaluación bajo condiciones reales de operación, como presenta la Figura 29.

Para el desarrollo del trabajo de titulación no se modificó la estructura del sistema fotovoltaico, sino que se incorporó un sistema de monitoreo que permitió registrar las variables eléctricas necesarias para el análisis del rendimiento energético de los reguladores.

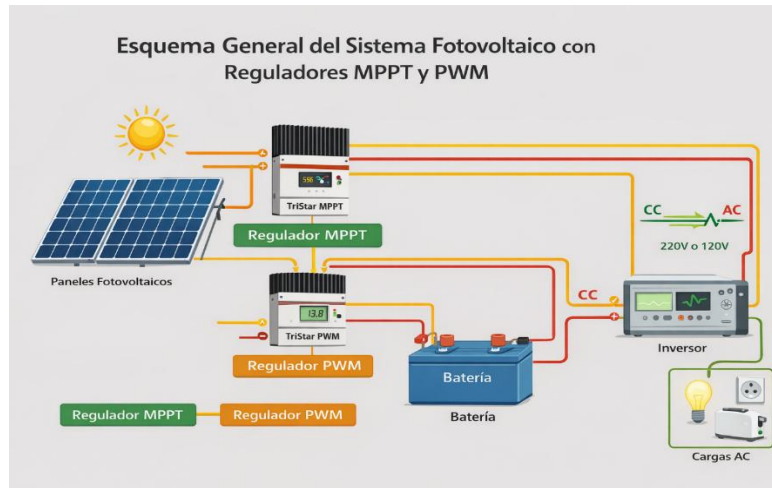


Figura 29. Esquema general del sistema fotovoltaico con reguladores MPPT y PWM.

4.1 Declaración de Variables.

4.1.1 Variable Independiente.

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

4.1.2 Variable Dependiente.

Rendimiento energético del sistema fotovoltaico, que se define como una cantidad de energía eléctrica entregada al banco de baterías durante el periodo de tiempo establecido.

4.2 Métodos de cálculo y procedimiento de datos.

Para la determinación de la energía generada por cada regulador de carga, se empleó el cálculo del área bajo la curva de potencia en función del tiempo. Debido a que los datos fueron registrados en intervalos discretos de tiempo, se utilizó un método de integración numérica aplicado sobre los valores obtenidos del sistema de monitoreo.

La potencia instantánea se calculó a partir de los valores de voltaje y corriente registrados por el sistema de adquisición de datos; se observa una disminución progresiva del voltaje desde aproximadamente 25 V al inicio hasta cerca de 22 V al final del intervalo, evidenciando una tendencia descendente a lo largo del tiempo, como se indica en la Figura 30, conforme a la ecuación (1).

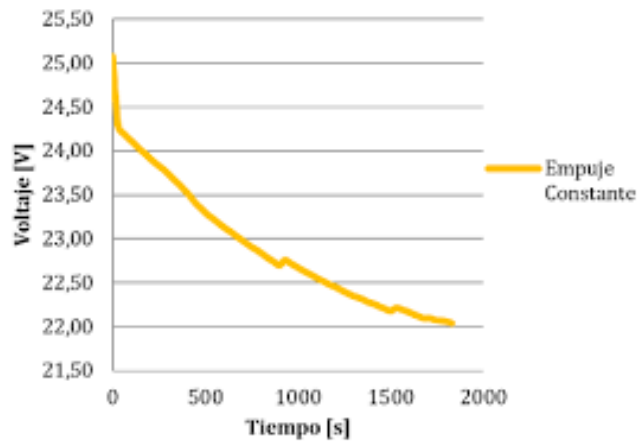


Figura 30. Curva de potencia en función del tiempo [18].

Posteriormente, en este apartado se considera la energía generada a partir de la potencia medida en intervalos discretos de tiempo. El cálculo se realiza aplicando integración numérica, lo que permite obtener la energía acumulada en función de las potencias registradas y el intervalo de muestreo, la energía se calcula mediante la Ecuación (13).

El gráfico muestra el efecto en función del tiempo, como se indic en la Figura 31. Se observa una disminución progresiva desde aproximadamente 1300 W hasta cerca de 200 W, evidenciando una tendencia descendente sostenida durante el intervalo analizado.

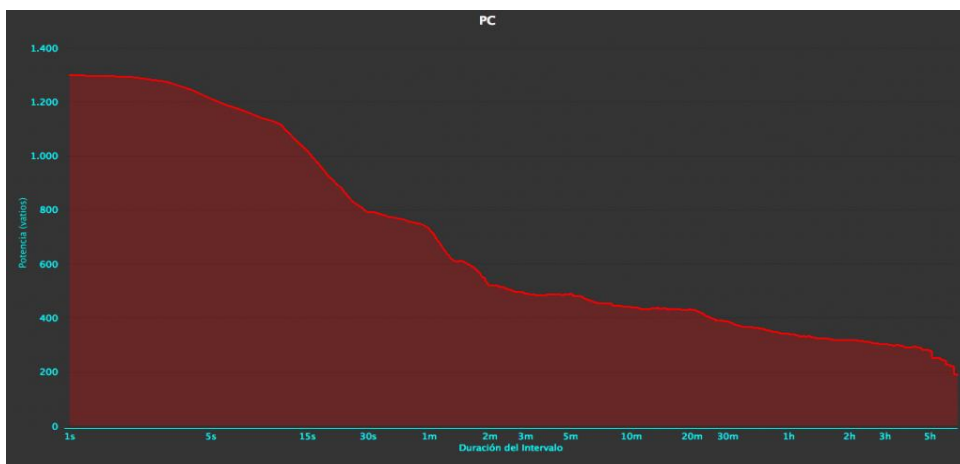


Figura 31. Cálculo de área bajo la curva.

Este procedimiento fue implementado con el uso de hojas de cálculo en Microsoft Excel, que permiten el procesamiento automático de los datos registrados por el sistema de monitoreo y la obtención de la energía acumulada diaria de cada regulador.

4.3 Variables del proceso.

4.3.1 Variables de entrada.

Las variables de entrada corresponden a los parámetros eléctricos provenientes del sistema fotovoltaico y registrados por los reguladores de carga. Entre las principales variables de entrada se consideran:

- Voltaje de entrada desde los módulos fotovoltaicos (V),
- Corriente de entrada desde los módulos fotovoltaicos (A),
- Potencia de entrada (W),
- Energía generada (Wh).

Estas variables dependen directamente de las condiciones ambientales, principalmente de la radiación solar y la temperatura, así como del estado operativo del sistema.

4.3.2 Variables de salida.

Las variables de salida están relacionadas con la energía gestionada por cada regulador hacia el sistema de almacenamiento, entre las cuales se incluyen:

- Voltaje de salida hacia las baterías (V),
- Corriente de carga a potencia entregada (W),
- Energía acumulada (Wh),

Variable a medir: voltaje (V), tiempo (t), corriente (I), potencia (P) y energía (E).

Cálculo de la potencia generada

La potencia eléctrica generada por el sistema fotovoltaico se determinó a partir de los datos medidos de voltaje y corriente, utilizando la ecuación (1).

$$P=V.I$$

Ec.(1)

donde:

P = potencia eléctrica (W)

V = voltaje (V)

I = corriente (A)

Cálculo de la etapa de trabajo (Duty Cycle)

La etapa de trabajo del regulador PWM se determinó a partir de la comparación entre el tiempo en que la señal permanece en estado activo y el período total de la señal de conmutación. Esta relación se expresa mediante la ecuación (2).

$$Duty\ Cycle = \frac{t}{T} \quad Ec.(2)$$

donde:

t = tiempo en estado activo o parte positiva de la señal

T = período total de la señal

Cálculo del voltaje promedio en una señal PWM

El voltaje promedio de una señal PWM se determinó en función del ciclo de trabajo aplicado y de los grados de voltaje máximo y mínimo de la señal. Esta comparación permite estimar el valor medio del voltaje suministrado a la carga, como se expresa en la ecuación (3).

$$V_{prom} = (V_{max} - V_{min}) \cdot \frac{Duty\ Cycle}{100} \quad Ec.(3)$$

En este estudio se consideró un grado alto de **5 V** y un grado bajo de **0 V**, por lo que la ecuación se expresa como:

$$V_{prom} = (5V - 0V) \cdot \frac{Duty\ Cycle}{100}$$

Por ejemplo, si se desea obtener una señal PWM con un voltaje promedio de 1 V a partir de una fuente Vcc de 5 V, el ciclo de trabajo requerido es aproximadamente 20 %, lo que implica que la señal permanece 20 % del tiempo en 5 V y 80 % del tiempo en 0 V.

Cálculo del voltaje promedio aplicado a la batería

El voltaje promedio suministrado a la batería mediante el controlador se determinó a partir del ciclo de trabajo aplicado a la señal de conmutación y del voltaje generado por el panel fotovoltaico. Esta relación permite estimar el valor medio del voltaje entregado por el sistema, como se expresa en la ecuación (4).

$$V_{prom} = D \cdot V_{panel} \quad \text{Ec.(4)}$$

donde:

V_{prom} = voltaje promedio aplicado a la batería (V)

D = ciclo de trabajo o *duty cycle*

V_{panel} = voltaje del panel fotovoltaico (V)

La condición matemática que define el punto de máxima potencia se expresa en la Ecuación (5):

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{Ec.(5)}$$

Esta ecuación indica que el máximo de potencia se obtiene cuando la derivada de la potencia P respecto al voltaje V es igual a cero. En otras palabras, el sistema alcanza su rendimiento óptimo en el punto donde un incremento o disminución del voltaje no produce variación en la potencia, lo que permite identificar el valor de operación más eficiente.

