



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO
OFF-GRID PARA ABASTECIMIENTO DE CARGA ELECTRÓNICA**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRICIDAD

AUTORES:

Sheyla Giulianna Lopez Villacreses

Christian Alexander Tibán Caisaguano

TUTOR:

Ing. M.Sc. Diego Leonardo Jiménez Jiménez

LATACUNGA, AGOSTO, 2025

Latacunga, Julio del 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo **SHEYLA GIULIANNA LOPEZ VILLACRESES** y **CHRISTIAN ALEXANDER TIBÁN CAISAGUANO** declaramos ser autores del proyecto de titulación **"DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA ABASTECIMIENTO DE CARGA ELECTRÓNICA"**, siendo el Ing. **DIEGO LEONARDO JIMÉNEZ JIMÉNEZ** 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.

Sheyla Julianna Lopez Villacreses

CC. 160061714-4

Christian Alexander Tibán Caisaguano

CC. 180544462-5

Latacunga, Julio del 2025

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA ABASTECIMIENTO DE CARGA ELECTRÓNICA”**, propuesto por los estudiantes **SIEYLA GIULIANNA LOPEZ VILLACRESES** y **CHRISTIAN ALEXANDER TIBÁN CAISAGUANO** de la Carrera de **ELECTRICIDAD**, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Diego Leonardo Jiménez Jiménez, Mg.
C.C. 050349370-2
TUTOR

Latacunga, Julio 2025

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título **“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA ABASTECIMIENTO DE CARGA ELECTRÓNICA”**, propuesto por los estudiantes **SHEYLA GIULIANA LOPEZ VILLACRESES** y **CHRISTIAN ALEXANDER TIBÁN CAISAGUANO**. de la Carrera de Electricidad, me permito indicar que los estudiantes han concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad proyecto de investigación en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

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

Atentamente,



.....

Ing. Roberto Salazar M.Sc.

C.C. 050284761-9



.....

PhD. Secundino Marreno

C.C. 175710790-7



.....

Ing. Marco Anibal León Segovia

C.C. 050230540-2

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por guiarme en cada paso de este camino, por brindarme fortaleza, sabiduría y constancia para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, quienes han sido una fuente incondicional de amor, apoyo y ejemplo. Su paciencia, sacrificio y confianza en mis capacidades han sido pilares fundamentales tanto en mi formación personal como académica. Gracias por estar presentes en cada momento.

A mi compañero de tesis, Christian, por su carisma y disposición durante todo el desarrollo de este proyecto.

A mi tutor Ing. MSc Diego Jiménez, por su valiosa guía, dedicación y conocimientos compartidos durante este proceso. Su experiencia y orientación han sido esenciales para mi crecimiento académico y profesional.

Espero que estas palabras reflejen el profundo respeto y gratitud que siento por cada uno de ustedes.

Sheyla Giulianna Lopez V.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme fuerzas y permitirme cumplir mi sueño más deseado.

A mis padres, Martha y Geovanny, por estar siempre a mi lado a lo largo de este extenso proceso. Gracias por brindarme su apoyo incondicional en cada momento en que los necesité. Su amor, paciencia y fortaleza fueron fundamentales para alcanzar esta meta. A mis hermanos y hermana, Leonardo, Ronny y Jessica, por ser una fuente constante de ánimo y por enseñarme, con su ejemplo, que todo objetivo puede alcanzarse con esfuerzo y dedicación, A mi tío Daniel, por brindarme su apoyo moral en los momentos de dificultad y debilidad, recordándome siempre que no estaba solo en este camino

A mis abuelitas Marías, cuyo amor, dedicación y apoyo incondicional fueron un impulso constante para seguir adelante y no abandonar mis estudios. Gracias por motivarme siempre con su ejemplo y cariño. A mi abuelito Alberto, por el esfuerzo, dedicación, paciencia, por su confianza y por su enseñanza. A pesar de su partida lo tengo presente cada día que pasa, te extraño abuelito.

A todos mis primos, y en especial a Mario, por estar siempre pendiente durante este proceso. Gracias por cada momento compartido, por sus valiosos consejos y, sobre todo, por brindarme su apoyo en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi grupo de amigos, quienes, con su compañía, sus bromas y su apoyo incondicional hicieron que esta etapa de mi vida se convierta en un recuerdo inolvidable. Gracias por estar presentes incluso en los momentos más difíciles.

A mi compañera de tesis, Sheyla, por su paciencia, dedicación y el apoyo constante que me brindó a lo largo de todo este proceso. Su compromiso, carisma y sentido del humor hicieron que este camino fuera más ameno y llevadero. Gracias por ser

parte fundamental de esta etapa y por compartir conmigo no solo responsabilidades, sino también valiosos momentos de aprendizaje. Así mismo, deseo expresar mi sincero agradecimiento al Ing. Diego Jiménez por su constante guía, disposición y acompañamiento durante cada etapa de este proceso, brindándonos orientación en los momentos en que más lo necesitábamos.

Infinitamente gracias Familia.

Christian Alexander Tibán C.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo mi corazón, a mis padres, Katherine y Juan Carlos. Ya que, a pesar de que el logro sea mío, el esfuerzo, el sacrificio y la fuerza detrás de cada paso han sido de ustedes. A su lado, siempre ha sido más fácil ser valiente y los sueños alcanzables. Gracias por su amor sin medida, por su apoyo constante y sobre todo por creer en mí. Todo lo que soy, se los debo a ustedes.

A mis abuelitos, Margoth y Milton, cuya presencia ha sido siempre un refugio de amor incondicional. Sus palabras, su sabiduría y ese cariño inmenso fueron un abrazo que me dieron fuerzas en momentos de duda.

A mi familia cercana, especialmente a mi tía Karina, por estar siempre a mi alado con gestos llenos de amor que, sin pedirlos, llegaban en el momento perfecto, y por cada palabra de aliento y motivación que me impulsó a seguir adelante. A mi tío Daniel, por las risas compartidas, tus ocurrencias y esas conversas que, sin saberlo, me dieron fuerza y tranquilidad.

A mis amigos de la vida, esos que se volvieron familia en el camino. Gracias por las risas en medio del caos, por las ocurrencias, y por su compañía en cada caída y cada logro.

Y a mis gatitas, mis compañeras de largas noches de estudio. Con su compañía, su ternura y esa capacidad única de brindar consuelo sin decir palabras, llenaron mis días de alegría y amor justo cuando más lo necesitaba.

Agradezco sinceramente, a todos aquellos que participaron en este proceso. Este logro no es solo un cierre académico, sino el resultado de amor, apoyo y compromiso. Esto es para ustedes, con todo mi agradecimiento y cariño.

Sheyla Julianna Lopez V.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Martha y Geovanny, cuyo esfuerzo incansable y apoyo incondicional han sido la base que me ha permitido alcanzar esta meta tan anhelada, tanto para mí como para ellos.

A mis abuelitas, que, a pesar de no haber tenido acceso a una educación formal, me ofrecieron siempre su amor, sabios consejos y una motivación constante para no rendirme.

Y a mis hermanos y hermana, Leonardo, Ronny y Jessica por ser un ejemplo de perseverancia y por enseñarme, con su apoyo y ejemplo, que todo se puede lograr con dedicación y esfuerzo.

Christian Alexander Tibán C.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	4
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	4
2.3.1 Objeto de Investigación	4
2.3.2 Campo de acción	5
2.4 BENEFICIARIOS	5
2.4.1 Directo	5
2.4.2 Indirecto	5
2.5 JUSTIFICACIÓN	5
2.6 OBJETIVOS	6
2.6.1 General	6
2.6.2 Específicos	6
2.6.3 Sistema de actividades	6
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	8
3.1 Antecedentes	8
3.2 Elementos de un sistema fotovoltaico	10
3.2.1 Panel solar fotovoltaico	10
3.2.2 Controladores de carga	10

3.2.3	Inversor.....	11
3.3	Baterías.....	11
3.4	Estado de carga (SOC).....	12
3.5	Estado de Salud.....	12
3.5.1	Temperatura de funcionamiento	13
3.5.2	Ciclo de carga y descarga	13
3.5.3	Profundidad de descarga (DOD)	13
3.5.4	Sobrecarga	13
3.5.5	Tasa de carga y descarga.....	14
3.5.6	Envejecimiento	14
3.6	Tipos de batería.....	14
3.6.1	Baterías de Plomo-ácido.....	14
3.6.2	Baterías de Litio	17
3.7	Beneficios técnicos de una repotenciación	21
3.7.1	Consideraciones del diseño	21
3.7.2	Autonomía energética y sostenibilidad.....	21
3.8	Beneficios de la energía fotovoltaica.....	22
3.9	Sistemas fotovoltaicos	22
3.9.1	Sistema solar fotovoltaico conectado a la red pública.....	23
3.9.2	Sistema solar fotovoltaico aislado.....	23
3.9.3	Sistema solar fotovoltaico híbrido.....	23
3.10	Radiación solar.....	24
3.10.1	Tipos de radiación.....	24
3.11	Orientación e inclinación	24
3.12	Radiación solar en Ecuador	25
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	25
4.1	Repotenciación del sistema solar fotovoltaico off-grid.....	26

4.2	Componentes principales del sistema fotovoltaico.....	28
4.2.1	Paneles solares.....	28
4.2.2	Inversor.....	29
4.2.3	Controlador de carga	29
4.2.4	Baterías	30
4.3	Sistema Fotovoltaico off-grid	32
4.4	Evaluación del estado de carga	32
4.5	Pruebas experimentales de carga de baterías	36
4.6	Pruebas experimentales de descarga de baterías.....	38
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
5.1	Evaluación del recurso solar	42
5.2	Evaluación del Estado Carga (SOC).....	45
5.3	Selección de la capacidad de la batería.....	52
5.4	Evaluación de descarga.....	52
5.4.1	Descarga de las baterías con cargas variables	52
5.3.2	Descarga C-rate	60
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
6.1	Conclusiones.....	63
6.2	Recomendaciones	64
7.	REFERENCIAS	65
8.	ANEXOS	1
8.1	ANEXO 1	1
8.2	ANEXO 2	1
8.3	ANEXO 3	2
8.4	ANEXO 4	2
8.5	ANEXO 5	3
8.6	ANEXO 6	3

8.7 ANEXO 7	4
8.8 ANEXO 8	4
8.9 ANEXO 9	5
8.10 ANEXO 10	5
8.11 ANEXO 11	6
8.12 ANEXO 12	6
8.13 ANEXO 13	7
8.14 ANEXO 14	7
8.15 ANEXO 15	8

