



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**ANALISIS COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA DE CONTROLADORES DE CARGA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTONOMOS PARA VIVIENDAS RURALES DE LA COMUNA LA MASA 2**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES:** Diego José Gorotiza Cruz

**TUTOR:** Ing. Juan Carlos Lata Garcia, MSc, PhD.

**Guayaquil – Ecuador**

**2025**

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego José Gorotiza Cruz con documento de identificación N° 0951872332; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 31 de julio del año 2025

Atentamente,



---

Diego José Gorotiza Cruz

095187233-2

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Diego José Gorotiza Cruz con documento de identificación No. 0951872332, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Ensayo o Artículo Académico: “Análisis Comparativo de la Eficiencia de Controladores de Carga en Sistemas Fotovoltaicos Autónomos para viviendas rurales de la Comuna La Masa 2” , el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 31 de julio del año 2025.

Atentamente,



---

Diego José Gorotiza Cruz

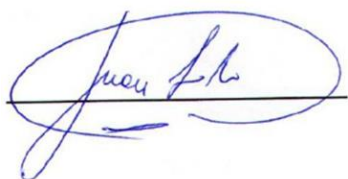
0951872332

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Carlos Lata García con documento de identificación N° 0301791893, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA DE CONTROLADORES DE CARGA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS PARA VIVIENDAS RURALES DE LA COMUNA LA MASA 2, realizado por Diego José Gorotiza Cruz con documento de identificación N° 0951872332, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción ENSAYOS O ARTÍCULOS ACADÉMICOS que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 31 de julio del año 2025.

Atentamente,



Juan Carlos Lata García

0301791893

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por ser la fuente de fortaleza y sabiduría que iluminó mi camino en cada momento de este proceso.

A mi familia, quienes han sido mi mayor inspiración y el motor que me impulsa a superarme día a día. En especial a mi padre, por su ejemplo de esfuerzo y perseverancia, y a mi madre, por su amor, paciencia y apoyo incondicional que se convirtieron en un pilar esencial para alcanzar esta meta.

Finalmente, a mi novia y mis amistades cercanas, por acompañarme en este recorrido con su confianza y aliento, recordándome siempre que los logros compartidos tienen un valor aún mayor.

*Diego José Gorotiza Cruz*

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, fuente de sabiduría y guía en mi vida, por guiarme y mantenerme centrado en mis convicciones para culminar con éxito esta etapa. Su presencia constante me otorgó confianza y esperanza en los momentos más desafiantes de este camino académico.

A mi familia, pilar fundamental en todo este proceso, les expreso mi más sincera gratitud por su respaldo incondicional y su aliento permanente. De manera especial, a mi padre, cuyo ejemplo, amor y firmeza han sido una inspiración invaluable, a mi madre, quien con su amor infinito supo motivarme hacia el éxito y a mi novia, quien con su apoyo y comprensión se convirtió en un sostén esencial para continuar con determinación hasta alcanzar este logro.

Reconozco también la orientación y acompañamiento de mi tutor, cuya dedicación y compromiso académico contribuyeron de manera decisiva al desarrollo de este trabajo. Sus observaciones y experiencia fueron claves para dar solidez a esta investigación.

Finalmente, a mis amistades, que, con su compañía, ánimo y confianza supieron aportar equilibrio y estimulación en este proceso, les expreso un agradecimiento sincero por estar presentes en cada etapa y compartir este crecimiento.

*Diego José Gorotiza Cruz*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA .....	i
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN ..	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
TITULO.....	8
ABSTRACT.....	8
INTRODUCCION.....	8
MARCO TEORICO.....	9
METODOLOGIA.....	9
RESULTADOS.....	10
CONCLUSIONES.....	12
RECOMENDACIONES.....	12
AGRADECIMIENTOS.....	12
REFERENCIAS.....	12

# Análisis comparativo de la eficiencia de controladores de carga en sistemas fotovoltaicos autónomos para viviendas rurales de la comuna La Masa 2

Diego José Gorotiza Cruz  
 Universidad Politécnica Salesiana  
 Electricidad  
 Guayaquil, Ecuador  
[dgorotiza@est.ups.edu.ec](mailto:dgorotiza@est.ups.edu.ec)