Y al considerar la fórmula de la potencia obtendremos la relación matemática como se expresa en la Ecuación (6):

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \text{Ec.(6)}$$

La ecuación muestra que la variación de la corriente I respecto al voltaje V está determinada por una relación inversa. En otras palabras, el cambio de corriente con respecto al voltaje es igual al cociente negativo de la corriente sobre el voltaje, lo que refleja el comportamiento característico del sistema bajo la condición de máxima transferencia de potencia.

Funciones y ecuaciones de los Convertidores.

La relación matemática que describe el funcionamiento del convertidor Buck se expresa en la Ecuación (7).

$$V_{out}=D \cdot V_{in}$$

Ec.(7)

La ecuación establece que el voltaje de salida (V_{out}) es igual al ciclo de trabajo (D) por el voltaje de entrada (V_{in}). Así, el convertidor Buck reduce proporcionalmente la tensión de entrada según D , adaptando la energía del panel solar a baterías o dispositivos.

La relación matemática que describe el funcionamiento del convertidor Boost se expresa en la Ecuación (8).

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

Ec.(8)

Voltaje de salida (V_{out}) es proporcional al voltaje de entrada (V_{in}) dividido por $(1-D)$, donde D es el ciclo de trabajo. Así, al aumentar D , el convertidor Boost eleva el voltaje de salida por encima del de entrada.

Funciones y ecuaciones del algoritmo MPPT – Método Perturb & Observe (P&O)

La potencia instantánea se expresa en la Ecuación (9).

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}$$

Ec.(9)

La ecuación indica que la potencia del sistema fotovoltaico resulta de multiplicar el voltaje (V_{pv}) por la corriente (I_{pv}), siendo la variable principal que el algoritmo busca maximizar.

La variación de potencia se expresa en la Ecuación (10).

$$\Delta P = PPV - PPV_{anterior}$$

Ec.(10)

La ecuación indica que la variación de potencia (ΔP) resulta de la desigualdad entre la potencia fotovoltaica actual y la potencia registrada en el instante anterior.

La actualización se expresa en la Ecuación (11).

$$PPV_{anterior} = PPV$$

Ec.(11)

La ecuación indica que la potencia actual se asigna como nueva potencia anterior para el siguiente ciclo de cálculo.

Ecuación de desempeño técnico del MPPT

La eficiencia se expresa en la Ecuación (12).

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100 \quad \text{Ec.(12)}$$

La ecuación indica que la eficiencia energética (η) se obtiene dividiendo la potencia de salida entre la potencia de entrada y multiplicando por cien, expresándose en porcentaje.

Ecuación para calcular la energía generada.

La energía generada se calcula mediante la Ecuación (13).

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \cdot \Delta t \quad \text{Ec.(13)}$$

Donde:

E: Energía generada (Wh)

P_i, P_{i+1} : Potencia en los instantes i y $i + 1$ (W)

Δt : Intervalo de muestreo (h)

n: Número total de muestras

La ecuación aplica la regla del trapecio, sumando las potencias en instantes consecutivos y multiplicando por el intervalo de muestreo Δt , para obtener la energía acumulada.

Ecuación para el cálculo de la energía mediante el área bajo la curva

La energía en cada intervalo se calcula mediante la Ecuación (14).

$$E = \frac{(P_i + P_{i+1})}{2} \cdot \Delta t \quad \text{Ec.(14)}$$

- P_i y P_{i+1} corresponden a las potencias en instantes consecutivos
- Δt corresponde al intervalo de muestreo (1 minuto=1/60 h)

La ecuación aplica la regla del trapecio, promediando las potencias en dos instantes consecutivos y multiplicando por el intervalo de muestreo Δt , lo que permite obtener la energía acumulada.

Ecuación para el análisis del rendimiento energético.

El rendimiento energético se calcula mediante la **Ecuación (15)**:

$$\eta = \frac{E_{MPPT} - E_{PWM}}{E_{PWM}} \cdot 100 \quad \text{Ec.(15)}$$

Donde:

$\eta = \text{Rendimiento}$

La ecuación expresa el rendimiento (η) como el porcentaje de mejora de la energía obtenida con MPPT respecto a la energía registrada con PWM, permitiendo cuantificar la eficiencia relativa de ambos reguladores.

4.4 Diagrama de metodología.

En la Figura 33 se muestra el proceso de monitoreo y procesamiento de datos se desarrolló siguiendo una secuencia lógica que permitió garantizar la correcta adquisición, almacenamiento y procesamiento de la información.

4.5 Instrumentos, equipos y software utilizados.

4.5.1 Equipos e instrumentos.

Los equipos e instrumento utilizados para la ejecución del trabajo fueron:

- Regulador de carga tipo MPPT
- Regulador de carga tipo PWM
- Adaptadores de comunicación compatibles con los reguladores
- Computador para la adquisición y almacenamiento de datos
- Sistema fotovoltaico existente

4.5.2 Software de monitoreo.

Para la recopilación de datos se utilizó el software de monitoreo especializado Msiew, el cual permite visualizar en tiempo real y registrar las variables eléctricas de los dos reguladores de carga, como se muestra en la Figura 32. El software fue configurado para almacenar los datos en intervalos definidos, permitiendo su posterior exportación para el análisis.

Device	Variable	Value	Units
TS-MPPT-60 (22170021)	Array Voltage	58.51	V
TS-MPPT-60 (22170021)	Array Current	0.26	A
TS-MPPT-60 (22170021)	Input Power	12.52	W
TS-MPPT-60 (22170021)	Array Pmax(last sweep)	0.00	W
TS-MPPT-60 (22170021)	Array Vmp (last sweep)	45.94	V
TS-MPPT-60 (22170021)	Array Voc (last sweep)	61.72	V
TS-MPPT-60 (22170021)	Battery Voltage	55.04	V
TS-MPPT-60 (22170021)	Battery Voltage(slow)	55.04	V
TS-MPPT-60 (22170021)	Battery Terminal Voltage	55.11	V
TS-MPPT-60 (22170021)	Battery Sense Voltage	55.05	V

Device	Variable	Value	Units
TS-60 (14040905)	Battery Voltage	15.43	V
TS-60 (14040905)	Battery Sense Voltage	15.38	V
TS-60 (14040905)	Array/Load Voltage	10.96	V
TS-60 (14040905)	Charge Current	0.42	A
TS-60 (14040905)	Load Current	0.00	A
TS-60 (14040905)	Battery Voltage (Slow)	15.38	V
TS-60 (14040905)	Heatsink Temperature	26	deg C
TS-60 (14040905)	Battery Temperature	22	deg C
TS-60 (14040905)	Target Voltage	15.39	V
TS-60 (14040905)	Ah (Resettable)	0.50	Ah
TS-60 (14040905)	Ah (Total)	20156.10	Ah
TS-60 (14040905)	Hourmeter	37460	hrs
TS-60 (14040905)	Alarms	no alarms	
TS-60 (14040905)	Settings Switches	OFF/CHFF/ON/ON/OFF/OFF/OFF	
TS-60 (14040905)	Control Mode	Charge	
TS-60 (14040905)	Control State	Equalize	
TS-60 (14040905)	Load State	Equalize	
TS-60 (14040905)	PWM Duty Cycle	7.84	%
TS-60 (14040905)	Kilowatt Hours	983	kWh
TS-60 (14040905)	Minimum Battery Voltage	12.60	V
TS-60 (14040905)	Maximum Battery Voltage	15.41	V

Figura 32. Interfaz del software de monitoreo durante la adquisición de datos.

4.6 Implementación del sistema de monitoreo de datos.

Para obtener información confiable sobre el comportamiento eléctrico de los reguladores de carga, se implementó un sistema de monitoreo adicional al sistema fotovoltaico existente. Este sistema permitió la visualización en tiempo real y el registro automático de las variables eléctricas necesarias para el análisis comparativo del rendimiento energético.