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Panel fotovoltaico.....	10
Figura 2. Inversor 1000W.....	11
Figura 3. Batería Plomo- ácido Gel.....	16
Figura 4. Curva típica de carga de una batería Plomo-ácido [24]	16
Figura 5. Aumento de la densidad energética de diferentes tipos de baterías	17
Figura 6. funcionamiento de una batería de ion litio [27]	18
Figura 7. Batería de ion-litio.....	19
Figura 8. Estructura de un sistema fotovoltaico [30].....	22
Figura 9. Sistema solar fotovoltaico conectado a la red.....	23
Figura 10. Sistema fotovoltaico hibrido [31]	24
Figura 11. Mapa solar del potencial de generación de electricidad fotovoltaica en Ecuador [35]	25
Figura 12. Diagrama de bloques de la metodología	26
Figura 13. Estado inicial del prototipo fotovoltaico off-grid.....	26
Figura 14. Diagrama del sistema fotovoltaico off-grid	32
Figura 15. recurso solar del mes de marzo	34
Figura 16. recurso solar del mes de abril.....	34
Figura 17. Irradiancia promedio de cada semana del mes de marzo	35
Figura 18. Irradiancia promedio de cada semana del mes de abril.....	35
Figura 19. Irradiancia promedio de cada día de medición	36
Figura 20. Diagrama de flujo de pruebas de carga de batería	37
Figura 21. Diagrama de flujo de pruebas de descarga de batería	42
Figura 22. Irradiancia promedio del mes de marzo	43
Figura 23. Irradiancia promedio del mes de abril.....	44
Figura 24. Irradiancia promedio medidas.....	45
Figura 25. Irradiación solar por unidad vs. carga de batería de iones de litio en tres escenarios de uso.....	46
Figura 26. Irradiación solar por unidad vs. carga de batería de plomo-ácido en tres escenarios de uso.....	47
Figura 27. Estado de carga (SOC) vs. voltaje de la batería de iones de litio.....	50
Figura 28. Estado de carga (SOC) vs. voltaje de la batería de plomo-ácido gel	51

Figura 29. Estado de descarga (DOD) en función del tiempo en horas de la batería de ion-litio	54
Figura 30. Estado de descarga (DOD) en función del tiempo en horas de la batería de plomo-ácido gel.....	55
Figura 31. Corrientes de descarga en función del tiempo de la batería de ion-litio	56
Figura 32. Corrientes de descarga en función del tiempo de la batería de plomo-ácido gel...	57
Figura 33. Voltaje en función del tiempo en horas de descarga de la batería de ion-litio	59
Figura 34. Voltaje en función del tiempo en horas de descarga de la batería de plomo-ácido gel	60
Figura 35. Rendimiento de descarga de baterías de iones de litio a diferentes tasas C.....	61
Figura 36. Rendimiento de descarga de la batería de plomo-ácido bajo diferentes índices C	63
Figura 37. Inspección de la funcionalidad del prototipo repotenciado.....	1
Figura 38. Obtención del recurso solar mediante el piranómetro.....	1
Figura 39. Evaluación del recurso solar a las 10:00 am	2
Figura 40. Conexión de la batería de Ion- Litio para la carga	2
Figura 41. Conexión de la batería de ácido-plomo gel para la carga	3
Figura 42. Medición del voltaje en los bornes de la batería	3
Figura 43. Medición de la corriente que ingresa en la batería.....	4
Figura 44. Elaboración de las conexiones para las cargas electrónicas.....	4
Figura 45. Evaluación de la funcionalidad para las descargas	5
Figura 46. Descarga de la batería bajo condiciones de uso	5
Figura 47. Descarga de la batería (C-rate).....	6
Figura 48. Observación de la carga de la batería Ion-Litio	6
Figura 49. Observación de la descarga de la batería Ion-Litio	7
Figura 50. Datasheet de la batería de plomo-ácido gel.....	7
Figura 51. Datasheet de la batería de ion-litio.....	8

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de Actividades	7
Tabla 2. Revisión Bibliográfica	9
Tabla 3. Funciones y componentes del sistema fotovoltaico off-grid	10
Tabla 4. Ventajas y desventajas baterías de Plomo-ácido [24]	17
Tabla 5. Ventajas y desventajas baterías de ion-litio [24].....	20
Tabla 6. Inclinación y orientación de los paneles solares [34]	24
Tabla 7. Mejoras aplicadas en el sistema fotovoltaico off-grid	27
Tabla 8. Características de paneles solares	28
Tabla 9. Características de paneles solares	29
Tabla 10. Características de Inversor	29
Tabla 11. Datos de fábrica de los componentes del módulo fotovoltaico	30
Tabla 12. Parámetros técnicos de la batería.....	30
Tabla 13. Características técnicas de los equipos de medida.	33
Tabla 14. Demanda de potencia de los equipos electrónicos utilizados para pruebas de descarga	38
Tabla 15. Primer perfil.....	39
Tabla 16. Segundo perfil.....	39
Tabla 17. Tercer perfil.....	40
Tabla 18. Tasa C con corriente promedio y tiempo de descarga para una batería 50 Ah	40
Tabla 19. Irradiación registrada en la carga de la batería de ion-litio.....	48
Tabla 20. Irradiación registrada en la carga de la batería de plomo-ácido gel	48
Tabla 21. Energía disponible para completar la carga de la batería	52

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA ABASTECIMIENTO DE CARGA ELECTRÓNICA”

Autores:

Sheyla Julianna Lopez Villacreses

Christian Alexander Tibán Caisaguano

RESUMEN

Este estudio presenta un análisis comparativo experimental de la determinación del estado de carga (SOC) de dos tecnologías de baterías: ion-litio y plomo-ácido gel, aplicadas en sistemas fotovoltaicos aislados. La investigación se realizó mediante la repotenciación de un prototipo existente, con el fin de analizar el comportamiento del almacenamiento de energía bajo condiciones reales. Se evaluaron las fases de carga y descarga de ambas tecnologías frente a diferentes configuraciones del sistema y perfiles de demanda eléctrica. Para la etapa de carga, se analizaron tres escenarios con distintas cantidades de módulos fotovoltaicos (2, 4 y 6 paneles), registrando corriente, voltaje y estado de carga (SOC). En condiciones de irradiancia media, se determinó que el uso de cuatro paneles permite una carga eficiente para baterías de 50 Ah, sin necesidad de sobredimensionar el sistema. Durante la etapa de descarga, se aplicaron perfiles con diferentes niveles de potencia (1.134 kW, 0.184kW y 0.594 kW), evaluando el desempeño ante diferentes tasas de descarga (C-rate). Los resultados muestran que la batería de ion-litio presenta un mejor rendimiento, con mayor profundidad de descarga, mejor regulación de corriente y menor caída de voltaje, incluso en alta demanda. En conclusión, la batería de plomo-ácido gel mostró una menor eficiencia y una caída de tensión más pronunciada. Se concluye que ambas tecnologías son viables para sistemas aislados, aunque la batería de ion-litio es más adecuada para demandas variables, mientras que la batería de plomo-ácido gel resulta mejor en aplicaciones con demandas eléctricas estables y predecibles.

Palabras claves: Estado de carga, Plomo-ácido gel, Ion-Litio, Baterías, sistemas fotovoltaicos Off-grid, Análisis comparativo.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

FACULTY ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TOPIC: “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO OFF-GRID PARA ABASTECIMIENTO DE CARGA ELECTRÓNICA”

Autores:

Sheyla Giulianna Lopez Villacreses

Christian Alexander Tibán Caisaguano

ABSTRACT

This study presents a comparative experimental analysis of the state of charge (SOC) determination of two battery technologies: lithium-ion and lead-acid gel, applied in off-grid photovoltaic systems. The research was conducted by retrofitting an existing prototype to analyze energy storage behavior under real-world conditions. The charge and discharge phases of both technologies were evaluated under different system configurations and electrical demand profiles. For the charging stage, three scenarios with different numbers of photovoltaic modules (2, 4, and 6 panels) were analyzed, recording current, voltage, and state of charge (SOC). Under medium irradiance conditions, it was determined that the use of four panels allows efficient charging of 50 Ah batteries without the need to oversize the system. During the discharge stage, profiles with different power levels (1.134 kW, 0.184 kW, and 0.594 kW) were applied, evaluating performance under different discharge rates (C-rates). The results show that the lithium-ion battery performs better, with greater depth of discharge, better current regulation, and lower voltage drop, even under high demand. In contrast, the gel lead-acid battery showed lower efficiency and a steeper voltage drop. In conclusion, both technologies are viable for off-grid systems, although the lithium-ion battery is more suitable for variable demands, while the gel lead-acid battery performs better in applications with stable and predictable electrical demands.

Keywords: State of charge, Gel lead-acid, Lithium-ion, Batteries, Off-grid photovoltaic systems, Comparative analysis

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Desarrollo de un prototipo de sistemas fotovoltaico off-grid para abastecimiento de carga electrónica.

Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Fecha de inicio: ABRIL 2025

Fecha de finalización: AGOSTO 2025

Lugar de ejecución: Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia: Carrera de Electricidad

Proyecto de investigación vinculado: Desarrollo de sistemas inteligentes aplicados a la ingeniería eléctrica.

Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

Sheyla Julianna Lopez Villacreses

Christian Alexander Tibán Caisaguano

Tutor de Titulación:

Ing. Msc. Diego Leonardo Jiménez Jiménez

Área de Conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

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

Sub líneas de investigación de la Carrera: Diseño, construcción y explotación eficiente de sistemas eléctricos con energía convencional y alternativa.

2. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de electricidad fiable continúa siendo un reto en áreas rurales o remotas, donde la conexión a la red eléctrica tradicional no es técnicamente viable debido a factores geográficos, económicos y logísticos. En este escenario, los sistemas fotovoltaicos aislados surgen como una opción sustentable y factible para la producción de electricidad en comunidades aisladas, fomentando de esta manera el crecimiento social y económico de estas áreas. Sin embargo, esta tecnología tiene una restricción esencial de naturaleza intermitente, dado que se basa directamente en la disponibilidad del recurso solar, que cambia durante el día y dependiendo de las condiciones meteorológicas. Esta variabilidad complica el abastecimiento constante de energía. Por lo tanto, los sistemas fotovoltaicos aislados están formados por paneles solares que convierten la irradiación solar en energía eléctrica, además de controladores e inversores que gestionan y ajustan esta energía para satisfacer la necesidad del sistema. Los sistemas de almacenamiento de energía son un elemento crucial en este tipo de construcciones, ya que facilitan la conservación del sobrante de energía producido durante las horas de mayor irradiación solar y su uso en periodos de escasa o ninguna irradiación solar. En estos sistemas, las baterías de plomo-ácido y las de ion-litio son las más utilizadas [1].

Las baterías de plomo-ácido son apreciadas por su coste reducido y la facilidad de uso, aunque tienen inconvenientes como una escasa densidad de energía y una durabilidad restringida, que generalmente se reduce a diez años cuando se exponen frecuentemente a ciclos de descarga profunda. En contraposición, las baterías de ion-litio proporcionan una densidad energética superior, una eficiencia superior en los procesos de carga y descarga, y una duración más extendida, que puede oscilar entre ocho y quince años. No obstante, su inversión inicial es más elevada y necesitan sistemas de administración de calor más sofisticados para asegurar un funcionamiento seguro y eficaz [2], [3], [4].

En ese sentido, se debe considerar el tipo de tecnología de batería óptima para su aplicación en sistemas fotovoltaicos aislados, según [5] la capacidad, el rendimiento y la fiabilidad del estado de carga (SOC) de las baterías son características fundamentales para determinar su vida útil [6]. Es así que, el rendimiento de una batería se deteriora durante su funcionamiento debido a la pérdida de materiales activos en su interior. A medida que la batería se utiliza, su vida útil en ciclos de carga y descarga disminuye, lo que representa un problema recurrente. Es por lo que es indispensable conocer adecuadamente el SOC de la batería para evitar que se degrade rápidamente. El estado de salud de las baterías puede verse afectado por diversas causas, como

la temperatura de operación, la profundidad de descarga (DOD), los rangos de operación del estado de carga y la corriente de descarga (C-rate), entre otras. Todas estas variables influyen en el aumento de la impedancia interna de la batería, siendo esta la principal razón para que se considere degradada [7].