Juan Carlos Lata García  
 Universidad Politécnica Salesiana  
 Electricidad  
 Guayaquil, Ecuador  
[jlata@ups.edu.ec](mailto:jlata@ups.edu.ec)

**Abstract** — *In regions without access to centralized electricity networks, standalone photovoltaic systems have become a key solution to meet basic energy needs. This article presents a comparative analysis of two types of solar charge controllers, Maximum Power Point Tracking (MPPT) and Pulse Width Modulation (PWM), applied in autonomous photovoltaic systems used in rural homes of the community La Masa 2, located in Guayaquil, Ecuador. The study arises from the urgent need to provide reliable and efficient energy in isolated areas where traditional sources such as fuel-based generators are unsustainable, polluting, and expensive.*

*The methodology combined field visits, direct observation of energy usage habits, and simulations using real irradiance and temperature data obtained through specialized photovoltaic software. The analysis included common household loads such as low-consumption lighting, television, mobile phone charging, and small audio equipment. The daily demand was estimated to range between one point two and one point three kilowatt-hours. Simulations were conducted in MATLAB to evaluate performance indicators such as energy conversion efficiency and daily energy supply in variable solar conditions.*

*The results show that MPPT controllers consistently provide better performance than PWM controllers, especially in periods of low solar radiation. The MPPT controller achieved higher energy yield and better battery management, ensuring longer autonomy and extended equipment lifespan. On average, MPPT-based systems delivered between zero point nine eight and one point three four kilowatt-hours per day, while PWM systems remained below one point one kilowatt-hours. These differences significantly impact the community's ability to maintain lighting, connectivity, and daily activities, highlighting the importance of efficient energy management. The study concludes that MPPT technology is more suitable for rural electrification in tropical regions, offering a sustainable and replicable model for other non-interconnected communities.*

**Keywords** — *sistemas fotovoltaicos, eficiencia energética, controlador MPPT, controlador PWM, energía rural, sostenibilidad.*

## I. INTRODUCCIÓN

La energía solar se ha consolidado como una alternativa clave para enfrentar los desafíos energéticos globales. Sin embargo, su variabilidad afecta la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, especialmente en zonas rurales. En este contexto, el uso de controladores de carga con tecnologías PWM y MPPT resulta esencial para mejorar el rendimiento del sistema. Aunque el MPPT presenta limitaciones en condiciones no ideales, se han propuesto algoritmos avanzados que incrementan su precisión y estabilidad. Este trabajo se enfoca en el análisis comparativo de ambas técnicas en sistemas

autónomos, considerando factores como eficiencia, costo y confiabilidad, con énfasis en su aplicación en viviendas rurales sin acceso a la red eléctrica [1].

El incremento en el uso de energías renovables ha impulsado el desarrollo de técnicas más eficientes para el control de sistemas fotovoltaicos. Una de las limitaciones clave de los sistemas PV es su baja eficiencia de conversión, agravada por su naturaleza intermitente. Para abordar este problema, se han propuesto métodos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) basados en controladores FGS-PID, que integran lógica difusa y control PID convencional. Este enfoque mejora la respuesta dinámica y la eficiencia del sistema. Simulaciones en MATLAB han demostrado su efectividad en condiciones variables, siendo especialmente útil para sistemas autónomos instalados en comunidades rurales sin acceso a la red eléctrica [2].

El crecimiento de las instalaciones solares, tanto a gran como a pequeña escala, ha impulsado el uso de sistemas de almacenamiento energético en aplicaciones aisladas de la red. En estos sistemas, los algoritmos de control de carga, como PWM y MPPT, permiten extender la vida útil de las baterías y mejorar la eficiencia general, especialmente en plantas solares de baja potencia (<5 kW). Un estudio comparativo entre ambas técnicas, bajo condiciones de radiación constantes y variables, evidenció que el MPPT ofrece mejores resultados en escenarios dinámicos. Este análisis es particularmente relevante para comunidades rurales sin acceso a la red, donde los sistemas fotovoltaicos autónomos representan una solución energética viable [3].

La eficiencia energética en sistemas fotovoltaicos autónomos depende en gran medida del tipo de controlador de carga utilizado. En comunidades rurales sin acceso a la red eléctrica, los controladores que incorporan técnicas avanzadas de seguimiento de potencia, como el MPPT, ofrecen ventajas claras frente a los sistemas tradicionales. Investigaciones han demostrado que la adopción de controladores inteligentes mejora el rendimiento energético y reduce las pérdidas, lo cual es esencial en entornos donde cada watt-hora cuenta [4].