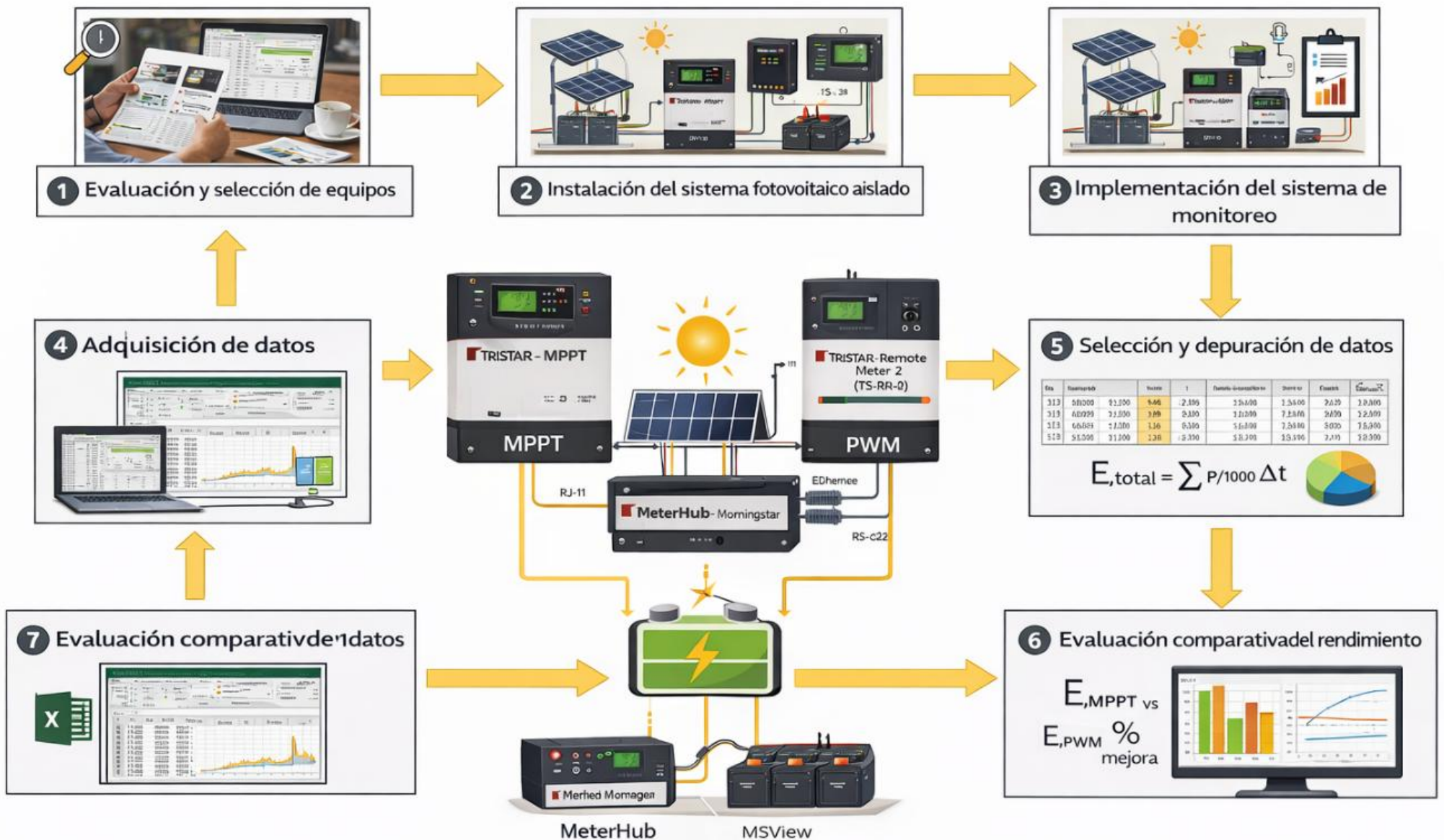


Figura 33. Diagrama de Metodología

Durante la implementación se instaló una pantalla para visualizar los datos del sistema y se incorporó un concentrador de comunicaciones (MeterHub), como se muestra en la Figura 34 que permitió reunir en un solo punto la información generada por ambos reguladores de carga.



Figura 34. Pantalla de monitoreo de datos instalada en el sistema fotovoltaico.

4.7 Integración del MeterHub y arquitectura de comunicación.

Para la adquisición de datos, se instaló un dispositivo MeterHub que permitió la comunicación simultánea con los reguladores de carga MPPT y PWM. Debido a las características de cada regulador, se emplearon diferentes interfaces de comunicación para su respectiva comunicación y monitoreo, cuyo esquema se indica en la Figura 35.



Figura 35. Esquema de comunicación del sistema de monitoreo mediante MeterHub.

El regulador de carga MPPT fue conectado directamente al computador mediante un enlace Ethernet, lo que permitió una transmisión de datos estable y de alta velocidad. Por otro lado, el regulador PWM fue conectado utilizando el protocolo de comunicación RS-232 Debido a las limitaciones propias del equipo expuestas en el **Anexo B**.

Ambos reguladores fueron reconocidos correctamente por el sistema de monitoreo, permitiendo la lectura y registro continuo de las variables eléctricas.

La Tabla 7 muestra los protocolos de comunicación y el medio físico utilizado por cada regulador. El MPPT emplea Ethernet (cable de red) y el PWM utiliza RS-232 (cable serial).

Tabla 7. Protocolos de comunicación utilizados por cada regulador.

Regulador	Protocolo	Medio físico
MPPT	Ethernet	Cable de red
PWM	RS-232	Cable serial

4.8 Configuración del sistema de recopilación de datos.

Ya establecida la comunicación de los reguladores y el sistema de monitoreo, se realizó la configuración del software de adquisición de datos. Se definieron los parámetros de medición, el intervalo de muestreo y el formato de almacenamiento de la información.

El sistema fue configurado para registrar de manera automática las variables eléctricas de voltaje, corriente, potencia y energía acumulada, como se muestra en la Figura 36, generando archivos digitales para su posterior procesamiento y análisis.

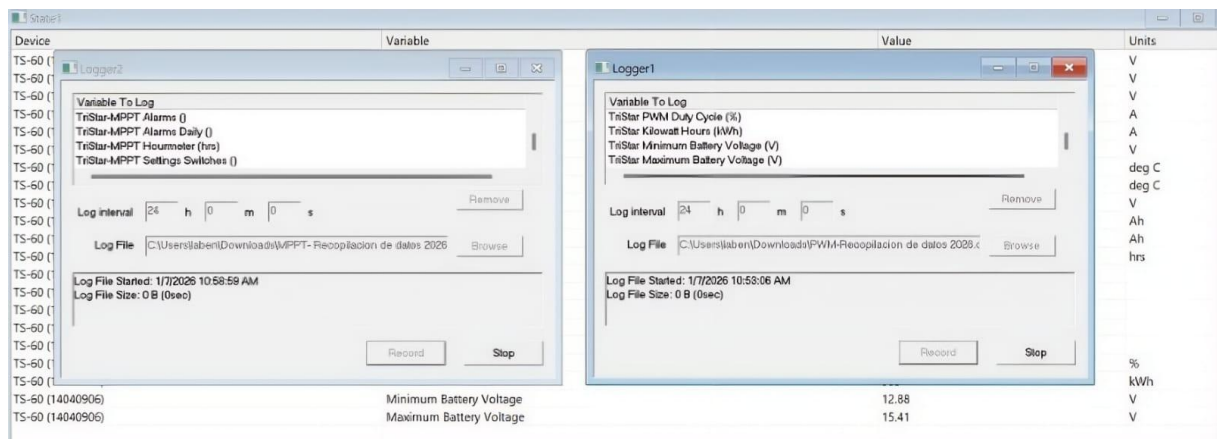


Figura 36. Configuración del registro automático de datos en el software de monitoreo.

4.9 Metodología de pruebas experimentales

Las pruebas experimentales se realizaron en dos etapas diferenciadas, con el motivo de analizar el comportamiento de los controladores bajo diferentes condiciones de operación.

4.9.1 Prueba y adquisición de datos sin carga.

Durante la primera etapa, el sistema fotovoltaico operó sin cargas conectadas durante un período de dos días. Esta condición permitió evaluar el comportamiento base de los reguladores de carga, observando la gestión de las variables entregadas y el proceso de carga de las baterías sin interferencia de consumo externo.

Los datos registrados en esta etapa sirvieron como referencia para identificar todos los datos del rendimiento energético de cada regulador en condiciones de baja demanda, como se muestra en el Anexo H.

4.9.2 Pruebas de adquisición de datos con carga.

En la segunda etapa experimental, se procedió a la conexión de cargas eléctricas al sistema fotovoltaico, con el fin de generar variaciones en los parámetros eléctricos y evaluar la respuesta de los reguladores ante condiciones reales de consumo, como se indica en la Figura 37.

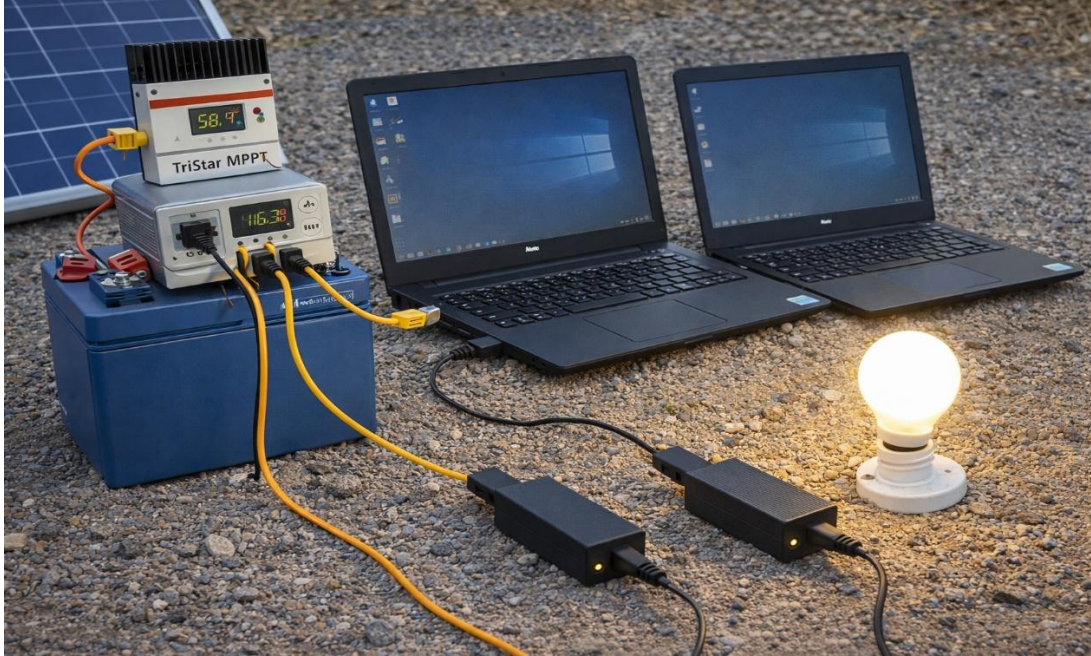


Figura 37. Sistema solar durante la conexión de cargas eléctricas.

Las cargas fueron conectadas de manera controlada, permitiendo observar los cambios en voltaje, corriente, potencia y energía entregada por cada regulador. Esta etapa permitió analizar el desempeño dinámico de los reguladores bajo demanda energética lo que se puede indicar en el Anexo G.

La Tabla 8 muestra las cargas utilizadas en las pruebas y su potencia total, alcanzando una demanda conjunta de 230 W.

Tabla 8. Descripción de las cargas conectadas durante las pruebas.

CARGA	CANTIDAD	POTENCIA UNITARIA (W)	POTENCIA TOTAL (W)	TIPO DE CARGA	OBSERVACIONES
Laptop con cargador	2	65	130	Electrónica	Carga variable según estado de batería.