La evolución tecnológica de las baterías ha impulsado el desarrollo de nuevos métodos de carga y descarga. Por ejemplo, la carga de una batería a corriente constante es uno de los métodos más utilizados para conocer adecuadamente el SOC de la batería [8]. Asimismo, existen diversos estudios para evaluar las características del SOC con diferentes tecnologías de baterías en modo descarga. Estos métodos se desarrollan mediante simulaciones, optimización y aplicaciones en sistemas híbridos. Hasta el momento, no existe un estudio que realice un análisis comparativo práctico entre baterías de la misma capacidad en sistemas fotovoltaicos aislados.

De esta manera en Ecuador, provincia de Cotopaxi, cuenta con un alto índice de radiación solar a lo largo del año, lo que representa una oportunidad para analizar y determinar el estado de carga (SOC) de las baterías en un sistema fotovoltaico aislado. Por lo tanto, el presente documento tiene como objetivo general el desarrollo de un prototipo funcional de un sistema fotovoltaico para determinar experimentalmente el funcionamiento de dos tecnologías de baterías en modo carga y descarga: plomo-ácido gel y ion-litio utilizando los equipos disponibles en el laboratorio de Smart Grid de la FCIYA.

La metodología adoptada en este estudio comprende un análisis detallado de las diferentes tecnologías comúnmente utilizadas en sistemas fotovoltaicos, seguido de la selección y la inspección de elementos para repotenciación del sistema aislado. Posteriormente, se realizará pruebas de carga y descarga bajo casos de estudio específicos. Una vez completadas las pruebas, se evaluarán los datos obtenidos en función de parámetros como el estado de carga (SOC), la corriente y el voltaje de carga y descarga. Para ello, se emplearán instrumentos de medición como piranómetro y multímetro para registrar la radiación solar y los datos de corriente y voltaje, respectivamente. Estos datos permitirán el análisis comparativo del funcionamiento y rendimiento de ambas tecnologías bajo los mismos parámetros de uso.

Este estudio constituye un progreso importante al examinar tecnologías de almacenamiento que facilitan la evaluación práctica del estado de carga (SOC) de las baterías, con el objetivo de mejorar su desempeño y entender tanto sus beneficios como sus restricciones de cada tecnología.

2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Hoy en día, los cambios climáticos están causando la reducción de recursos naturales, vitales en nuestra nación para la producción de energía eléctrica. Esta circunstancia ha promovido la búsqueda de opciones energéticas sustentables y menos vinculadas a recursos escasos. Gracias a los progresos tecnológicos, actualmente se puede producir electricidad a través de sistemas fotovoltaicos, que utilizan la energía solar, lo que constituye una alternativa alentadora para abordar los desafíos energéticos del futuro.

Sin embargo, uno de los principales inconvenientes en este tipo de sistemas se presenta en el almacenamiento de energía, el cual está directamente relacionado con el comportamiento de la profundidad de descarga (DOD), el estado de carga (SOC), durabilidad y rendimiento, que se ven afectados por la disponibilidad variable del recurso solar, influyen considerablemente en la eficiencia y vida útil de estos dispositivos. En la Universidad Técnica de Cotopaxi, el laboratorio de Smart Grid dispone de un prototipo que no está en funcionamiento a causa de la ausencia de componentes y conexiones indispensables para el funcionamiento adecuado del sistema fotovoltaico fuera del sistema de red. Por lo tanto, surge la necesidad de fortalecer el módulo actual, con el objetivo de elaborar un prototipo operativo para la provisión de cargas electrónicas. Esta mejora permitirá el estudio y análisis del comportamiento de las baterías mediante pruebas prácticas en el área de energía fotovoltaica, en FCIYA de la carrera de Ingeniería en Electricidad.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En los sistemas de generación fotovoltaica, es fundamental evaluar el rendimiento de los componentes, especialmente de las tecnologías de almacenamiento de energía. Sin embargo, la falta de análisis comparativos en condiciones reales limita su adecuada elección, afectando procesos técnicos y educativos relacionados con la evaluación del SOC y optimización del sistema.

2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1 Objeto de Investigación

Sistema fotovoltaico off-grid y almacenamiento de energía.

2.3.2 Campo de acción

330000 ciencias Tecnológicas /3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.05 Aplicaciones Eléctricas

2.4 BENEFICIARIOS

El desarrollo de un prototipo de sistemas fotovoltaico off-grid para abastecimiento de cargas electrónicas. Este estudio beneficiará al ámbito académico a través del análisis del comportamiento de sistemas de almacenamiento energéticos en condiciones prácticas, fortaleciendo la investigación aplicada en energía renovables.

2.4.1 Directo

Los beneficiarios directos de la investigación son los estudiantes del laboratorio Smart Grid de la facultad de CIYAde la carrera de Ingeniería en Electricidad o carreras afines de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.4.2 Indirecto

Comunidad académica.

2.5 JUSTIFICACIÓN

El objetivo de la tesis es examinar de forma experimental del SOC en las baterías de plomo-ácido gel y ion-litio, mediante la repotenciación del sistema fotovoltaico aislado ya establecido. Este método ofrece saberes tanto prácticos como experimentales acerca del funcionamiento de diversas tecnologías de baterías. La valoración del SOC posibilita reconocer las restricciones y habilidades de cada tecnología, lo que simplifica la mejora del diseño, funcionamiento y mantenimiento necesario para estos sistemas. En la actualidad, la demanda de energías renovables es elevada como opción sostenible en comparación con las fuentes tradicionales, como áreas donde no hay acceso a la red de electricidad. El desarrollo de un prototipo fuera del sistema eléctrico facilita la observación del rendimiento auténtico de las tecnologías de baterías en diversos contextos de demanda eléctrica. Esto es crucial para entender su conducta autónoma y asegurar un abastecimiento constante de energía.

Además, el prototipo estará accesible en el laboratorio de Smart Grid de la FCIYA, lo que facilitará a los alumnos una comprensión práctica de los beneficios y restricciones de los sistemas fotovoltaicos aislados. Este estudio no solo fomenta la educación académica, sino que

también fomenta la utilización de energías renovables y la innovación tecnológica en el campo de las energías renovables.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 General

- Desarrollar un prototipo de sistema fotovoltaico off-grid a partir de los equipos disponibles del laboratorio de Smart Grid de la FCIYA que permita a los estudiantes de ingeniería eléctrica explorar de manera práctica los principios de la energía solar.

2.6.2 Específicos

- Realizar un estado del arte sobre el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos off-grid identificando diferentes tipos de tecnologías de almacenamiento de energía.
- Repotenciar el prototipo de sistema fotovoltaico off-grid disponible en el laboratorio de la FCIYA.
- Realizar distintas pruebas de uso del sistema fotovoltaico off-grid para diferentes escenarios de carga y descarga utilizando dos tecnologías de baterías.
- Realizar un análisis comparativo sobre el funcionamiento del sistema de almacenamiento por baterías para dos diferentes tecnologías: Plomo ácido-Gel y Ion- Litio.

2.6.3 Sistema de actividades

A continuación, se detalla las actividades que se realizará en función a los objetivos establecidos, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Sistema de Actividades

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnica e Medios e instrumentos
Realizar un estado del arte sobre el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos off-grid identificando diferentes tipos de tecnologías de almacenamiento de energía.	Recopilar la información acerca de los sistemas fotovoltaicos.	Determinación la configuración del sistema y el dimensionamiento adecuado.	Investigación bibliográfica.
	Recolectar información del análisis comparativo de las tecnologías en un sistema fotovoltaico.	Identificación las diferencias de las distintas tecnologías de baterías.	Investigación bibliográfica.
Repotenciar el prototipo de sistema fotovoltaico off-grid disponible en el laboratorio de la FCIYA.	Comprobar el funcionamiento de los equipos existentes	Verificación de la funcionalidad de los equipos existentes.	Equipos de medición como el multímetro.
	Reubicación y adquisición de los nuevos equipos	Optimización del sistema mediante el reemplazo de componentes deteriorados, en función al análisis de capacidad requerida.	Equipos de medición, herramientas para instalación, nuevos equipos.
Realizar distintas pruebas de uso del sistema fotovoltaico off-grid para diferentes escenarios de carga y descarga utilizando dos tecnologías de baterías.	Establecer los perfiles de carga y descarga bajo distintas cargas eléctricas.	Obtención de la demanda de energía eléctrica para cada escenario.	Estudio de cargas basado en la Norma NEC.
	Registrar los datos durante los ciclos de carga y descarga de las baterías.	Recopilación de la información de la radiación solar promedio existente del lugar y parámetros eléctricos como corriente, voltaje y estado de carga (SOC).	Equipos de medición como Apodee MP-200 y multímetro Fluke 289.
Realizar un análisis comparativo sobre el funcionamiento del sistema de almacenamiento por baterías para dos diferentes tecnologías: Plomo ácido-Gel y Ion- Litio.	Comprobar el funcionamiento del sistema mediante las pruebas de carga y descarga.	Evaluación del rendimiento del sistema.	Medición con instrumentos de medida como un multímetro y amperímetro.
	Interpretar los resultados obtenidos de la carga y descarga de las baterías en los diferentes escenarios.	Diagnóstico del comportamiento del estado de carga (SOC) y comparación del rendimiento y eficiencia de ambas tecnologías.	Análisis crítico basado en los parámetros técnicos registrados y las fichas técnicas de las baterías.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En esta parte se tratan principios fundamentales de los sistemas fotovoltaicos aislados (off-grid), con un enfoque en el almacenamiento de energético. Se explicarán detalladamente los componentes que conforman el sistema fotovoltaico y la importancia de cada uno. Asimismo, se tratarán las propiedades de las baterías comúnmente utilizadas en estos sistemas, diferenciando las características de cada tecnología, incluyendo sus ventajas y desventajas.

Se destacará el funcionamiento de cada tipo de batería en función de su capacidad, profundidad de descarga (DOD), estado de carga (SOC) y su autonomía. Además, se presentará el recurso solar disponible en el país y la manera en que influye en el desempeño del sistema.

Finalmente, se realizará un análisis comparativo utilizando parámetros característicos de cada de la tecnología de almacenamiento, junto con los resultados de las pruebas experimentales, con el objetivo de evaluar cómo el comportamiento del SOC y la DOD afectan la vida útil esperada en aplicaciones aisladas de la red eléctrica.

3.1 Antecedentes

Como antecedente se tiene un módulo de prueba fotovoltaico en la Universidad Técnica de Cotopaxi, cuya función era desarrollar prácticas relacionadas con la energía renovable. A este módulo se le repotencio para hacerlo más didáctico y aumentar las habilidades de los estudiantes. En el laboratorio de la FCIYA no contaba con las dos tecnologías de baterías que se necesita para este estudio, ya que es importante analizar el desempeño energético de diferentes tecnologías de baterías. Se emplearán dos tipos, una de plomo ácido-gel y otra de ion-litio. Estas tecnologías fueron seleccionadas por su amplio uso en sistemas fotovoltaicos aislados, por su profundidad de descarga y su vida útil. Con estas tecnologías se realizará una comparación detallada de su comportamiento durante los procesos de carga y descarga, evaluando su rendimiento en distintos escenarios operativos. Esta comparación resulta importante para determinar la batería más adecuada para aplicaciones que requieren sistemas de almacenamiento confiables y eficientes. El módulo fotovoltaico posee un regulador que fallaba al mostrar sus datos, por lo que se adquirió un regulador de carga MPPT. Este regulador maximiza la producción del panel solar para la carga de la batería, además de limitar el flujo de corriente hacia la batería cuando está cargada. Este tipo de regulador capta la producción máxima del panel, permitiéndolo funcionar en su máximo rendimiento. Al contar con un

inversor DC/AC dañado se adquirió uno nuevo de 1000 W el cual nos permite convertir la energía para el uso doméstico y mejorar la eficiencia energética.