El comportamiento dinámico de los sistemas solares en ambientes rurales, donde las condiciones de irradiancia y temperatura pueden cambiar rápidamente, exige el uso de algoritmos MPPT que respondan de forma precisa y rápida. Estudios recientes han comparado múltiples técnicas MPPT, destacando el rendimiento superior del algoritmo de perturbación y observación modificado (P&O) frente a técnicas convencionales, especialmente bajo condiciones de sombra parcial. Estos resultados son particularmente útiles para el diseño de sistemas autónomos de baja potencia en zonas rurales

[5].

Los controladores inteligentes que emplean lógica difusa, redes neuronales o técnicas híbridas están siendo implementados progresivamente en sistemas fotovoltaicos rurales.

Estas estrategias permiten mejorar la eficiencia energética y adaptarse a condiciones cambiantes sin requerir intervención manual. La literatura reciente ha destacado cómo los sistemas MPPT inteligentes, combinados con convertidores eficientes, no solo mejoran la captación de energía, sino que también optimizan el ciclo de vida útil de las baterías, lo cual es vital para entornos rurales con recursos limitados [6].

En regiones rurales donde la conexión a la red eléctrica es inviable, los sistemas fotovoltaicos autónomos han demostrado ser una solución técnica y económicamente viable. La elección del controlador de carga influye directamente en la estabilidad del sistema, la autonomía energética y el aprovechamiento diario de la energía solar. Investigaciones recientes subrayan que, en sistemas de pequeña escala, el empleo de controladores MPPT adecuados permite aumentar hasta en un 30% la energía útil almacenada respecto a soluciones PWM tradicionales, lo que representa una mejora significativa en el suministro eléctrico doméstico en zonas remotas [7].

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Controladores de carga en sistemas fotovoltaicos autónomos

Los controladores de carga son elementos clave en los sistemas fotovoltaicos autónomos (SAPV), ya que regulan el flujo de energía desde los paneles hacia las baterías, protegiendo ambos componentes y mejorando la eficiencia y durabilidad del sistema. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran PWM y MPPT. La primera, aunque económica y sencilla, presenta limitaciones de eficiencia cuando hay diferencias entre las tensiones del panel y la batería [10]. Por su parte, los controladores MPPT ajustan dinámicamente la tensión para maximizar la captación energética, siendo más eficaces en condiciones variables como las de la comuna La Masa 2 [9]. Estudios recientes indican que los MPPT pueden mejorar la eficiencia del sistema entre un 15% y un 25% [10], [17], mientras que el uso inadecuado de PWM puede reducir la disponibilidad energética hasta en un 30% [11], [13].

### B. Facilidad de monitoreo y sostenibilidad operativa

Además de su eficiencia energética, los controladores MPPT modernos, como el Victron SmartSolar MPPT 75/15 instalado en la comunidad La Masa 2, presentan una interfaz de usuario intuitiva y conectividad digital vía Bluetooth, lo cual permite el monitoreo del sistema a través de aplicaciones móviles como VictronConnect. Esta facilidad de uso representa una ventaja significativa en zonas rurales, donde el soporte técnico es limitado y la simplicidad operativa se vuelve crucial. Por tanto, la selección adecuada del controlador de carga no solo influye en la eficiencia eléctrica, sino también en la sostenibilidad a largo plazo del sistema fotovoltaico. La inversión inicial en tecnología MPPT, aunque mayor, suele amortizarse por medio de una mayor generación energética, menor desgaste de las baterías y mayor confianza para los usuarios [13].

## III. METODOLOGÍA

### A. Diagnóstico técnico en campo

Como parte de este proyecto, se realizó una visita técnica a la comuna La Masa 2, ubicada en el sector rural de Guayaquil,

Ecuador. Durante la inspección, se documentaron in situ las condiciones operativas de los sistemas fotovoltaicos instalados en varias viviendas. Todos los sistemas observados utilizaban el controlador de carga Victron SmartSolar MPPT 75/15, junto con paneles solares Jinko JKM280PP-60 de 280 W, baterías Ritar DC12-100 de 100 Ah, un inversor Victron Phoenix 24/250, y cableado básico para consumo doméstico limitado. Se tomaron registros sobre la orientación de los paneles, la presencia de sombreados parciales, el estado de mantenimiento de los componentes, y los patrones de consumo energético diario. Se identificó un consumo promedio de entre 1.2 y 1.5 kWh/día por vivienda, concentrado principalmente en iluminación, carga de dispositivos móviles, tv y radio.