Foco incandescente	1	100	100	Resistiva	Carga constante.
Total			230 W		Potencia total demandada al sistema.

4.10 Métodos de procesamiento y análisis de datos.

Una vez obtenidos los registros eléctricos, los datos fueron exportados a hojas de cálculo para su procesamiento. Se realizaron cálculos de energía acumulada, promedios de potencia y comparaciones entre ambos reguladores.

El análisis se apoyó en la elaboración de tablas y gráficos comparativos que permitieron visualizar las diferencias de rendimiento energético entre los reguladores MPPT y PWM.

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En este capítulo se presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos como resultado del procesamiento de datos registrados por los reguladores de Carga MPPT y PWM instalados en el sistema fotovoltaico del proyecto de eficiencia energética DIRGI-CP2021-008 de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

El análisis fundamenta exclusivamente el tratamiento de datos experimentales reales adquiridos, mediante el sistema de monitoreo implementado, sin realizar simulaciones ni modificaciones físicas adicionales al sistema. Los datos corresponden a registros de tensión, corriente, potencia y energía obtenidos a intervalos regulares de un minuto, bajo distintas condiciones de operación del sistema fotovoltaico.

Debido a las características propias del sistema de adquisición de datos y al comportamiento interno de los reguladores, fue necesario aplicar distintos métodos de procesamiento para el regulador MPPT y para el regulador PWM. En particular, se identificó que ciertas variables reportadas por el sistema no presentaban variación temporal, lo que impidió su utilización directa para el cálculo del rendimiento energético. En consecuencia, se recurrió al cálculo de energía mediante el método de trapecio, garantizando así un análisis consistente y comparable entre ambas tecnologías.

Los resultados se presentan mediante tablas resumidas y gráficos comparativos, organizados por regulador y por periodo de tiempo con el motivo de facilitar la interpretación del comportamiento energético de cada dispositivo.

5.1 Análisis de datos registrados por el sistema de monitoreo

5.1.1 Descripción general de los datos adquiridos

Los datos analizados en este capítulo fueron obtenidos a través del sistema de Monitoreo conformado por el MeterHub de MorningStar, la pantalla remota TS-RM-2 y el software de adquisición de datos, utilizando comunicación Ethernet para el regulador MPPT y comunicación RS-232 para el regulador PWM.

El sistema permitió registrar entre otros los siguientes parámetros eléctricos:

- Tensión de entrada del generador fotovoltaico
- Corriente de entrada del generador fotovoltaico
- Tensión de salida hacia el Banco de baterías
- Corriente de salida hacia el Banco de baterías
- Energía Acumulada y variables auxiliares del sistema
- Estado de carga del regulador

Los registros se realizaron con un intervalo temporal de un minuto, lo que generó una base de datos extensa, con más de 545 variables diarios por regulador.

La Tabla 9 presenta las variables eléctricas registradas por los reguladores MPPT y PWM durante el monitoreo, incluyendo tiempo, voltajes y corrientes tanto del arreglo fotovoltaico como de la batería, permitiendo comparar su comportamiento operativo.

Tabla 9. Variables eléctricas registradas por los reguladores MPPT y PWM.

REGULADOR MPPT	REGULADOR PWM
Time (UTC)	Time (UTC)
TriStar-MPPT Array Voltage (V)	TriStar Array/Load Voltage (V)
TriStar-MPPT Array Current (A)	TriStar Charge Current (A)

TriStar-MPPT Battery Voltage (V)	TriStar Battery Voltage (V)
TriStar-MPPT Battery Current (A)	TriStar Charge Current (A)

5.2 Criterios adoptados para el procesamiento de los datos

5.2.1 Limitaciones en el uso de la potencia directa registrada

Durante el análisis preliminar de los datos, se observó que las variables correspondientes a potencia de entrada y potencia de salida, reportadas por el sistema de monitoreo, permanecían constantes en el tiempo, sin presentar variaciones a nivel horario ni por minuto.

Este comportamiento imposibilitó el uso directo de dichas variables para el cálculo del rendimiento energético, ya que un valor constante no representa el comportamiento real del sistema fotovoltaico, el cual está sujeto a variaciones de irradiancia, temperatura y estado de carga de las baterías.

Por este motivo, se descartó el uso de la potencia directa proporcionada por los reguladores y se optó por calcular la potencia y la energía a partir de los valores entregados de tensión y corriente.

5.2.2 Cálculo de potencia entrada y salida

- Regulador MPPT

La potencia de entrada y salida del regulador MPPT se determinó a partir de los valores de tensión y corrientes registrados por el sistema de monitoreo del regulador. Para evitar utilizar los valores de potencia calculados internamente por el equipo, se realizó el cálculo mediante la ecuación fundamental de potencia eléctrica, según la expresión de la Ecuación (1).

La potencia de entrada se obtuvo utilizando el voltaje y la corriente provenientes del arreglo fotovoltaico, mientras que la potencia de salida se calculó utilizando el voltaje de batería y la corriente de carga el controlador.

La Tabla 10 presenta los datos de tensión y corriente del arreglo solar registrados por el regulador MPPT, así como la potencia calculada a partir de estas variables en distintos instantes de tiempo. Los datos permiten observar la variación progresiva de los parámetros eléctricos durante el intervalo analizado.

Tabla 10. Valores de tensión, corriente y potencia calculada del regulador MPPT.

Time (UTC)	TriStar-MPPT Array Voltage (V)	TriStar-MPPT Array Current (A)	Potencia Calculada (W)
6:38	52.17	0.12	626.04
6:39	52.21	0.15	783.15
6:40	52.27	0.12	627.24
6:41	52.31	0.14	732.34
6:42	52.35	0.17	889.95
6:43	52.41	0.19	995.79
6:44	52.47	0.21	1101.87
6:45	52.52	0.23	1207.96
6:46	52.57	0.23	1209.11

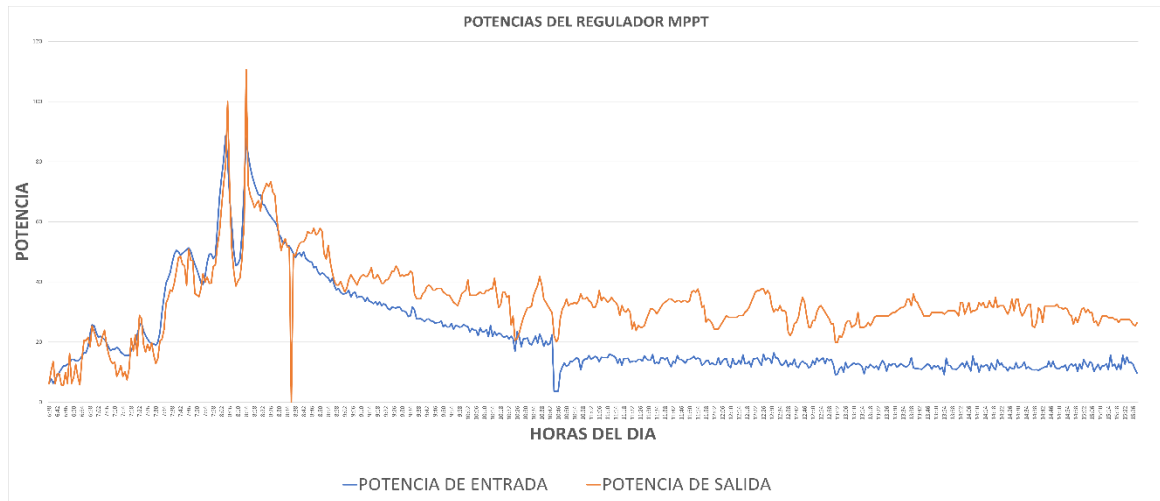


Figura 38. Potencia de entrada y potencia de salida del regulador MPPT en función del tiempo.

La Figura 38 indica el comportamiento de la potencia de entrada y salida del regulador MPPT en el periodo de monitoreo. En el eje horizontal se representa el tiempo de monitoreo durante las horas del día, mientras que en el eje vertical se muestra la potencia registrada en el sistema.

La línea azul representa la potencia de entrada proveniente del generador fotovoltaico hacia el regulador MPPT, mientras que la línea color tomate representa la potencia de salida entregada por el regulador hacia el banco de baterías.

Durante las primeras horas del monitoreo se observa un incremento progresivo de ambas potencias, lo cual se debe al aumento de la irradiancia solar a medida que avanza la mañana, permitiendo que los módulos fotovoltaicos generen una mayor cantidad de energía. En este periodo se registran valores máximos de potencia, donde el regulador MPPT opera cerca del punto de máxima potencia del generador fotovoltaico.

- Regulador PWM.

En el caso del regulador PWM, el comportamiento eléctrico es más estable, dado que la atención del generador fotovoltaico se acopla directamente al nivel de tensión del Banco de batería, como se indica en la Figura 39. Por esta razón, la potencia de entrada y de salida fue calculada a partir de valores instantáneos de tensión y corriente, mediante la expresión de la Ecuación (1).

La Tabla 11 presenta los valores de tensión y corriente registrados por el regulador PWM en distintos instantes de tiempo, así como la potencia calculada correspondiente, permitiendo observar el comportamiento eléctrico del sistema durante el periodo evaluado.

Tabla 11. Valores de tensión, corriente y potencia del regulador PWM.