En un sistema solar se pueden encontrar diferentes componentes como los paneles solares, reguladores de carga, inversores, baterías y la fiabilidad, que facilitan el análisis mediante su operación. Las energías renovables son las más prometedoras para el futuro, especialmente la energía fotovoltaica que utiliza la energía solar y la convierte en electricidad [9].

A continuación, en la Tabla 2 se presenta una revisión bibliográfica de diversas investigaciones sobre el estado de carga con diferentes tecnologías.

Tabla 2. Revisión Bibliográfica

Año de publicación	Autores	Reflejos	Referencia
2017	Rahul k, J.Rmprabhakar y Shankar S.	El artículo presenta un estudio comparativo basado en modelos matemáticos para la estimación del SOC mediante el observador Proporcional – Integral, Filtro de Kalman y lógica difusa para la protección de la batería.	[10]
2020	Beltran H, Ayuso P y Pérez E	El artículo realiza un análisis de la degradación de diferentes tipos de baterías de iones de litio, como NMC (Níquel, manganeso y cobalto) y LFP (Fosfato de hierro y litio), aplicadas en sistemas fotovoltaicos residenciales a través de una simulación horaria anual. Se demuestra que las celdas NMC se degradan más que las LFP.	[11]
2018	Astaneh M, Roshandel R, Dufo-López R y Bernal-Agustín J	El artículo presenta un enfoque de optimización macroscópico y microscópico para sistemas de energía renovable aislados, basados en baterías de iones de litio, con el fin de predecir la vida útil y analizar la sensibilidad de precios.	[12]
2019	Islam S, Saha S, Haque M y Mahmud M	El artículo presenta un análisis comparativo del rendimiento de las baterías más utilizadas en aplicaciones solares fotovoltaicas residenciales: plomo-ácido, plomo-carbono, ferrosfosfato de litio y níquel manganeso de cobalto, con la finalidad de evaluar las características de carga.	[13]
2021	Dufo-López R, Cortés-Arcos T, Artal-Sevil J y Bernal-Agustín J	El artículo presenta un análisis comparativo de modelos de predicción de la vida útil de baterías de plomo-ácido y de iones de litio en un sistema fotovoltaico autónomo, considerando dos ubicaciones con zonas climáticas distintas. Se identifica mejores resultados durante la vida útil de las baterías de litio.	[14]

3.2 Elementos de un sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico está integrado de diversos componentes vinculados entre sí permitiendo aprovechar la energía solar y convertirla en electricidad utilizable para la carga electrónica.

Tabla 3. Funciones y componentes del sistema fotovoltaico off-grid

Componentes	Función
Paneles solares	Capta la radiación solar y la convierte en energía eléctrica
Inversor	Este dispositivo transforma la DC en AC para la utilización de cargas domésticas
Controlador de carga	Controla el intercambio energético entre los paneles solares y las baterías, lo que contribuye a prevenir sobrecargas
Baterías	Conserva la energía para su utilización en momentos que no exista producción del panel fotovoltaico
Estructura y soporte	Ayuda a sostener los equipos del sistema fotovoltaico
Cables y conexiones	Interconecta todos los elementos del sistema

3.2.1 Panel solar fotovoltaico

El efecto se produce cuando la radiación solar incide sobre la unión del material semiconductor, se rompen los enlaces y el campo eléctrico E orienta a las cargas del electrón y del hueco estableciéndose la diferencia de potencia que alimenta a la carga [15].



Figura 1. Panel fotovoltaico

3.2.2 Controladores de carga

Como sabemos para que un sistema fotovoltaico autónomo pueda proporcionar energía eléctrica en cualquier momento a su circuito de utilización, se requiere de un sistema que guarde la energía eléctrica restante, generada durante el día, para reutilizarla en las horas de menor irradiación. Los procedimientos de la batería son llevados a cabo por el regulador de carga. Este

equipo es esencial para salvaguardar la durabilidad de la batería y optimizar el desempeño del sistema FV [16].

En el mercado existen diferentes tipos de reguladores de carga. Por lo general, los controladores de ancho de pulso (PWM) y los de seguimiento de punto de máxima (MPPT). La principal diferencia es que radica en el aprovechamiento de la energía generada por los paneles solares. Un controlador de carga PWM utiliza el voltaje de salida del panel necesario para la carga o descarga de la batería. Por otro lado, los controladores de carga MPPT aprovechan al máximo que produce el panel fotovoltaico, independientemente del voltaje [17].

En la tabla presenta la comparación entre un PWM y MPPT.

3.2.3 Inversor

El inversor solar puede ser uno de los componentes más relevantes de un sistema de potencia fotovoltaica. Su tarea consiste en transformar la corriente directa fluctuante de los paneles solares en corriente alterna provechosa, la cual puede ser suministrada a la red de electricidad pública o empleada a nivel local en un sistema independiente. En contraposición a los inversores tradicionales diseñados para funcionar con una fuente de energía estable, los inversores para sistemas fotovoltaicos, debido a la variabilidad del recurso primario, necesitan tener funciones específicas como la regulación de la potencia producida y protecciones para el sistema fotovoltaico. [18].



Figura 2. Inversor 1000W

3.3 Baterías

La batería conocido también como acumulador electroquímico es el que almacena energía eléctrica mediante una transformación en energía electroquímica, esta batería al sistema fotovoltaico el que permite dar autonomía, independientemente de la generación, satisfaciendo

en cualquier momento los requerimientos de consumo, contribuyendo al buen desempeño del sistema para lo cual aporta picos de intensidad superiores a los que proporciona el generador FV y estabilizar la tensión del sistema [19].

3.4 Estado de carga (SOC)

El estado de carga (SOC) es un parámetro que indica la cantidad de carga restante en una batería en un momento determinado. Representa la relación entre la carga actual disponible y la capacidad total nominal de la batería, y suele expresarse como un porcentaje (%). Donde la capacidad nominal es un valor de fábrica y es la cantidad máxima de carga para almacenar. Este parámetro se estima a partir de mediciones de voltaje, corriente y tiempo de operación. No existe una medición precisa del SOC, ya que la capacidad de la batería varía con el tiempo debido a diversos factores, como la temperatura, presión, esfuerzos mecánicos, reacciones químicas internas y el número de ciclos de carga y descarga [20].

La estimación del SOC se realiza mediante técnicas basadas en modelos matemáticos y base de datos, pero depende de la metodología aplicada. En algunos estudios existen las siguientes categorías de medición [21].

- Medición directa: se utiliza parámetros eléctricos de la batería en circuito abierto o terminales y la impedancia de la batería como la espectroscopia.
- Estimación contable: Utiliza la corriente de descarga como entrada y realiza la integración de la corriente a lo largo del tiempo para calcular el estado de carga (SOC) de la batería.
- Sistemas adaptativos: son métodos de redes neuronales diseñados para ajustar dinámicamente el SOC.
- Métodos híbridos: Adaptan las ventajas de algunos métodos para determinar una cercana estimación del SOC.

3.5 Estado de Salud

El estado de salud (SOH) de una batería es un indicador crucial que facilita la valoración de su vida útil y el grado de deterioro que ha experimentado a lo largo del tiempo, particularmente en relación con la necesidad de energía y las condiciones de utilización. Este indicador refleja la correlación entre la capacidad presente y la capacidad nominal de la batería, y facilita la identificación del nivel de degradación tanto en capacidad como en resistencia interna, lo que impacta directamente en su desempeño y autonomía [22]. El estudio de factores como el voltaje,

la corriente y el período de descarga es crucial para establecer el grado de impacto que tiene la batería. Estos datos facilitan la identificación de cuándo el rendimiento ha experimentado una reducción considerable, lo que resulta crucial para determinar el momento correcto para su sustitución y prevenir errores en el sistema.

Existen diversos parámetros que afectan la salud de la batería. A continuación, se detalla los más significativos:

3.5.1 Temperatura de funcionamiento

La temperatura de operación es un parámetro importante para conocer el deterioro de la salud de la batería. Cuando la temperatura máxima dado por el fabricante se encuentra menor a la temperatura de funcionamiento, la salud de la batería corre riesgo ya que se deteriora exponencialmente. También si, la temperatura mínima del fabricante es inferior a la mínima de operación, la salud de batería se ve comprometida. Estos motivos son relacionados con la disminución de la capacidad [23].

3.5.2 Ciclo de carga y descarga

La carga y descarga son procesos fundamentales en el uso eficiente de una batería, durante los cuales su rendimiento puede verse afectado. En estos ciclos se producen reacciones químicas que, con el tiempo, generan pérdidas de capacidad debido a la degradación de los componentes activos [23].

3.5.3 Profundidad de descarga (DOD)

La descarga profunda ocurre cuando el proceso de descarga hace que la tensión de la batería descienda por debajo del voltaje límite. Esta condición puede causar daños químicos irreversibles, como la disociación del electrolito o la degradación de los electrodos, lo que reduce la vida útil de la batería [23].

3.5.4 Sobrecarga

La sobrecarga ocurre cuando una batería continúa recibiendo corriente después de haber alcanzado su carga completa. Esta condición provoca reacciones químicas no deseadas, causando la descomposición del electrolito, aumento de la resistencia interna y pérdida de capacidad [23].

3.5.5 Tasa de carga y descarga

La tasa de carga o descarga influye directamente en el envejecimiento de la batería. Cuando se aplican corrientes elevadas, la batería alcanza rápidamente su voltaje máximo, lo que puede inducir la formación de compuestos químicos no deseados en los electrodos. Además, las altas corrientes de carga pueden generar esfuerzos mecánicos internos que provocan agrietamiento, acelerando la degradación de los materiales activos [23].

3.5.6 Envejecimiento

El envejecimiento de una batería se manifiesta por la disminución progresiva de su capacidad para suministrar la misma cantidad de carga que cuando era nueva. Esta condición se produce debido a procesos físicos y químicos internos que ocurren con el paso del tiempo y el uso continuo [23].

3.6 Tipos de batería

A continuación, se describen las principales clases de baterías existentes en el mercado, su operación, beneficios y limitaciones.

3.6.1 Baterías de Plomo-ácido

El funcionamiento de la batería de plomo-ácido se basa en una reacción electroquímica que ocurre en una celda electroquímica compuesta por dos polos: uno positivo y otro negativo, que al estar conectados en un circuito cerrado permiten el flujo de corriente eléctrica. El electrodo positivo está formado por una placa de dióxido de plomo, mientras que el polo negativo consiste en plomo esponjoso. Ambos están inmersos en un electrolito compuesto por una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4), de ahí el nombre “ácido” de este tipo de baterías. Estas baterías están compuestas por múltiples celdas conectadas en serie, cada una generando un voltaje nominal aproximado de 2 V. La combinación de estas celdas permite alcanzar tensiones estándar como 6 V, 12 V, entre otras. Se utilizan comúnmente en sistemas fotovoltaicos y de respaldo debido a su bajo costo y disponibilidad en el mercado [24].