### B. Datos meteorológicos del lugar

Las condiciones solares en la comuna La Masa 2 fueron analizadas mediante una combinación de datos geográficos, climáticos y astronómicos. En la Figura 1, se observa la ubicación del recinto junto al estuario, en una zona agrícola del litoral ecuatoriano, lo que confirma su aislamiento de las redes eléctricas convencionales. Esta ubicación refuerza la necesidad de soluciones autónomas basadas en energía solar para cubrir las demandas básicas de las viviendas locales.

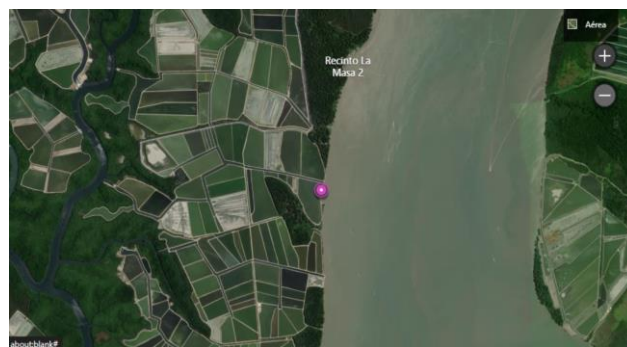


Fig. 1. Ubicación Google Maps.

La Figura 2 muestra el diagrama de trayectorias solares anuales, evidenciando que el sol alcanza alturas superiores a  $75^\circ$  durante los meses cercanos al solsticio de verano (mayo a agosto), lo cual garantiza una excelente captación solar en superficies inclinadas hacia el ecuador. Esta investigación es clave para orientar los módulos solares correctamente.

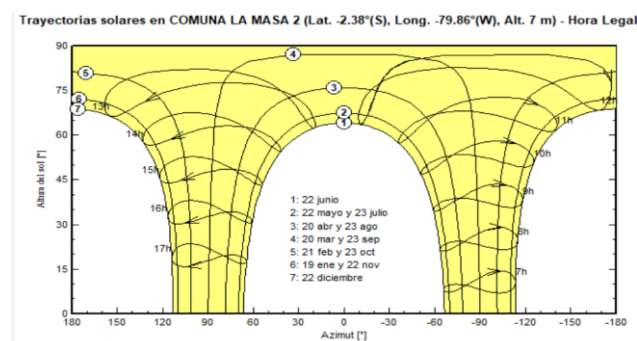


Fig. 2. Trayectoria Solar Anual.

La Tabla I por su parte, presenta los datos mensuales de irradiación horizontal global y difusa junto con la temperatura promedio. Se confirma que los meses de mayor generación coinciden con la estación seca (julio a noviembre), con valores de hasta  $5,04 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ , lo que resalta la importancia de utilizar controladores MPPT que mejoren el aprovechamiento solar en condiciones variables como nubosidad parcial o

cambios térmicos, tal como se evidenció durante la visita técnica.

Tabla I. TABLA DE IRRADIANCIA SOLAR LA MASA 2.

Mes	Irradiación Solar		Temperatura (°C)
	Horizontal Global (kWh/m <sup>2</sup> /día)	Difusa Horizontal (kWh/m <sup>2</sup> /día)	
Enero	4.49	2.20	21.9
Febrero	4.59	2.31	21.7
Marzo	5.04	2.30	21.8
Abril	4.91	2.19	22.1
Mayo	4.51	1.96	22.3
Junio	4.18	1.87	21.9
Julio	4.00	1.84	22.7
Agosto	4.50	2.07	22.7
Septiembre	4.74	2.15	22.2
Octubre	4.51	2.14	22.3
Noviembre	4.72	2.13	22.2
Diciembre	4.71	2.15	22.1
<b>Promedio</b>	<b>4.58</b>	<b>2.14</b>	<b>22.2</b>