Time (UTC)	TriStar Array/Load Voltage (V)	TriStar Charge Current (A)	Potencia Calculada (W)
6:38	12.98	0.2	2.596

6:39	13.08	0.2	2.616
6:40	13.11	0.26	3.4086
6:41	13.11	0.26	3.4086
6:42	13.52	0.3	4.056
6:43	13.11	0.4	5.244
6:44	13.12	0.4	5.248
6:45	13.25	0.46	6.095
6:46	13.25	0.46	6.095

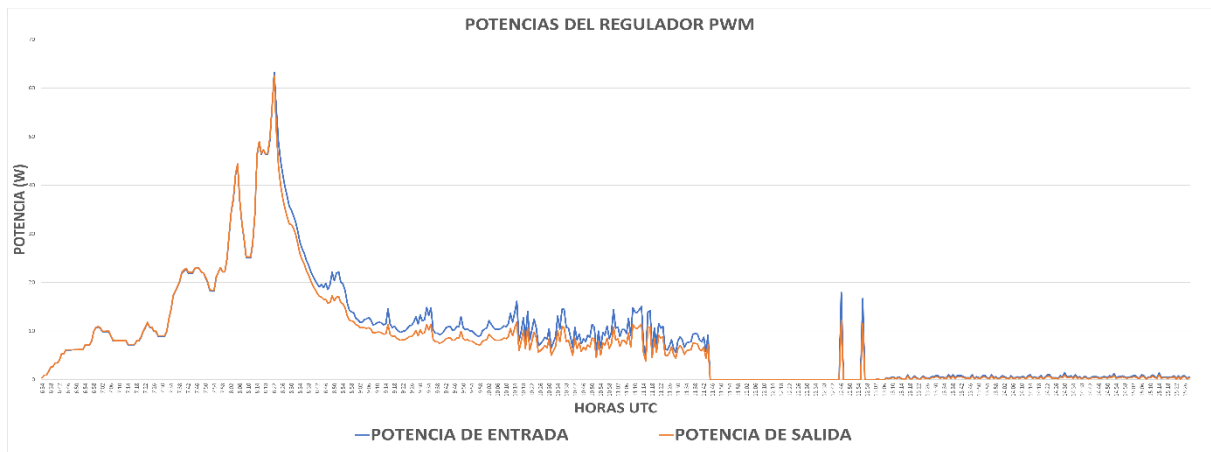


Figura 39. Potencia de entrada y potencia de salida del regulador PWM.

La figura 39 representa el comportamiento de la potencia de entrada y potencia de salida del regulador PWM durante el periodo de monitoreo. La línea azul corresponde a la potencia de entrada proveniente del generador fotovoltaico hacia el regulador PWM, mientras que la línea naranja representa la potencia de salida entregada por el regulador hacia el banco de baterías.

En la gráfica se puede observar que la potencia de entrada como la de salida presentan valores muy similares, lo cual es característico del funcionamiento de los reguladores PWM. Este tipo de regulador no transforma el voltaje ni optimiza el punto de operación del panel, sino que conecta el generador fotovoltaico directamente al banco de baterías mediante pulsos de conmutación.

5.3 Cálculo de la energía mediante el área bajo la curva

5.3.1 Método aplicado

En este apartado la energía eléctrica se obtiene aplicando la regla del trapecio, que permite calcular el área bajo la curva de potencia en función del tiempo. Este método resulta adecuado para datos discretos con intervalos de muestreo constantes, expresada en la Ecuación (14).

En la Tabla 12 se indica los datos de potencia de entrada calculada y la energía de entrada obtenida mediante la regla del trapecio para cada intervalo de tiempo, permitiendo estimar la energía generada en cada minuto analizado.

Tabla 12. Cálculo de energía por intervalo de tiempo.

Time (UTC)	Potencia Calculada (W)	Energía por trapecio (Wh)
6:38	6.2184	0.1382533
6:39	10.372	0.198905
6:40	13.4966	0.164421
6:41	6.234	0.12995
6:42	9.36	0.15609
6:43	9.3708	0.125866
6:44	5.7332	0.09559
6:45	5.7376	0.130495
6:46	9.9218	0.134951

En la Figura 40 se indica la variación de la potencia generada por el sistema fotovoltaico durante el intervalo comprendido entre la 6:00 y las 7:00 de la mañana utilizando el regulador MPPT.

Se observa que en los primeros minutos de la gráfica la potencia generada es nula, lo cual se debe a las condiciones iniciales del clima que generan una baja irradiancia solar durante las primeras horas del día.

El área marcada bajo la curva indica la energía que genera el regulador MPPT durante este periodo de tiempo. Para el cálculo de la energía producida por el regulador se considera la

integral de la potencia respecto al tiempo, es decir, el área comprendida entre la curva de potencia y el eje del tiempo.

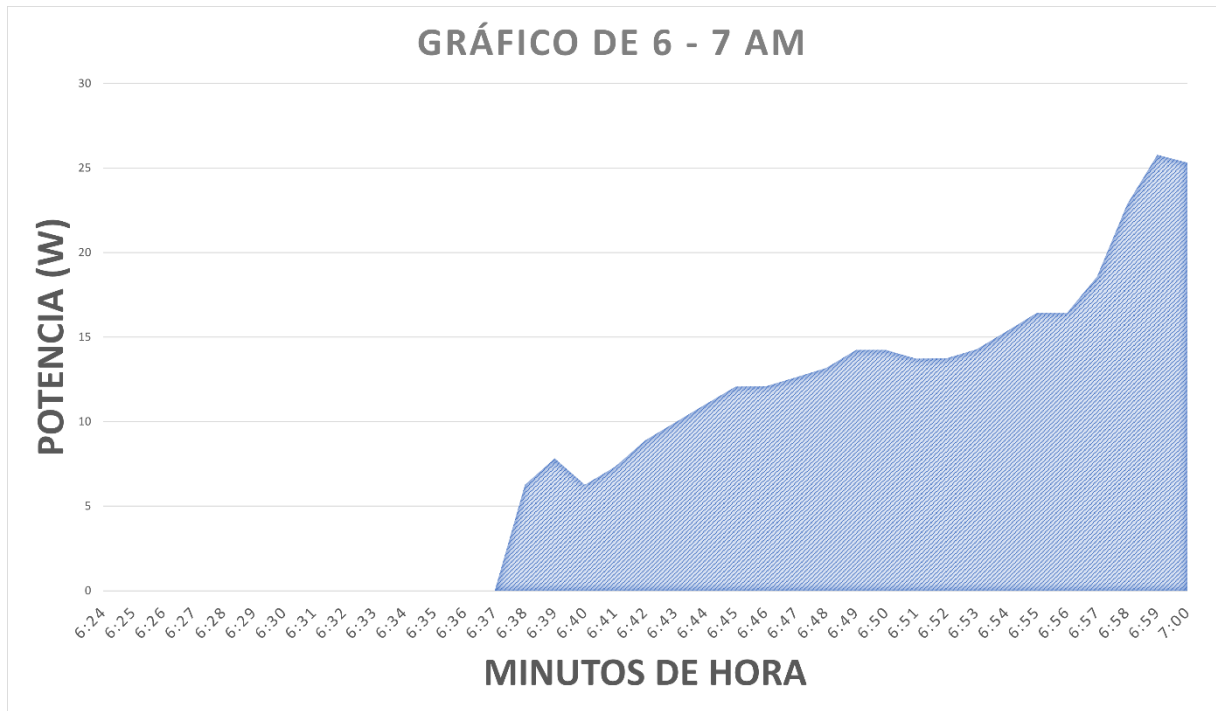


Figura 40. Energía genera entre las 6 y 7 AM por el MPPT.

La Figura 41 la variación de potencia que genera el sistema fotovoltaico utilizando el regulador PWM durante el intervalo de tiempo determinado.

Los primeros minutos del intervalo que se está analizando se observa que la potencia generada es de cero, lo que corresponde a las condiciones de baja irradiancia solar presentes al inicio de las mañanas. A medida que el sol va saliendo aumenta la radiación solar sobre los paneles fotovoltaicos, la potencia generada por el sistema comienza a incrementarse de manera progresiva.

El área marcada bajo la curva corresponde a la energía generada durante el intervalo de tiempo analizado. Para determinar esta energía se considera el área bajo la curva de potencia en función del tiempo, lo cual permite estimar la energía producida por el sistema.

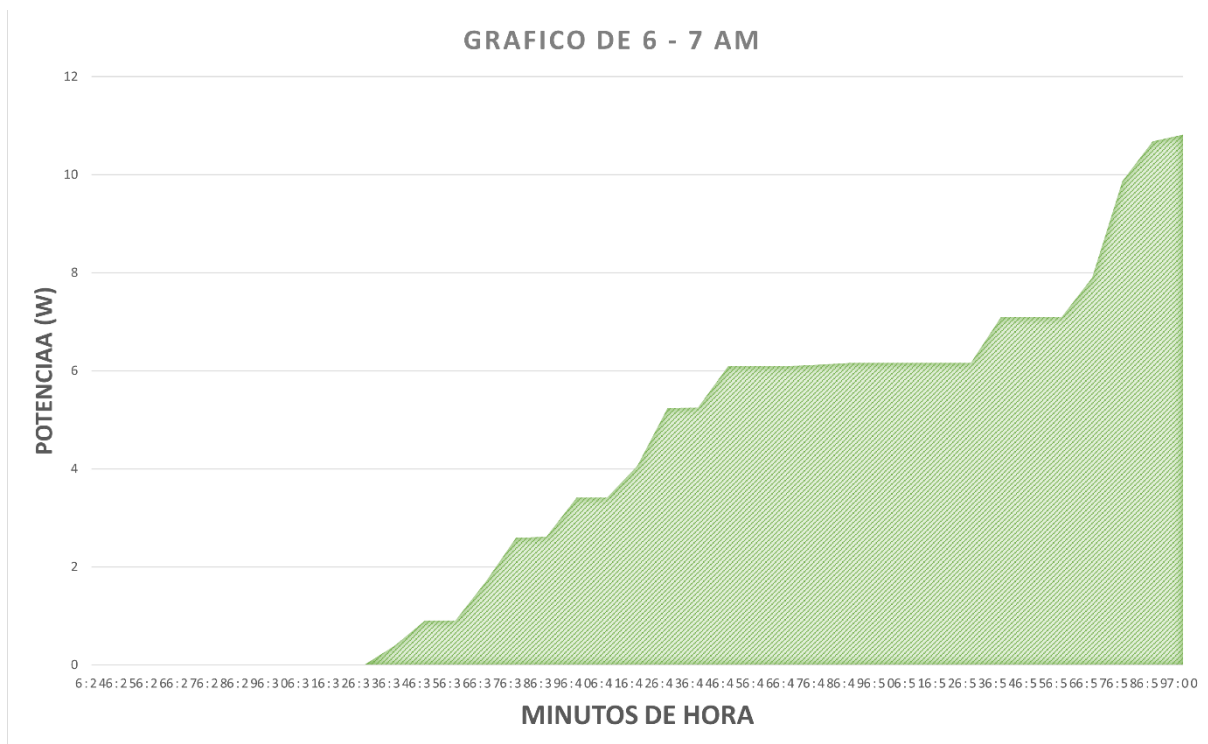


Figura 41. Energía generada entre las 6 y 7 AM por el PWM,

5.3.2 Energía acumulada diaria

Una vez calculada la energía por intervalo, se procedió a la sumatoria de los valores para obtener la energía acumulada diaria de cada regulador.