Existen dos grupos principales de baterías de Plomo-Ácido, clasificado según la forma en que el electrolito se encuentra:

- Baterías de electrolito inundado o ventiladas (VLA) los electrodos se encuentran completamente inmersos en un sobrante de electrolito líquido. Estas tecnologías

requieren mantenimiento regular, incluyendo el control del nivel del electrolito y ventilación adecuada debido a la emisión de gases durante la carga.

- Baterías selladas o controladas por una válvula (VRLA) en las que el electrolito está inmobilizado ya sea en un separador absorbente (como la tecnología AGM) o en forma de gel (baterías de plomo-ácido gel). Estas baterías son libres de mantenimiento y están diseñadas para evitar derrames y minimizar la emisión de gases, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en espacios cerrados o con difícil acceso.

Dentro de este marco teórico se profundiza en el análisis de las baterías VRLA. En comparación con las baterías VLA, las VRLA presentan ciertas limitaciones, como una vida útil más corta, menor tolerancia a temperaturas elevadas e intolerancia ante condiciones de uso exigentes. Durante su funcionamiento normal, toda batería genera gases como resultado de las reacciones químicas internas. Si la generación de gases es excesiva, puede acumularse presión en el interior de la batería. Por esta razón, no es adecuado sellarlas completamente. En su lugar, las baterías VRLA incorporan válvulas de seguridad que permiten la liberación controlada de gases acumulados, manteniendo la celda hermética bajo condiciones normales de operación [24].

Las baterías VRLA pueden clasificarse en dos tipos principales:

- AGM: el electrolito líquido es absorbido y retenido en un separador de fibra de vidrio.
- GEL: el electrolito se encuentra mezclado con un agente gelificante, lo que le da una consistencia semisólida.

Las baterías de gel son una variante optimizada de AGM debido a su composición química. Su costo es superior al de las AGM y las de plomo-ácido, pero se compensa con su eficacia

La vida útil estimada de estas baterías de VRLA oscila entre 5 y 10 años, dependiendo de las condiciones de operación y mantenimiento. En términos de ciclos de carga y descarga, su expectativa de vida útil se sitúa entre 200 y 500 ciclos, lo cual puede variar según la profundidad de descarga (DoD) y la temperatura de funcionamiento. Desde el punto de vista ambiental, estas baterías son reciclables, debido a la presencia de plomo[24].



Figura 3. Batería Plomo- ácido Gel

A continuación, en la Figura 4 se presenta la curva de carga típica.

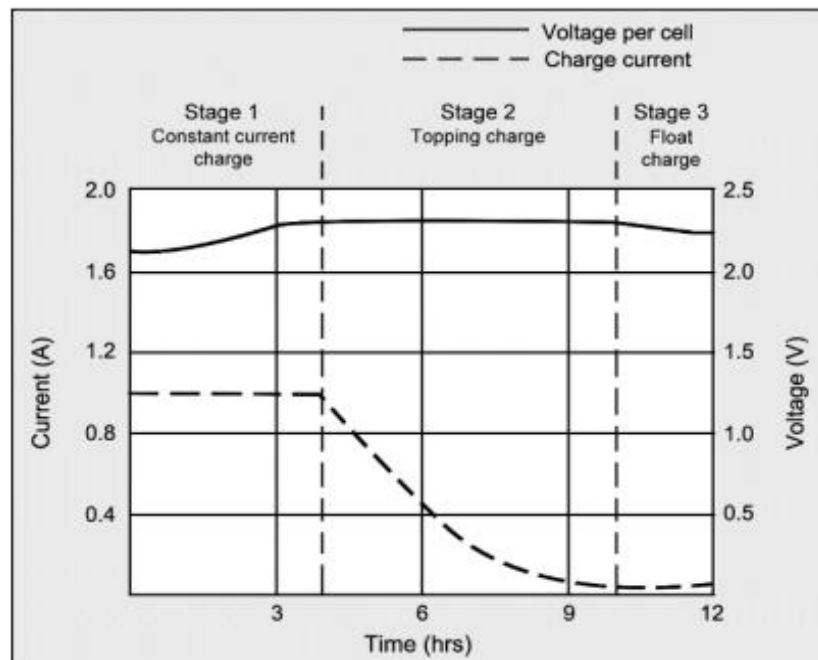


Figura 4. Curva típica de carga de una batería Plomo-ácido [24]

En la Tabla 4 se presenta las ventajas y desventajas de este tipo de baterías.

Tabla 4. Ventajas y desventajas baterías de Plomo-ácido [24]

Ventajas	Desventajas
Bajo costo de fabricación	Baja densidad energética
Baja tasa de autodescarga	Tiempo de carga prolongado (14-16 horas), no aptas para carga rápida
Tensión elevada por celda (2V)	Peso elevado
Tecnología consolidada y confiable con décadas de uso	Baja potencia en comparación con otras tecnologías
Amplia disponibilidad en diferentes tamaños y diseños	Ciclo de vida limitado en comparación con baterías modernas
Buen rendimiento en ambientes de baja y alta temperatura	Requiere mantenimiento periódico
Celdas con voltaje elevado comparado con otras tecnologías	Riesgo ambiental debido al contenido de plomo y ácido sulfúrico
Componentes reciclables	Deben mantenerse cargadas para evitar la sulfatación y pérdida de capacidad
Alta eficiencia de conversión energética	

3.6.2 Baterías de Litio

Las baterías han sido utilizadas en varios dispositivos en la actualidad, sea del hogar o para industrias, entonces la selección del tipo de batería depende para que serán utilizadas [25]. Sus aplicaciones se basan en su alta densidad energética y eficiencia. En la Figura 5 se muestra la densidad energética de varias tecnologías, destacándose la de ion-litio como la más elevada.

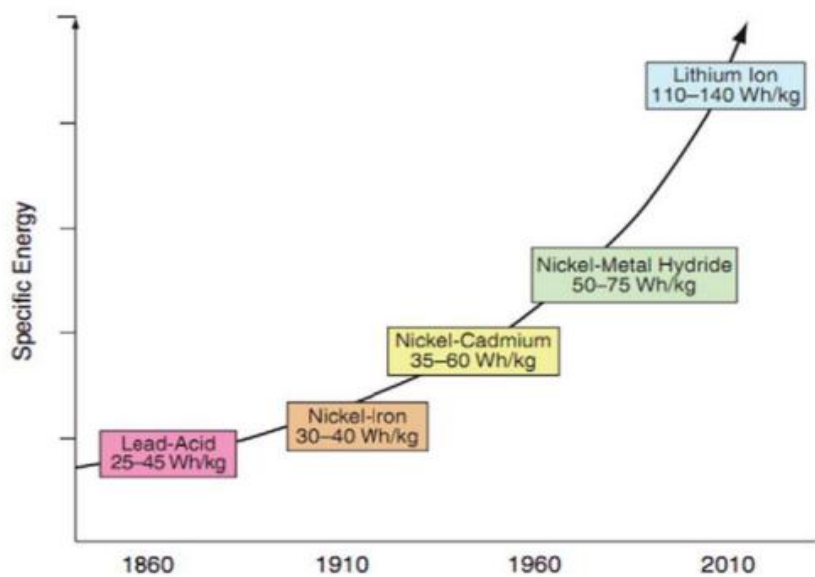


Figura 5. Aumento de la densidad energética de diferentes tipos de baterías

Las baterías de ion-litio están compuestas por un cátodo (electrodo positivo), un ánodo (electrodo negativo) y un electrolito que actúa como medio conductor. El cátodo suele estar compuesto por un óxido metálico de litio, mientras que el ánodo está formado por carbono poroso, comúnmente grafito. Durante el proceso de descarga, los iones de litio fluyen desde el ánodo hacia el cátodo a través del electrolito y el separador, generando un flujo de corriente eléctrica hacia el exterior del circuito. En el proceso de carga, este flujo se invierte y los iones se mueven del cátodo al ánodo, almacenando energía nuevamente en la celda [24], [26]. La siguiente figura muestra el procedimiento:

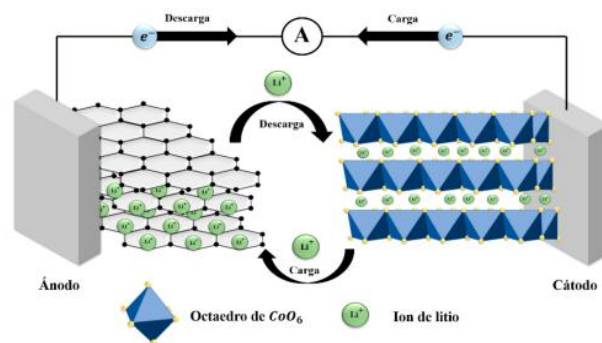


Figura 6. funcionamiento de una batería de ion litio [27]

- Batería de Óxido de Cobalto de Litio (LiCoO_2)

La batería de ion-litio con cátodo de óxido de cobalto y ánodo de grafito ofrece buena densidad de energía, pero presenta una vida útil corta, baja estabilidad térmica y sensibilidad a altas corrientes. Necesita protección electrónica para evitar sobrecargas y sobrecalentamiento. Cabe recalcar que su ciclo de vida es de 500 a 1000 [24].

- Batería de Manganeso de Litio (LiMn_2O_4)

La batería de ion-litio con cátodo de óxido de litio-manganeso tiene buena estabilidad térmica, seguridad y capacidad para descargas rápidas debido a su estructura espinela tridimensional. Aunque su capacidad es menor que la de Li-cobalto, se usa en herramientas eléctricas, equipos médicos y vehículos eléctricos, especialmente combinada con litio-níquel manganeso (NMC) para mejorar rendimiento y prolongar la vida útil. Cabe recalcar que su ciclo de vida es de 300 a 700 [24].

- Batería de Litio Fosfato Hierro (LiFePO₄)

Las baterías de litio-ion con tecnología LiFePO₄ proporcionan un excelente desempeño electroquímico con baja resistencia, mayor índice de corriente, larga vida útil, estabilidad térmica, mayor seguridad y tolerancia en caso de exigencias. Su composición se basa en un cátodo litio y hierro fosfato, así como en un ánodo de grafito (carbono), un electrolito líquido compuesto por sales de litio disueltas en solventes orgánicos y un separador microporoso que evita el contacto directo entre los electrodos. Su voltaje nominal es de 3.2 V por celda, lo cual es ligeramente inferior al de otras químicas como NMC o LCO. Sin embargo, esta tecnología se destaca por su estabilidad térmica, alta seguridad frente a sobrecalentamientos y una vida útil superior. Además, tolera descargas y cargas a altas corrientes debido a su baja resistencia interna, y se degrada mucho menos cuando permanece completamente cargada por largos periodos. Aunque presenta una autodescarga ligeramente mayor que otros sistemas de ion-litio, este efecto puede corregirse mediante controles electrónicos avanzados. Su composición libre de cobalto reduce el impacto ambiental y mejora la sostenibilidad. Por estas razones, las baterías LFP se emplean ampliamente en movilidad eléctrica, almacenamiento renovable, dispositivos médicos y como reemplazo de baterías de plomo-ácido en aplicaciones de 12.8 V mediante la conexión de cuatro celdas en serie. En comparación con otras baterías de iones de litio, las baterías de LiFePO₄ pueden ser más costosas. Sin embargo, a largo plazo representan una inversión más económica debido a su mayor seguridad, estabilidad térmica y una vida útil prolongada (entre 1000 y 2000 ciclos) [24].