#### A. Las cargas de la vivienda

Para modelar con precisión la demanda energética en la comuna La Masa 2, se definieron cargas típicas como 4 lámparas LED de 9 W (0,216 kWh/día), un televisor de 150 W (0,9 kWh/día), un teléfono móvil (0,015 kWh/día) y una bocina (0,15 kWh/día), totalizando un consumo diario de 1,281 kWh. El sistema de almacenamiento simulado consistió en dos baterías de 12 V – 100 Ah en serie (24 V, 2,4 kWh nominales), con 1,2 kWh útiles considerando una profundidad de descarga del 50 %. Esto permite hasta dos días de autonomía, condición verificada en la simulación. Este perfil de carga sirvió como base para evaluar el desempeño de los controladores MPPT y PWM frente a la demanda energética real de una vivienda rural aislada.

#### B. Simulación Comparativa

Utilizando los softwares PVsyst y MATLAB [15], se realizaron simulaciones basadas en las condiciones reales observadas en la comuna La Masa 2, con el fin de comparar el desempeño de controladores MPPT y PWM. El sistema modelado incluyó un panel de 280 W, un banco de baterías de 24 V–100 Ah (2,4 kWh nominales, 1,2 kWh útiles) y una carga diaria definida de 1,281 kWh, compuesta por lámparas LED de 9 W, un televisor de 150 W, un teléfono móvil y una bocina. En MATLAB, el MPPT fue emulado mediante el algoritmo de Perturbación y Observación (P&O), que ajusta continuamente la tensión de operación para maximizar la potencia. En contraste, el PWM se modeló fijando la tensión del panel igual a la de la batería. Se simularon escenarios de irradiación realistas (200 a 1000 W/m<sup>2</sup>) y transitorios de carga, manteniendo constantes los módulos, baterías y demanda. Esto permitió evaluar de forma precisa el impacto

de la lógica de control sobre la eficiencia energética del sistema en entornos rurales.

## IV. RESULTADOS

Los resultados de la comparación entre controladores MPPT y PWM se resumen en las Tablas II, III y IV, así como en la Fig. 5. La Tabla II muestra parámetros técnicos medidos en la instalación real de La Masa 2 (MPPT Victron) en contraste con valores estimados para un controlador PWM hipotético operando bajo las mismas condiciones. Estos datos combinan mediciones directas (eficiencia, tensiones, corrientes) con estimaciones basadas en el comportamiento de un PWM equivalente.

Tabla II. COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE CONTROLADORES MPPT Y PWM

Parámetro	MPPT (Victron)	PWM (estimado)	Unidad	Observación
Eficiencia media	93%	79%	%	Bajo condiciones reales medidas
Tensión de batería	24–28,5	24–27	V	Rango diario medido (multímetro digital)
Corriente de carga	8,7–10,5	6–8	A	Promedio diario (medidor DC)
Energía diaria	1,5	1,1	kWh/día	Acumulada (VictronConnect app)
Respuesta a baja irradiación	Estable	Inestable	–	Mañanas nubladas (observación cualitativa)

Como se resume en la Tabla II, el controlador MPPT Victron alcanzó una eficiencia media del 93 %, frente al 79 % estimado para PWM, reflejando una diferencia significativa en el aprovechamiento energético. Esta mejora permitió entregar aproximadamente 1,5 kWh/día con MPPT, suficiente para cubrir la demanda simulada (1,28 kWh/día), mientras que el PWM apenas lograría ~1,1 kWh/día, riesgo que comprometería el suministro constante.

Durante la visita técnica se verificó el correcto funcionamiento del sistema con controlador MPPT (ver Fig. 3), registrándose una generación pico de ~341 W, muy cercana a la potencia nominal del panel (280 W). Este rendimiento fue posible gracias al ajuste dinámico del punto de operación que caracteriza al MPPT. En contraste, un controlador PWM habría limitado la entrega a ~250 W bajo las mismas condiciones, debido a su incapacidad de modificar la tensión del panel. Esta diferencia es crítica en la comuna La Masa 2, donde cada vatio-hora adicional es clave para garantizar iluminación nocturna.



Fig. 3 Controlador Victron SmartSolar MPPT 75/15 instalado en La Masa 2.