La Tabla 13 presenta las energías totales diarias de entrada y salida de los reguladores MPPT y PWM, permitiendo comparar el desempeño energético de ambos dispositivos.

Tabla 13. Energías totales diarias de entrada y salida de los reguladores MPPT y PWM.

Regulador MPPT	
Entrada Total	Salida Total
199.697 Wh	295.625 Wh
Regulador PWM	
Entrada Total	Salida Total
77.788 Wh	69.425 Wh

La Figura 42, indica la comparación de la energía diaria de entrada de los reguladores MPPT y PWM, donde se puede notar que el MPPT aprovecha mejor la energía durante el día.

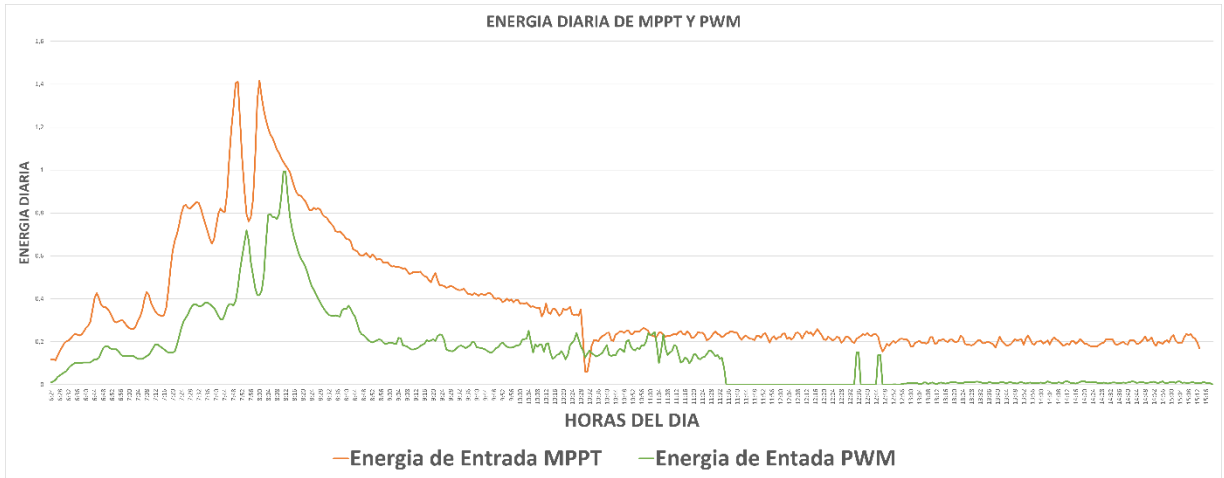


Figura 42. Comparación de energía diaria generada por los reguladores MPPT y PWM.

La Fig. 43 indica el comportamiento de la energía diaria de salida de los reguladores MPPT y PWM, donde se puede notar que el MPPT entrega de mejor manera la energía durante el día.

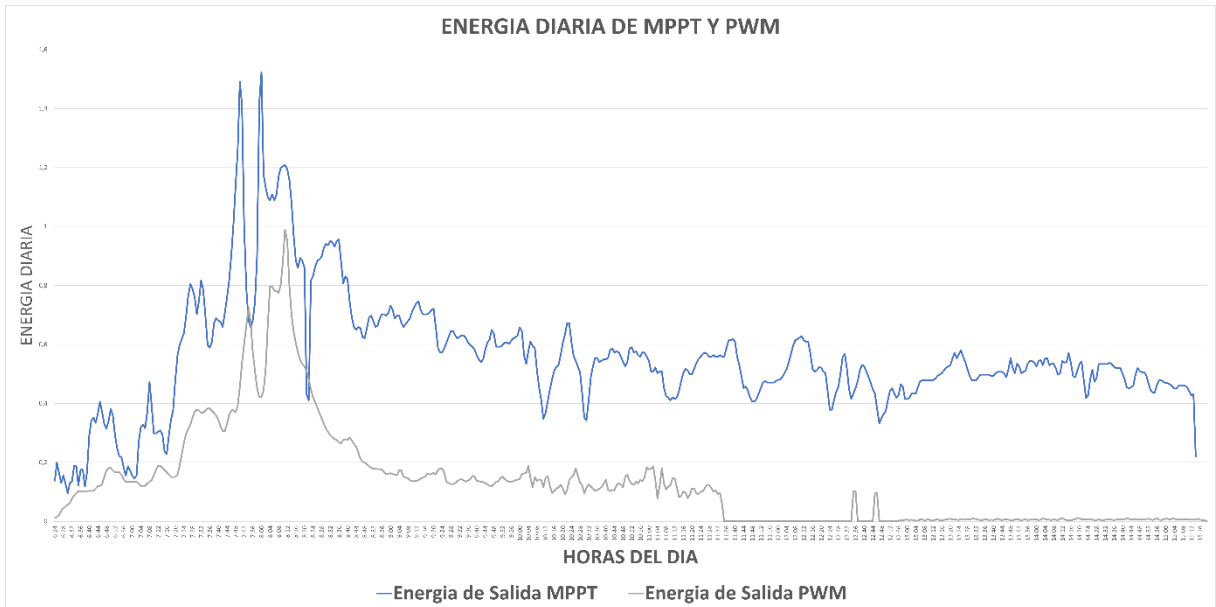


Figura 43. Comparación de energía diaria entrada por los reguladores MPPT y PWM.

5.4 Análisis del rendimiento energético

Para realizar el análisis del rendimiento energético se consideró el proceso de carga de las baterías del sistema fotovoltaico, el cual se desarrolla en varias etapas controladas por el regulador.

El rendimiento energético del regulador se determina comparando la energía de entrada proveniente de un generador fotovoltaico con tecnología MPPT frente a la obtenida con un generador PWM. Este indicador permite evaluar de manera objetiva la eficiencia real de cada tecnología bajo condiciones de operación, como se presentó en la Ecuación (15).

La Tabla 14 muestra la energía de entrada del regulador MPPT y PWM y el rendimiento total de los dos reguladores MPPT y PWM, permitiendo comparar su desempeño. Asimismo, la Figura 42, presenta de forma gráfica el porcentaje de rendimiento de ambos reguladores, donde se observa que el PWM alcanza un mayor valor en comparación con el MPPT.

Tabla 14. Rendimiento energético diario del regulador MPPT y PWM.

REGULADORES	TOTAL
Energía total de entrada MPPT	52,60984833 Wh
Energía total de entrada PWM	30.224205 Wh
Rendimiento total %	74,06528421 %

La Figura 44 indica la comparación de la energía de entrada registrada en los reguladores MPPT y PWM durante el periodo de monitoreo, considerando únicamente los datos correspondientes al estado de carga del Banco de baterías. En el eje horizontal se representa el tiempo de monitoreo, mientras que en el eje vertical se muestra la energía de entrada registrada en cada intervalo.

La curva azul corresponde a la energía de entrada del regulador MPPT, mientras que la curva naranja representa la energía de entrada del regulador PWM. Se observa que, durante la mayor parte del intervalo analizado, el regulador MPPT presenta valores superiores de energía en comparación con el regulador PWM.

Este comportamiento se debe a que los reguladores MPPT emplean algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia de la célula fotovoltaica, lo que les permite ajustar continuamente las condiciones de operación del panel para extraer la máxima potencia disponible. En

contraste, los reguladores PWM operan a un voltaje más cercano al del Banco de Baterías, lo que puede limitar el aprovechamiento de la energía entregada por los paneles.

Además, se aprecia que ambas curvas presentan variaciones a lo largo del tiempo de monitoreo, las cual es están asociadas principalmente a cambios en las condiciones de irradiancia solar y temperatura del sistema fotovoltaico. No obstante, la tendencia general muestra que el regulador de MPPT mantiene un mayor nivel de captación energética durante el proceso de carga del Banco de baterías.