Figura 7. Batería de ion-litio.

En la Tabla 5 se presenta las ventajas y desventajas.

Tabla 5. Ventajas y desventajas baterías de ion-litio [24]

Ventajas	Desventajas
Alta seguridad térmica y química, menor riesgo de combustión	Menor densidad energética comparada con otras baterías de litio
Vida útil larga, con más ciclos de carga y descarga	Más caras otras tecnologías, especialmente las baterías de plomo-ácido
Alta eficiencia de carga y descarga (90-95%)	Voltaje nominal más bajo (3.2-3.3 V por celda)
Estabilidad térmica, funcionan bien en rangos amplios de temperatura	Requieren sistemas de gestión de batería (BMS) para protegerlas
Resistencia a altas tasas de descarga sin degradación rápida	Tasa de descarga limitada.
Material no tóxico	Menor disponibilidad en el mercado respecto a tecnologías más comunes
Bajo mantenimiento comparado con baterías de plomo-ácido.	Sensibles a sobrecarga si no cuentan con protecciones adecuadas.
Peso ligero	Menor compatibilidad con algunos cargadores convencionales
Buen rendimiento en aplicaciones de energía renovable y almacenamiento estacionario	

- Batería de Óxido de Aluminio de Cobalto y Níquel Litio (LiNiCoAlO_2)

Presenta muchas similitudes con la batería NMC, ya que ofrece una alta densidad energética, una potencia específica razonablemente buena y una larga vida útil. Sin embargo, cuenta con menor seguridad y un precio algo más elevado [24].

- Batería de Titanato de Litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

Estas baterías sustituyen al grafito en el ánodo y presentan una estructura de espinela. El cátodo puede ser óxido de manganeso de litio o NMC. Además, ofrecen un mayor número de ciclos, mejor seguridad, buena descarga a bajas temperaturas (80% de capacidad a $-30\text{ }^\circ\text{C}$) y evita la formación de litio metálico durante cargas rápidas o a baja temperatura. También tiene mejor estabilidad térmica a altas temperaturas, aunque su costo es mayor que otras baterías de ion litio [24].

- Polímero de Litio

Las baterías de polímero de litio son similares a las de ion litio, pero usan un electrolito sólido en forma de película plástica en lugar del líquido tradicional. Esto las hace más ligeras, flexibles y delgadas, ideales para dispositivos pequeños como teléfonos y tablets. Tienen buena potencia, son seguras y no necesitan cargadores especiales, aunque suelen ser más caras. En el pasado, estas baterías funcionaban mejor con calor, pero ahora usan electrolitos gelificados que les permiten trabajar bien a temperatura ambiente [24].

3.7 Beneficios técnicos de una repotenciación

La repotenciación de un sistema off-grid nos ofrece una mayor densidad energética ya que los módulos y equipos modernos presentan un 25% más eficientes que los módulos antiguos. El incremento de la confiabilidad del sistema es una parte importante al repotenciar ya que esto nos evita el sobredimensionamiento innecesario del almacenamiento, lo cual nos reduce los costos en el mantenimiento ya que al tener equipos nuevos posee menor área de instalación.

3.7.1 Consideraciones del diseño

Para ejecutar una repotenciación adecuada se deben analizar los siguientes aspectos para tener un buen diseño:

- **Compatibilidad eléctrica:** tensión y corriente nominal de los nuevos módulos vs. los existentes.
- **Capacidad de regulación:** verificar si el regulador soporta la nueva potencia.
- **Estado del banco de baterías:** las baterías viejas pueden limitar el rendimiento.
- **Condiciones ambientales:** irradiancia local, temperatura y orientación.
- Un rediseño incorrecto podría generar desbalance en la producción y almacenamiento, reduciendo la eficiencia del sistema.

Un rediseño incorrecto podría generar desbalance en la producción y almacenamiento, reduciendo la eficiencia del sistema.

3.7.2 Autonomía energética y sostenibilidad

La autogestión energética se refiere a la capacidad de un sistema de generar su propia energía, disminuyendo así la demanda de otros recursos. Además, está vinculado con la sostenibilidad, ya que promueve el uso de energías renovables y también reduce la huella ambiental.

La implementación de sistemas fotovoltaicos independientes del sistema eléctrico es un método para lograr autonomía energética en áreas rurales, permitiendo que las comunidades produzcan electricidad de manera sostenible. Estos sistemas contribuyen a disminuir la liberación de gases de efecto invernadero y fomentar la resistencia energética frente a las variaciones en los costos de los combustibles fósiles [28].

3.8 Beneficios de la energía fotovoltaica

Los beneficios de la energía solar son:

- Es limpia
- Es inagotable
- Es sostenible
- Aplicabilidad en áreas remotas

3.9 Sistemas fotovoltaicos

La instalación fotovoltaica se compone de cuatro componentes esenciales que se encargan de las funciones primordiales, que incluyen la captación de energía, regulación, acumulación de energía e inversión de tensión. Todos los componentes deben estar correctamente vinculados y siempre poseer protecciones, tal como se ilustra en la Figura 8, que presenta los componentes clave de un sistema solar fotovoltaico, que son; módulo fotovoltaico, regulador o controlador de carga e inversor solar [15].

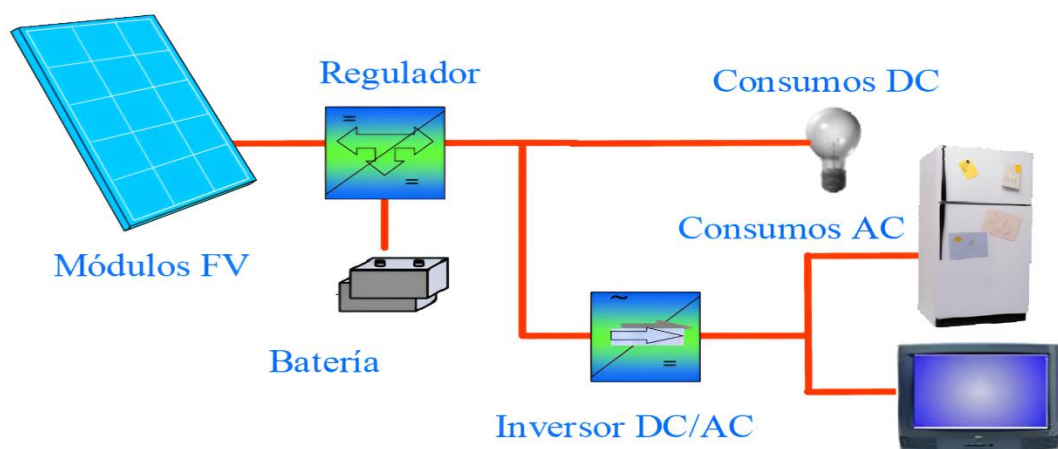


Figura 8. Estructura de un sistema fotovoltaico [30]

3.9.1 Sistema solar fotovoltaico conectado a la red pública

Los sistemas fotovoltaicos vinculados a la red eléctrica son una de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica que ha ganado importancia en años recientes, debido a su gran potencial de uso en áreas urbanas próximas a la red eléctrica. La Figura 9 ilustra que estos sistemas se componen de un generador de energía solar que está vinculado a la red eléctrica tradicional mediante un inversor, generando un intercambio de energía entre esta y el sistema fotovoltaico, un rasgo distintivo de estas instalaciones. Por lo tanto, el sistema suministra energía a la red cuando su producción excede el consumo local, y extrae energía de ella en caso [31].

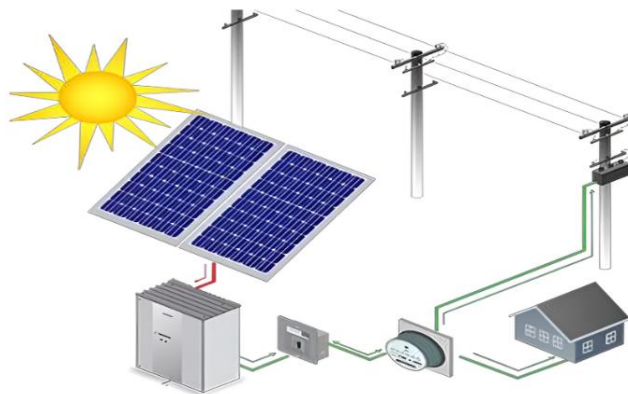


Figura 9. Sistema solar fotovoltaico conectado a la red

3.9.2 Sistema fotovoltaico aislado

Una planta solar fotovoltaica aislada es un sistema de producción de energía que no se encuentra vinculado a la red y suministra al dueño energía obtenida de la luz solar. Usualmente, necesita guardar la energía solar producida en una batería o celda solar y posibilitar su uso las 24 horas del día. Estas instalaciones fotovoltaicas fuera de la red son perfectas para zonas que no pueden vincularse a la red o están en proceso de vincularse a la red debido a los elevados gastos asociados a la edificación del sistema de energía de línea, particularmente en zonas rurales aisladas [31].

3.9.3 Sistema solar fotovoltaico híbrido

Este sistema inyecta energía en la red cuando su producción supera al consumo local, y extrae energía de ella en caso contrario. La diferencia fundamental entre un sistema fotovoltaico autónomo y los conectados a red, consiste en la ausencia, en este último caso, del subsistema de acumulación, formado por la batería y la regulación de carga. Además, el inversor, en los sistemas conectados a red, deberá estar en fase con la con la tensión de la red [31]. En la Figura 10 se muestra el sistema solar híbrido.

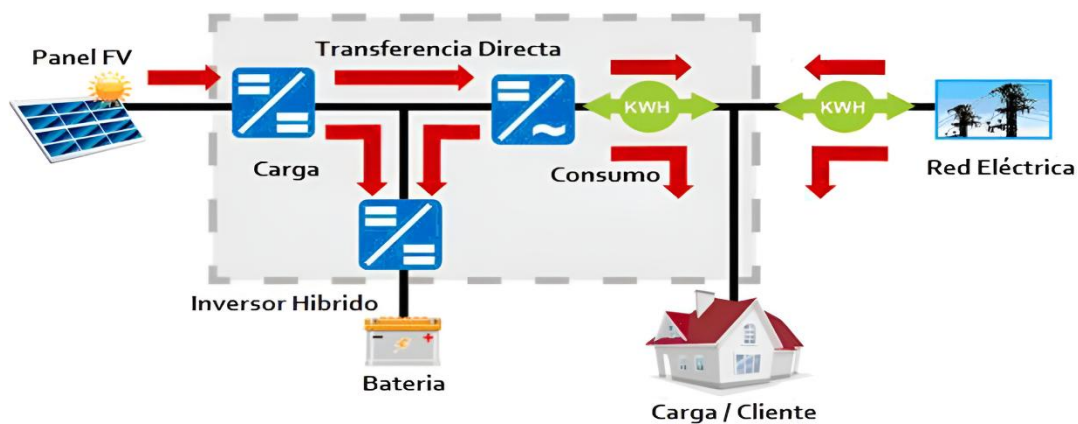


Figura 10. Sistema fotovoltaico híbrido [31]

3.10 Radiación solar

La irradiación se refiere a la energía que es emitida por el sol y esta llega a la tierra en forma de radiación electromagnética [32]. En sí la radiación solar es uno de los principales recursos energéticos naturales en el planeta y se va propagando a través del espacio.