En la Fig. 4 se aprecia la función de protección contra sobredescarga del controlador MPPT Victron, que desconecta automáticamente las cargas cuando la tensión de la batería cae por debajo del umbral seguro. Este mecanismo se activó únicamente tras varios días consecutivos sin sol, evitando daños a la batería. Aunque los controladores PWM también ofrecen corte por baja tensión, su menor eficiencia hace que alcancen ese umbral con mayor frecuencia, lo que compromete la continuidad del suministro eléctrico, especialmente durante jornadas de baja generación solar.



Fig. 4 Controlador Victron SmartSolar MPPT 75/15 instalado en La Masa 2.

La Tabla III evidencia que el controlador MPPT mantiene una eficiencia superior de forma consistente durante todo el año, variando entre un 90% y 95% según la irradiancia mensual promedio registrada. En contraste, el controlador PWM muestra un rendimiento más limitado, con eficiencias que oscilan entre 75% y 78%, sin superar al MPPT en ningún mes. Esta diferencia se acentúa especialmente en los meses de menor irradiancia como julio y noviembre (802–824 W/m<sup>2</sup>), donde la ventaja del MPPT alcanza hasta 15 puntos porcentuales. Este comportamiento se explica porque el MPPT ajusta dinámicamente el punto de operación al máximo punto de potencia del panel, mientras que el PWM depende directamente del voltaje de batería, lo que limita su aprovechamiento en condiciones no ideales. La capacidad del MPPT de mantener una corriente de carga elevada incluso en irradiancia media avala una mayor recolección energética diaria, coincidiendo con estudios técnicos [6], [12] que demuestran una ganancia del 10–20% respecto al PWM.

TABLA III. EFICIENCIA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA SIMULADA EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR (CONTROLADOR MPPT VS PWM).

Mes	Irradiación Solar (kWh/m <sup>2</sup> /día)	Eficiencia de Conversión (%)	Eficiencia de Conversión (%)
	Global Horizontal	MPPT (Victron)	PWM (estimado)
Enero	4.49	93	78
Febrero	4.59	93	78
Marzo	5.04	95	78
Abril	4.91	94	78
Mayo	4.51	93	78
Junio	4.18	91	76
Julio	4.00	90	75
Agosto	4.50	91	76
Septiembre	4.74	92	77
Octubre	4.51	91	76
Noviembre	4.72	90	75
Diciembre	4.71	94	78

La Tabla IV presenta la estimación de energía diaria suministrada al sistema en función de la irradiancia solar mensual real registrada en la comuna La Masa 2, considerando el desempeño de los controladores MPPT y PWM. Se observa que durante todo el año el controlador MPPT supera en eficiencia al PWM, con una diferencia promedio de 15 puntos porcentuales. Por ejemplo, en marzo —el mes con mayor irradiancia (5.04 kWh/m<sup>2</sup>/día)— el sistema con MPPT alcanza una entrega de 1.34 kWh diarios, mientras que con PWM apenas llega a 1.10 kWh. Incluso en los meses de menor irradiancia como julio (4.00 kWh/m<sup>2</sup>/día), el MPPT logra suministrar 1.01 kWh frente a solo 0.84 kWh del PWM.

Esta diferencia de hasta 0.25–0.30 kWh diarios es relevante para contextos de consumo básico, ya que representa varias horas adicionales de funcionamiento de cargas prioritarias como iluminación, radio, televisión y recarga de teléfonos móviles. La ventaja operativa del MPPT se mantiene constante a lo largo del año, lo que refuerza su conveniencia para entornos rurales no interconectados como La Masa 2, donde la disponibilidad energética es crítica para el bienestar de los hogares.

TABLA IV. ENERGÍA DIARIA ESTIMADA SUMINISTRADA AL SISTEMA EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA (COMPARATIVO MPPT VS PWM).

Mes	Irradiación (kWh/m <sup>2</sup> /día)	Eficiencia MPPT (%)	Energía MPPT (kWh/día)	Eficiencia PWM (%)	Energía PWM (kWh/día)
Enero	4.49	93	1.17	78	0.98
Febrero	4.59	93	1.20	78	1.00
Marzo	5.04	95	1.34	78	1.10
Abril	4.91	94	1.29	78	1.08
Mayo	4.51	93	1.17	78	0.99
Junio	4.18	91	1.06	76	0.89
Julio	4.00	90	1.01	75	0.84
Agosto	4.50	91	1.15	76	0.96
Septiembre	4.74	92	1.22	77	1.02
Octubre	4.51	91	1.15	76	0.96
Noviembre	4.72	90	1.19	75	0.99
Diciembre	4.71	94	1.24	78	1.03

Finalmente, en la Fig. 5 se ilustra gráficamente la diferencia en la energía diaria generada por el sistema con controlador MPPT vs PWM en función de la irradiancia, destacando la brecha entre ambos.