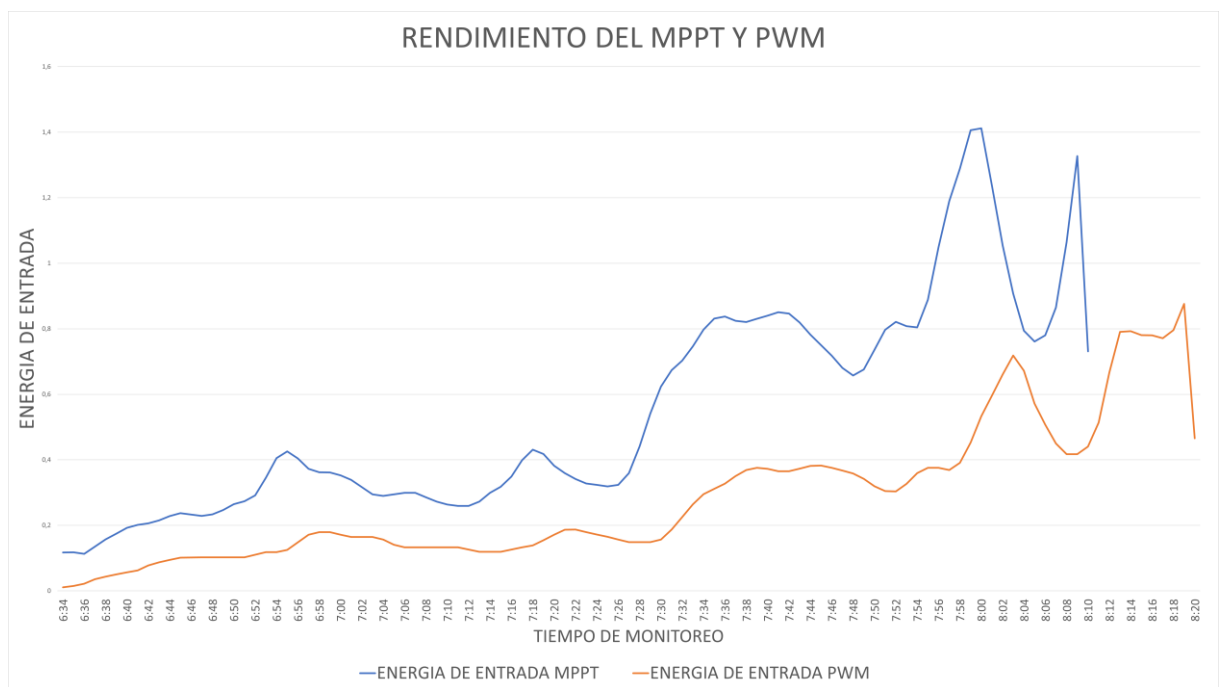


Figura 44. Rendimiento del MPPT y PWM.

La Figura 45 indica la comparación de la energía de entrada registrada en los reguladores MPPT y PWM durante el proceso de carga de las baterías del sistema fotovoltaico.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el regulador MPPT registró una energía de entrada de 52,0984833 (Wh), mientras que el regulador PWM presentó una energía de entrada de 30,24205 (Wh). Estos valores se evidencian una diferencia significativa en la capacidad de captación de energía entre ambas tecnologías.

El mayor valor de energía registrado en el regulador MPPT se debe a su capacidad de seguir el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico, lo que le ayuda a ajustar continuamente las condiciones de operación del panel para aprovechar de manera más eficiente la energía disponible. Por el contrario, el regulador PWM opera un voltaje más cercano al del Banco de

baterías, lo cual limita el aprovechamiento de la potencia máxima que pueden entregar los módulos fotovoltaicos.

A partir de estos resultados se determinó un rendimiento energético del 74,06 %, lo que indica que el regulador MPPT permite captar una mayor cantidad de energía del generador fotovoltaico en comparación con el regulador PWM bajo las mismas condiciones de operación.

Estos resultados confirman que el uso de reguladores con tecnología MPPT mejora el aprovechamiento energético del sistema fotovoltaico especialmente durante el proceso de carga del Banco de baterías.

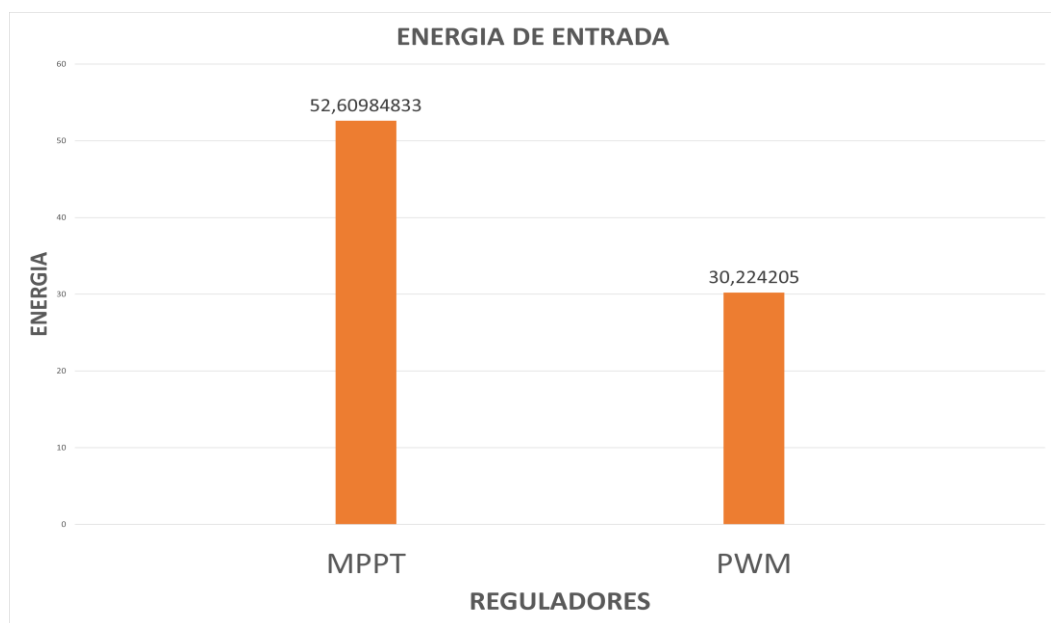


Figura 45. Comparación del rendimiento energético entre reguladores MPPT y PWM.

5.5 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos evidencian diferencias en el comportamiento energético de los reguladores MPPT y PWM, estas diferencias se deben principalmente a la manera en que cada regulador funciona y a cómo administra la energía que recibe del panel fotovoltaico.

El regulador MPPT mostró una mayor adaptación frente a las variaciones de las condiciones de operación, lo cual se refleja en una mayor energía aprovechada en determinados períodos del día. Sin embargo, esta ventaja requiere un tratamiento más cuidadoso de los datos, debido a que sus valores eléctricos cambian constantemente.

Por su parte, el regulador PWM presentó un comportamiento más estable, aunque con una menor capacidad de optimización energética, especialmente en situaciones donde el voltaje generado por el panel solar es muy diferente al voltaje del banco de baterías.

El análisis confirma que la simple observación de valores instantáneos o acumulados reportados por el sistema no es suficiente para evaluar el rendimiento real de los reguladores, siendo indispensable un procesamiento adecuado de los datos experimentales.

ANÁLISIS DE COMPARACIÓN ECONÓMICA Y TÉCNICA

En términos económicos, el regulador MPPT resulta más rentable en sistemas fotovoltaicos de mediana y gran capacidad (generalmente superiores a 500 Wp), mientras que el PWM es recomendable en instalaciones pequeñas y de bajo costo, donde la simplicidad y el ahorro inicial pesan más que la eficiencia, en la Tabla 15, se presentan las comparaciones entre los reguladores **PWM** y **MPPT**, considerando aspectos técnicos, económicos y de eficiencia. Esta síntesis permite identificar las condiciones en las que cada tecnología resulta más recomendable y hasta qué capacidad es más rentable su aplicación.

Tabla 15. Comparación económica y técnica.

ASPECTO	REGULADOR PWM	REGULADOR MPPT
Costo Inicial	Bajo (30–50% menos que un MPPT)	Alto (puede duplicar el costo de un PWM)
Eficiencia energética	70–80% aproximadamente	95–99% (hasta 30% más energía)
Condiciones recomendadas	Sistemas pequeños (iluminación rural, cargas básicas, ≤ 500 Wp)	Sistemas medianos y grandes (> 500 Wp), donde se busca maximizar energía
Retorno de inversión	No aplica, ahorro inicial, pero pérdidas energéticas a largo plazo	2–3 años típicamente, gracias al incremento de energía captada

Complejidad	Simple, fácil de instalar	Mayor complejidad, requiere convertidor DC-DC y algoritmos de seguimiento
Rentabilidad máxima	Hasta ~500 Wp, más allá las pérdidas superan el ahorro inicial	A partir de ~500 Wp, especialmente en sistemas >1 kWp

Análisis económico por condiciones

PWM: Recomendado en sistemas pequeños y de bajo presupuesto, como viviendas rurales con consumos básicos (iluminación, radio, carga de celulares). Su bajo costo inicial lo hace atractivo, pero en sistemas mayores las pérdidas energéticas acumuladas superan el ahorro inicial.

MPPT: Recomendado en sistemas medianos y grandes, donde el incremento de eficiencia compensa rápidamente el mayor costo. Ideal en condiciones de irradiancia variable (nubes, cambios de temperatura), porque ajusta dinámicamente el punto de máxima potencia. En sistemas de más de 500 Wp, el MPPT se vuelve más rentable, y en instalaciones de varios kWp es prácticamente indispensable.

5.6 Síntesis del capítulo

El análisis desarrollado permitió cumplir con los objetivos planteados en el trabajo de titulación, demostrando que el procesamiento adecuado de los datos registrados es fundamental para evaluar el rendimiento energético de los reguladores de carga MPT y PWM. El uso del método del área bajo la curva garantizó resultados consistentes y comparables, aportando criterios técnicos válidos para la evaluación de tecnologías de gestión de energía en sistemas fotovoltaicos aislados.

5.7 Presupuesto referencial

El presupuesto del proyecto muestra una estimación de todos los recursos económicos que se necesitaron para la implementación del sistema de seguimiento y evaluación del rendimiento de los dos reguladores de carga MPPT y PWM en el sistema fotovoltaico del proyecto de eficiencia energética DIRGI-CP2021-008.

Para una mejor organización, el presupuesto se clasifica en tres categorías principales: gastos de personal, gastos de ejecución y costos indirectos.