3.10.1 Tipos de radiación

La radiación solar se puede clasificar todo dependiendo de cómo esto llega a la superficie terrestre y además de cómo interactúa con la atmósfera entre estos son:

- Directa
- Difusa
- Reflejada

3.11 Orientación e inclinación

En relación al ángulo de inclinación, el lugar del planeta donde la irradiación solar impacta de manera más perpendicular es Ecuador. Por lo tanto, los módulos no deben inclinarse, solo deben situarse de forma horizontal con vista al cielo [33]. El colocar los paneles solares en dirección al suroeste, que esté a la puesta al sol, permiten que los paneles proporcionen más energía, cuando las personas se encuentren en su casa y usen los electrodomésticos.

Tabla 6. Inclinación y orientación de los paneles solares [34]

Latitud	Ángulo de inclinación máximo
0° - 5°	0° - 10°
6° - 20°	Latitud local +5°
21° - 45°	Latitud local +10°
46° - 65°	Latitud local +15°
66° - 75°	80°

3.12 Radiación solar en Ecuador

Se muestra el mapa solar del Ecuador, el cual permite confirmar la abundancia del recurso solar en todo el país. Una vez excluidas zonas que tendrían pendientes mayores a 30 grados, zonas totalmente sombreadas, y zonas con una orientación este, oeste que desfavorece el aprovechamiento óptimo del recurso solar, se determinó que el Ecuador tiene más de 14 millones de hectáreas con buenas condiciones de radiación solar incidente clasificadas en baja (<1300 kWh/kWp), intermedia (1350 – 1500 kWh/kWp), alta (1500 – 1600 kWh/kWp) y muy alta (>1600 kWh/kWp) generación de potencial de electricidad fotovoltaica [35].

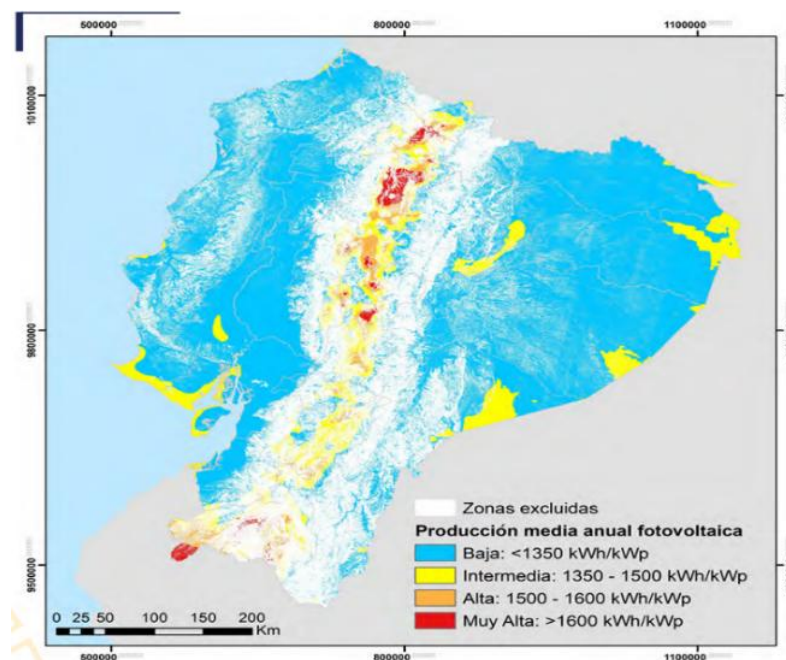


Figura 11. Mapa solar del potencial de generación de electricidad fotovoltaica en Ecuador [35]

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Para determinar el proceso de carga y descarga de las baterías dentro del sistema fotovoltaico aislado se diseñó una metodología experimental centrada en el funcionamiento de las dos tecnologías de baterías: Ion-Litio (LiFePO_4 o LFP) y plomo-ácido gel (VRLA). Este estudio se desarrolló a partir de la repotenciación del sistema aislado existente en el laboratorio de Smart Grid, con el objetivo de analizar el comportamiento de cada tecnología bajo condiciones reales de operación y comparar su funcionamiento.

En una primera etapa, se evaluó el estado del prototipo utilizando criterios de funcionalidad y rendimiento de los equipos eléctricos existentes. Durante este proceso, se mejoró el sistema fotovoltaico mediante mantenimiento y sustitución de elementos en caso de ser necesario. En la segunda fase, se establecieron las directrices para la ejecución y los parámetros eléctricos a

medir. Donde se debe evaluar el recurso solar disponible mediante un piranómetro con el fin de conocer la irradiancia global horizontal durante las jornadas de prueba. La tercera etapa consiste en realizar las pruebas de carga de las baterías. Donde se utilizaron diferentes configuraciones de paneles solares registrando el comportamiento del voltaje, la corriente suministrada y el SOC alcanzado por cada tipo de batería. En la cuarta etapa se ejecutaron las pruebas de descarga, aplicando distintos perfiles de consumo: cargas constantes y perfiles con variación horaria y de potencia. Esta etapa permitió observar la respuesta de cada batería ante diferentes demandas energéticas, evaluando su capacidad de suministro, estabilidad de voltaje y profundidad de descarga. Finalmente, se compara las dos tecnologías con los mismos criterios de carga/descarga con la idea de establecer conclusiones para su correcto uso en sistemas fotovoltaicos aislados. En el diagrama de la Figura 12 se presenta la metodología correspondiente.

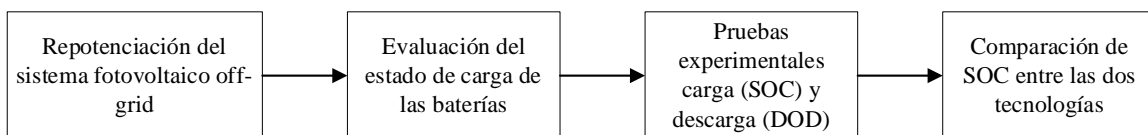


Figura 12. Diagrama de bloques de la metodología

4.1 Repotenciación del sistema fotovoltaico off-grid


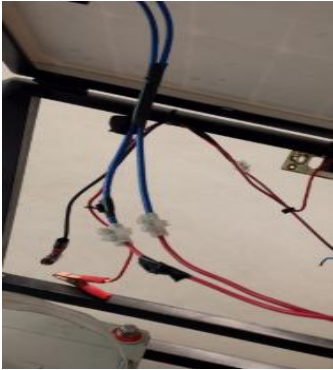


Se realizó una inspección visual del estado del prototipo y de cada uno de los componentes del sistema, incluyendo la base estructural, conexiones, inversor y baterías. En la Figura 13 se evidencia los elementos.



Figura 13. Estado inicial del prototipo fotovoltaico off-grid

Para evaluar el estado del sistema existente, se utilizaron los criterios operativos establecidos previamente en la revisión bibliográfica. Con base en estos lineamientos, se realizaron pruebas prácticas para verificar su funcionamiento y detectar posibles fallos en las componentes estas se evidencian en la Tabla 7.

Tabla 7. Mejoras aplicadas en el sistema fotovoltaico off-grid

Componente	Estado	Mejora Implementada	Resultado
Base estructural	Presenta desgaste en la pintura y acumulación de polvo. No cuenta con un soporte para las baterías.	Se realizó la limpieza de la estructura metálica con guaípe y thinner, luego se aplicó la pintura. Se implementó una base adecuada para las baterías.	
Conexiones	No dispone de conexiones adecuadas entre los componentes.	Se realizó el cableado y conexiones adecuadas.	
Entradas	Ausencia de etiquetas de identificación y algunos conectores (plugs).	Se colocaron las etiquetas y conectores plugs.	
Inversor	Fallas operativas.	Equipo repotenciado.	

Controlador Solar	Presentaba fallas del SOC y no permitía una lectura continua ni precisa.	Se reemplazó por un regulador que muestra el estado de la batería en incrementos del 1%.	
Batería	Exceso polvo y desgaste.	Se sustituyó por dos tecnologías de baterías: Ion-Litio y Ácido-Plomo Gel.	

4.2 Componentes principales del sistema fotovoltaico

El módulo fotovoltaico está conformado por diversos elementos que aseguran la autonomía y el funcionamiento eficiente del sistema. A continuación, se detallan los elementos clave y, respectivamente, las propiedades técnicas.

4.2.1 Paneles solares

El sistema dispone de dos paneles solares de 60 W cada uno, los cuales pueden configurarse en conexión en serie o en paralelo, según los requerimientos energéticos del sistema. A continuación, en la Tabla 8 se detallan sus principales características técnicas:

Tabla 8. Características de paneles solares

Equipo	Valor	Unidad
Panel Fotovoltaico		
Potencia nominal	60	W
Voltaje (Vmp)	18	V
Corriente (Imp)	3.33	A
Voltaje de Circuito abierto (Voc)	22	V
Voltaje de Circuito cerrado (Isc)	3.93	A
Panel Fotovoltaico		
Potencia nominal	60	W
Voltaje (Vmp)	21.5	V
Corriente (Imp)	3.83	A
Voltaje de Circuito abierto (Voc)	17	V
Voltaje de Circuito cerrado (Isc)	3.53	A

Para el análisis del sistema de almacenamiento se utilizaron cuatro paneles solares de 50 W cada uno, conectados en paralelo para maximizar la corriente de salida. A continuación, se presenta sus principales características técnicas en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de paneles solares

Equipo	Valor	Unidad
Panel Fotovoltaico (EXMORK)		
Potencia nominal	50	W
Voltaje (Vmp)	17.21	V
Corriente (Imp)	2.91	A
Voltaje de Circuito abierto (Voc)	21.94	V
Voltaje de Circuito cerrado (Isc)	3.12	A
Panel Fotovoltaico (ZONHAN)		
Potencia nominal	50	W
Voltaje (Vmp)	17.68	V
Corriente (Imp)	2.83	A
Voltaje de Circuito abierto (Voc)	21.68	V
Voltaje de Circuito cerrado (Isc)	3.01	A

4.2.2 Inversor

El sistema cuenta con un inversor de 12 V, cuya función es transformar la DC proveniente de las baterías en AC, permitiendo así alimentar diversos dispositivos eléctricos, en la Tabla 10 se detalla los parámetros técnicos.

Tabla 10. Características de Inversor

Equipo	Valor	Unidad
INVERSOR		
Potencia nominal	1000	W
Voltaje de entrada	12	V
Voltaje de salida AC	220	V

4.2.3 Controlador de carga

Este dispositivo regula la energía proveniente de los paneles hacia las baterías, evitando la sobrecarga y descargas profundas de las baterías. Además, tiene la capacidad de adaptarse automáticamente a sistemas de 12V, 24 V, 36 V y 48 V, compatible con distintas configuraciones de almacenamiento energético, en la Tabla 11 se detalla los parámetros técnicos.