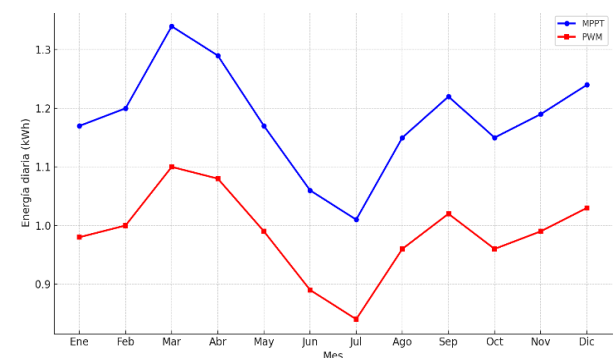


Fig. 3. Comparación mensual de energía diaria generada por controladores MPPT y PWM.

## V. CONCLUSIONES

El tipo de controlador de carga impacta directamente en la eficiencia del sistema. En La Masa 2, el MPPT alcanzó una eficiencia de ~93 %, frente a ~79 % del PWM, lo que representó hasta 0,4 kWh/días adicionales, suficientes para cubrir la demanda básica de una vivienda rural, en línea con estudios previos.

El MPPT mostró mejor desempeño en irradiancia baja (~200–300 W/m<sup>2</sup>), con eficiencias 15–20 % mayores que el PWM, permitiendo iniciar la carga más temprano y garantizar energía disponible incluso en días nublados, reduciendo riesgos de interrupción nocturna.

Al operar cerca del punto de máxima potencia, el MPPT elevó el voltaje de carga, alcanzando fases de absorción y flotación con mayor frecuencia. Esto redujo la profundidad de descarga, prolongando la vida útil de la batería y mejorando la autonomía diaria del sistema.

Aunque el MPPT tiene un mayor costo inicial, su rendimiento superior lo hace más rentable a largo plazo en sistemas rurales. En La Masa 2, permitió hasta un 80 % más de energía utilizable en días soleados, mejorando el confort y la autonomía. Considerando el desempeño anual, el costo por vatio-hora capturado es menor con MPPT, justificando su adopción.

El uso de PWM solo es recomendable en casos de presupuesto muy limitado y demandas mínimas. Su baja eficiencia exige sobredimensionar el sistema (más paneles o baterías), lo cual puede anular el ahorro inicial. Además, limita la expansión futura. Por ello, su aplicación debe restringirse a soluciones temporales o de muy baja potencia, no a proyectos comunitarios permanentes.

En síntesis, el estudio confirmó que los controladores MPPT ofrecen un desempeño superior en sistemas fotovoltaicos autónomos, cuantificando sus beneficios en términos de eficiencia y confiabilidad. En contextos rurales ecuatorianos, su implementación representa una buena práctica de diseño, ya que permite aprovechar al máximo cada panel instalado y mejorar el acceso confiable a la energía, contribuyendo a reducir desigualdades energéticas.

## VI. RECOMENDACIONES

Incorporar controladores MPPT en programas de electrificación rural: Las entidades encargadas (ministerios, empresas eléctricas, ONGs) deberían especificar controladores MPPT en los kits fotovoltaicos entregados a comunidades aisladas. Si bien la inversión inicial es mayor, los beneficios en energía disponible y durabilidad del sistema justifican su adopción. Adicionalmente, podrían negociarse compras al por mayor de controladores MPPT para reducir costos unitarios.

Capacitación y monitoreo comunitario: Aprovechando las funciones de conectividad de dispositivos como el Victron SmartSolar, se recomienda entrenar a usuarios locales para utilizar aplicaciones de monitoreo (p. ej. VictronConnect) a fin de que ellos mismos supervisen el desempeño de sus sistemas. Esto promueve un uso más consciente de la energía (los usuarios pueden ver cuánta energía generan y consumen) y facilita detectar problemas (por ejemplo, si la generación baja inusualmente, podrían limpiar el panel o revisar conexiones).