5.7.1 Gastos de personal

La Tabla 16 presenta los gastos personales corresponden a todos los recursos humanos que se involucró tras el desarrollo de la tesis. En este caso, se incluyó todo el tiempo que se dedicó a la fase de investigación, diseño de la red de comunicación y la realización de pruebas de funcionamiento.

Tabla 16. Gastos Personales

GATOS PERSONALES

Mano de obra

Detalle	Horas de Trabajo	Precio por unidad	Total
Diseño de red de comunicación	46	\$ 2.98	\$ 274.16
Implementación	36	\$ 2.98	\$ 214.56
Prueba de funcionamiento	40	\$ 2.98	\$ 238.40
Total			\$ 727.12

5.7.2 Gastos de ejecución

Estos gastos comprenden a la compra de los materiales, equipos y dispositivos necesarios para la ejecución del sistema de monitoreo del sistema fotovoltaico. Estos elementos son lo que permiten la comunicación entre los controladores solares, el registro de datos y el análisis del comportamiento de los reguladores durante el funcionamiento del sistema.

Tabla 17. Gastos Adquisición.

GASTOS DE EJECUCIÓN

Obtención de Bienes

Detalle	Cantidad	Precio unitario	IVA	Total
MorningStar MeterHunb (HUB-1)	1	\$ 109.47	\$ 13.14	\$ 122.61

MorningStar Tristar Remote Meter-2 (TS-RM-2)	1	\$ 130	\$ 15.60	\$ 145.60
Conectores DB9 macho	10	\$ 15.98	\$ 1.92	\$ 17.90
Conectores DB9 hembra	10	\$ 14.98	\$ 1.80	\$ 16.78
TOTAL				\$ 302.89

5.7.3 Gastos de contratación de servicios

Estos corresponden a los costos referente a la contratación de servicios externos que son indispensables para el desarrollo del proyecto.

Tabla 18. Gastos de contratación de servicios.

Contratación de Servicios

Detalle	TOTAL
Servicio de Courier internacional	\$ 27.73
Gestión aduanera e importación	\$ 21.22
Servicio de Courier internacional	\$ 11.38
Gestión aduanera e importación	\$ 20.16
TOTAL	\$ 80.49

5.7.4 Gastos indirectos

Los costos indirectos corresponden a gastos generales que son necesarios para el óptimo desarrollo del proyecto, pero que no se encuentran directamente vinculado con la compra de equipos o materiales.

Tabla 19. Gastos Indirectos.

GASTOS INDIRECTOS

DETALLE	TOTAL
Transporte	\$ 135.00
Alimentación	\$ 90.00
TOTAL	\$ 225.00

Tabla 20. Presupuesto global del proyecto.

PRESUPUESTO GLOBAL DEL PROYECTO

RUBRO	TOTAL
GASTOS DEL PERSONAL	\$ 727.12
GASTOS DE EJECUCION	383.38
GASTOS INDIRECTOS	\$ 225.00
TOTAL	\$ 1335.5

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se desarrollo un sistema de monitoreo para el sistema fotovoltaico del proyecto DIRGI-CP2021-008 mediante la instalación del dispositivo MeterHub, la configuración de comunicación Ethernet para el regulador MPPT y RS-232 para el regulador PWM, además de una pantalla de visualización de datos. El sistema fotovoltaico analizado está conformado por 4 paneles solares con una potencia de 140 W cada uno, conectados a un banco de baterías de 12 V, con un conjunto de 4 baterías repartidas de forma independiente para cada regulador. La implementación del sistema permitió registrar en tiempo real variables eléctricas como voltaje, corriente, potencia y energía, facilitando la adquisición de información confiable para el análisis del desempeño energético del sistema.
- Durante el proceso de monitoreo se registraron aproximadamente 545 datos eléctricos, obtenidos durante tres días de operación del sistema fotovoltaico en un intervalo de tiempo comprendido entre las 6:00 y las 16:00 horas, con un intervalo de registro de un minuto entre cada medición. A partir de estos datos se determinaron valores promedio de operación del sistema, obteniendo un voltaje promedio de 18,32 V, una corriente promedio de 0,52 A y una potencia promedio de 8,70 W, valores que permitieron caracterizar el comportamiento eléctrico del sistema durante el periodo de análisis.
- El cálculo de la energía entregada por cada regulador se realizó mediante el método de trapecio de potencia en función del tiempo, aplicando la regla de trapecio utilizando hojas de cálculo en Microsoft Excel. A partir de este procedimiento se obtuvo una

energía total de entrada de 52,61 Wh para el regulador MPPT y 30,22 Wh para el regulador PWM, lo que representa una diferencia energética de aproximadamente 22,39 Wh entre ambos reguladores. Además, durante el procesamiento de los datos se registró un valor máximo de energía instantánea a de 0,9525 Wh y un valor mínimo de 0 Wh, lo cual permitió establecer los rangos de variación energética del sistema durante el periodo de monitoreo.

- El análisis comparativo del rendimiento energético permitió determinar un rendimiento aproximado del 70,07 %, evidenciando que el regulador MPPT presenta un mayor aprovechamiento de la energía proveniente del generador fotovoltaico en comparación con el regulador PWM. Esta diferencia se debe principalmente al principio de funcionamiento de cada tecnología, ya que el regulador PWM conecta directamente el panel fotovoltaico al banco de baterías, limitando el voltaje del panel al voltaje de las baterías, mientras que el regulador MPPT emplea un convertidos DC-DC y algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPP), permitiendo que el generador fotovoltaico opere cerca de su punto óptimo de generación y aumentando el aprovechamiento energético del sistema.

6.2 Recomendaciones

- A futuro se recomienda implementar un sistema de monitoreo remoto basado en plataformas web o aplicaciones móviles, que permitan visualizar en tiempo real los parámetros eléctricos del sistema fotovoltaico, tales como voltaje, corriente, potencia y energía generada. Esta implementación facilitará la supervisión del sistema desde cualquier ubicación y permitirá detectar oportunamente posibles anomalías en su funcionamiento.
- Se recomienda implementar un sistema de almacenamiento y respaldo automático de los datos de monitoreo, utilizando servidores locales o plataformas en la nube, con el fin de preservar la información histórica del sistema y facilitar futuros análisis comparativos del rendimiento energético.
- Para futuros estudios, se sugiere integrar equipos de medición de eficiencia energética o analizadores de potencia, los cuales permitirán realizar evaluaciones más detalladas del comportamiento eléctrico de los reguladores de carga MPPT y PWM bajo diferentes condiciones de operación.

7 REFERENCIAS

- [1] Operador Nacional de Electricidad - CENACE, «Informe Anual 2024», CENACE, Quito - Ecuador, abr. 2025. [En línea]. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cenace.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/04/Informe-Anual-CENACE-2024-vf-1-88_c.pdf
- [2] «MPPT vs PWM | Different Types of Solar Charge Controllers», Morningstar Corporation. Accedido: 10 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.morningstarcorp.com/faq/what-are-the-different-types-of-solar-charge-controllers/>
- [3] «Controlador de Carga Solar MPPT vs PWM - ¿Cuál es Mejor?», PowMr. Accedido: 10 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://powmr.com/es/blogs/news/mppt-vs-pwm>
- [4] Victron Energy, «Which solar charge controller: PWM or MPPT?» 20 de enero de 2020. [En línea]. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.victronenergy.com/upload/documents/Technical-Information-Which-solar-charge-controller-PWM-or-MPPT.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [5] «¿Cómo funcionan los sistemas fotovoltaicos aislados? | EAVE». Accedido: 19 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://eave.es/blog/como-funcionan-los-sistemas-fotovoltaicos-aislados/>
- [6] E. SA, «¿Qué es un regulador? - Regulador de carga solar - Enercity SA», Enercity S.A. Accedido: 20 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://enercitysa.com/blog/regulador-de-carga-solar-2/>
- [7] J. Ballester, «Carga de baterías en 3 etapas», dcbBallester. Accedido: 6 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://dcbballester.com/carga-de-baterias-en-3-etapas>
- [8] «Qué son los Reguladores de Carga PWM». Accedido: 19 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://solarcos.com/reguladores-carga-pwm/>
- [9] «¿Qué es PWM y cómo usarlo?» Accedido: 19 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://solectroshop.com/es/blog/que-es-pwm-y-como-usarlo--n38>

- [10] «Controlador de carga solar PWM - Conocimiento - DS New Energy». Accedido: 19 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.dsisolar.com/info/pwm-solar-charge-controller-30390486.html>
- [11] «Las principales aplicaciones de los convertidores DC-DC fotovoltaicos». Accedido: 19 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.megarevo.com/articleinfo172.html>
- [12] «Algoritmo MPPT». Accedido: 20 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html>
- [13] «Redalyc.Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos». Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/478/47838946006.pdf>
- [14] Charles, «Mejore el rendimiento del controlador MPPT con la fabricación de PCB». Accedido: 20 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://hilelectronic.com/es/mppt-controller/>
- [15] wextersm, «Enviar Datos y Leer PUERTO SERIE con Arduino - Comunicación Serial», Wexter Home. Accedido: 20 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.wexterhome.com/curso-arduino/enviar-datos-y-leer-puerto-serie/>
- [16] «Que norma de cables usar, la T568A o la T568B | Livaur». Accedido: 20 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://livaur.com/es/sgcm/recursos/que-norma-de-cables-usar,-la-t568a-o-la-t568b/15?srsltid=AfmBOooQ00SwMW2EPNBmSfpA85Hyr6slQsA2EM2vXbpn3-lkSH2f1xps>
- [17] «Cable de módem nulo». Accedido: 20 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.delock.com/infothek/Nullmodemkabel_RS-232/nullmodemkabel_e.html
- [18] «Figura 20. Voltaje vs Tiempo a potencia constante A su vez, el voltaje...», ResearchGate. Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-20-Voltaje-vs-Tiempo-a-potencia-constante-A-su-vez-el-voltaje-no-afecta-ni-la_fig17_314870142