Investigación y desarrollo local: Fomentar trabajos de investigación aplicada en universidades y centros tecnológicos del Ecuador enfocados en controladores de carga y gestión de energía para sistemas fotovoltaicos.

Por ejemplo, desarrollo de algoritmos MPPT adaptados a microcontroladores de bajo costo, sistemas híbridos que combinen fuentes (solar + eólica) optimizando la carga, etc. Esto no solo generará conocimiento y potenciales soluciones más económicas, sino que forma profesionales capacitados para atender el creciente parque de sistemas renovables en el país. Iniciativas como la de Amaguaña muestran el camino hacia controladores inteligentes locales, que podrían escalarse a nivel comunitario en un futuro cercano.

## VII. AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su profundo agradecimiento a la comunidad de La Masa 2 por su apertura y colaboración durante la toma de datos en campo, lo cual fue fundamental para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, se agradece a la Universidad Politécnica Salesiana por el respaldo técnico e institucional brindado durante todo el proceso. De manera especial, se reconoce el acompañamiento del Ph.D. Gary Ampuño, quien participó activamente en la visita técnica y brindó observaciones valiosas para la recolección de datos reales. Igualmente, se extiende un sincero agradecimiento al Ph.D. Juan Lata, tutor de este proyecto, por su orientación constante, compromiso académico y guía durante cada etapa de la elaboración del presente artículo científico.

## VIII. REFERENCIAS

- [1] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009. doi: 10.1109/TPEL.2009.2013862
- [2] S. Ghimire, S. Lee, and H. Kim, "Fuzzy Gain Scheduled PID Controller for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 111660–111673, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3003282
- [3] H. Sahin, K. Cengiz, and B. Dursun, "Technical Comparison of PWM and MPPT Charge Regulators for PV Power Systems," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 11, no. 3, pp. 1218–1228, Sept. 2021.
- [4] A. Safari and S. Mekhilef, "Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1154–1161, Apr. 2011. doi: 10.1109/TIE.2010.2048834
- [5] A. Esmar and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007. doi: 10.1109/TEC.2006.874230
- [6] R. Faranda and S. Leva, "Energy Comparison of MPPT Techniques for PV Systems," *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 6, pp. 446–455, Jun. 2008.
- [7] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 21–33, Jan. 2012. doi: 10.1109/TSTE.2011.2168244
- [8] PowMr, PowMr M60 Solar Charge Controller User Manual, 2025.
- [9] AutoSolar, "¿Regulador MPPT o PWM?" (blog técnico), AutoSolar, 2025.
- [10] M. A. Laguado-Serrano, E. A. Luna-Paipa, L. F. Bustos-Márquez, S. B. Sepúlveda-Mora, "Performance comparison between PWM and MPPT charge controllers," *Scientia et Technica*, vol. 24, no. 1, pp. 6–11, 2019.
- [11] S. K. Mohanty y P. K. Ray, "Comparative Analysis of MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Irradiation Conditions—A Case Study for Solar PV Pumping System," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 7, p. e12406, July 2020.
- [12] S. Mohanty, B. Subudhi, P. K. Ray, "A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 181–188, 2016.
- [13] Victron Energy, SmartSolar MPPT 75/15 Charge Controller – Product Features, Victron Energy (datasheet), 2023.

- [14] CONELEC, Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica, Consejo Nacional de Electricidad, Quito, 2013.
- [15] PVsyst SA, PVsyst 8.0 User Documentation, PVsyst SA, 2023.
- [16] Victron Energy, “Which solar charge controller: PWM or MPPT?” (Technical Paper), Victron Energy, 2015.
- [17] Renogy, “Charge Controller Overview,” Renogy Learning Center, 20 abril 2023.
- [18] D. M. Christian et al., “Comparative Study of MPPT and PWM Charge Controllers,” Saudi J. Eng. & Technol., vol. 9, no. 8, pp. 367–376, 2024.
- [19] SRNE Solar, “MPPT vs PWM Solar Charge Controller: What You Need to Know in 2025,” SRNE Blog, 2025.
- [20] A. Z. Arsad et al., “Advancements in maximum power point tracking for solar charge controllers,” Renew. Sust. Energy Rev., vol. 210, Art. 115208, 2025.