Tabla 11. Datos de fábrica de los componentes del módulo fotovoltaico

Equipo	Valor	Unidad
CONTROLADOR (MPPT Solar charge controller)		
Voltaje nominal de la batería	12,24,36,48	V
Corriente máximo para la batería	100	A

4.2.4 Baterías

Las baterías son las encargadas de almacenar la energía proveniente de los paneles solares. Para el análisis de carga en diferentes tecnologías, se implementaron dos baterías de 50 Ah. En la tabla se detallan sus parámetros técnicos, donde se puede ver que la corriente estándar de carga en la batería de ion-litio es de 10 A mientras que la batería de plomo-ácido tiene 5 A, lo que indica que el tiempo de carga de la batería de ion-litio es más rápido. Además, indica que esta batería puede abastecer mayor demanda de carga en corriente continua. También presenta una mayor profundidad de descarga, con 6000 ciclos de vida útil al 80% del DOD mientras que la batería plomo-ácido posee 1200 ciclos de vida útil al 30% del DOD. En la Tabla 12, se presenta los parámetros técnicos.

Tabla 12. Parámetros técnicos de la batería

Batería	Ion-Litio	Plomo-ácido	Unidad
Capacidad Nominal	50	50	Ah
Voltaje Nominal	12.8	12	V
Eficiencia	96%	50%	
Tipo de celda	LiFePO4	VRLA	
Voltaje de carga	14.6	13.5–13.8 (float mode), 14.4–14.7 (cyclic)	V
Corriente de carga estándar	10	5	A
Corriente máxima de carga continua	50	15	A
Voltaje de corte de descarga	10	10.5	V
Ciclo de vida	6000 (80% DOD)	500 (50% DOD) 200 (100% DOD) 1200 (30% DOD)	Cycles
Precio	225	140	USD

En la FCIYA dispone de dos baterías, una de 100 Ah y otra de 50 Ah las dos de plomo ácido-gel. Además, cuenta con cuatro paneles solares de 50 W cada uno, junto con dos paneles adicionales de 60 W provenientes del módulo repotenciado, sumando una potencia total de 320 W destinada a la carga de las baterías. Con este antecedente se procede a calcular cuál de las dos baterías se las puede cargar en un día con la potencia disponible.

Para estimar la energía que pueden almacenar las baterías de 50 Ah y 100 Ah (ambas a 12 VDC), se deben considerar las pérdidas debidas a la temperatura, al controlador de carga y al

cableado. Por ello se aplica un factor de pérdidas adicional del 15 %. La energía útil se calcula como:

Batería de 50Ah

$$E_{batería} = V_{nominal} \times C_{Ah} \times Eficiencia \quad (1)$$

$$E_{batería} = 12V \times 50Ah \times 1,15 \quad (2)$$

$$E_{batería} = 690Wh \quad (3)$$

Batería de 100Ah

$$E_{batería} = V_{nominal} \times C_{Ah} \times Eficiencia \quad (4)$$

$$E_{batería} = 12V \times 100Ah \times 1,15 \quad (5)$$

$$E_{batería} = 1380Wh \quad (6)$$

Para calcular la energía diaria que pueden generar los paneles solares, se considera la cantidad de horas solares pico (HSP) propias de la región. En el Ecuador, se dispone de aproximadamente 4 HSP, por lo que la energía producida se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E_{panel\ día} = P_{panel} \times HSP \quad (7)$$

$$E_{panel\ día} = 320W \times 4h \quad (8)$$

$$E_{panel\ día} = 1280Wh/día \quad (9)$$

4.3 Sistema Fotovoltaico off-grid

El sistema fotovoltaico empleado se muestra en la Figura 14, el cual está compuesto de cuatro módulos fotovoltaicos independientes de 50 W y dos módulos adicionales de 60 W de potencia nominal cada uno, configurable en paralelo para modificar la corriente total disponible. Estos módulos fueron conectados a un controlador de carga, encargado de regular el flujo de energía hacia las baterías y protegerlas ante sobrecargas o descargas profundas. Asimismo, se integró un inversor de 1000 W para transformar la corriente continua almacenada en las baterías en corriente alterna, permitiendo así la conexión de cargas típicas de uso doméstico. Las baterías utilizadas en el estudio, tanto ion-litio como plomo-ácido gel, presentan una capacidad nominal de 50 Ah cada una, siendo seleccionadas por su compatibilidad en voltaje y su aplicación habitual en sistemas de energía renovable no convencional.

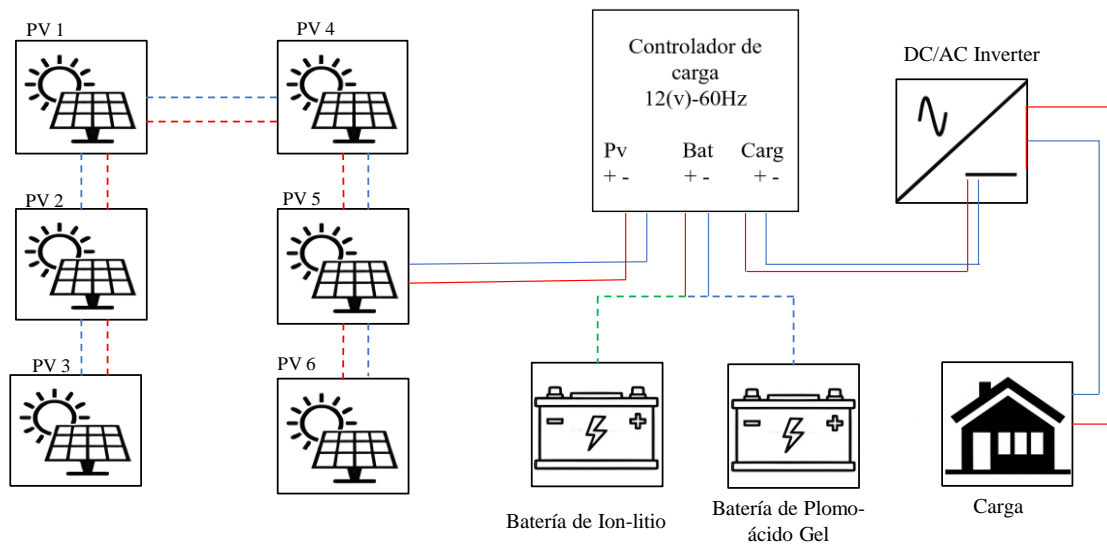


Figura 14. Diagrama del sistema fotovoltaico off-grid

4.4 Evaluación del estado de carga

Las pruebas experimentales se realizaron en el área exterior del laboratorio de Smart Grid de la Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador: $-0^{\circ}59'14''$ S y $-78^{\circ}37'14''$ O, donde se dispuso un entorno controlado para simular las condiciones de operación del sistema fotovoltaico aislado. Durante las jornadas de ensayo, se llevaron a cabo mediciones continuas de la radiación solar durante un intervalo de 12 horas cada 15 minutos, utilizando el piranómetro modelo Apogee MP-200 [36], cuyas características técnicas aseguran una alta precisión en la detección de la irradiancia solar.

Paralelamente se llevó a cabo el monitoreo de los parámetros eléctricos de voltaje y corriente en las baterías con el uso de un multímetro digital Fluke 289 [37], el cual fue conectado en los puntos de carga/descarga del sistema. La tensión de las baterías fue medida directamente en los bornes de salida de cada una de las tecnologías evaluadas: ion-litio y plomo-ácido gel, lo que permitió registrar con detalle su comportamiento frente a las variaciones en la generación y demanda energética.

En la Tabla 13 se especifican los datos de los instrumentos utilizados.

Tabla 13. Características técnicas de los equipos de medida.

Equipo	Detalle
Piranómetro MP-200	
Error de calibración a 1000 W/m ²	Menos del 3%
No proporcionalidad	Menos del 1% hasta 2000 W/m ²
Tiempo de reacción	Menos de 1 ms
Ángulo de visión	180°
Espectro de sensibilidad	360 a 1120 nm
Medidas físicas	Integrado con calibre: 24 mm de diámetro, 33 mm de altura
Dimensiones del medidor	126 cm de largo, 70 mm de ancho, 24 mm de alto
Multímetro Fluke 289	
Voltaje DC	Rango: 50mV a 1000 V, Precisión ±0.025%
Voltaje AC	Rango: 50mV a 1000 V, Precisión ±0.4 %
Corriente DC	Rango: 500 µA a 10 A, Precisión ±0.05 %
Corriente AC	Rango: 500 µA a 10 A, Precisión ±0.6 %
Duración de la batería	Hasta 200 h (modo de registro)
Dimensiones	22.2 × 10.2 × 6 cm

Con la información del portal de la NASA Power, se realizó un estudio de la radiación solar. Como se muestra en la Figura 15 muestra el patrón de irradiación del mes de marzo, que se mantuvo estable entre las 6:00 y las 18:00 horas, con una media diaria proyectada de 4 a 5 horas de irradiación solar máxima. Es importante destacar que el 28 de dicho mes registró el máximo nivel de radiación solar al mediodía, con 464.97W/m², el 9 de ese mismo día registró la menor radiación solar, con 35.23W/m².

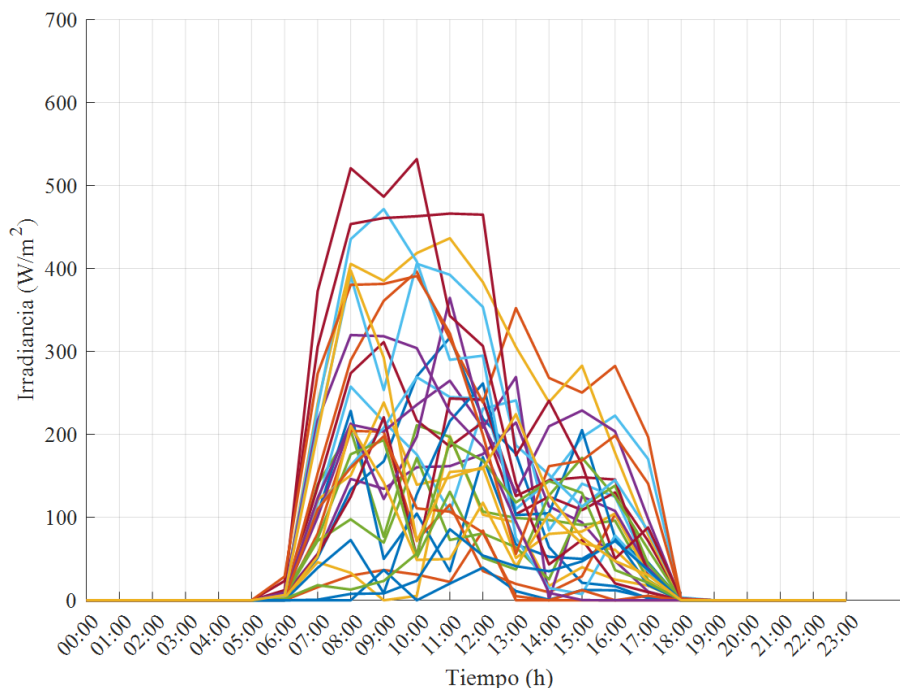


Figura 15. recurso solar del mes de marzo

Además, la Figura 16 ilustra la irradiancia durante abril. La irradiación solar máxima se registra a las 12h00 del día 24 del mes, alcanzando un valor de 350.18 W/m², mientras que el día 5 del presente presenta la menor radiación solar a las 12h00 registrado un valor de 22.18 W/m². Lo que demuestra que el recurso solar en estos meses corresponde con baja radiación solar.

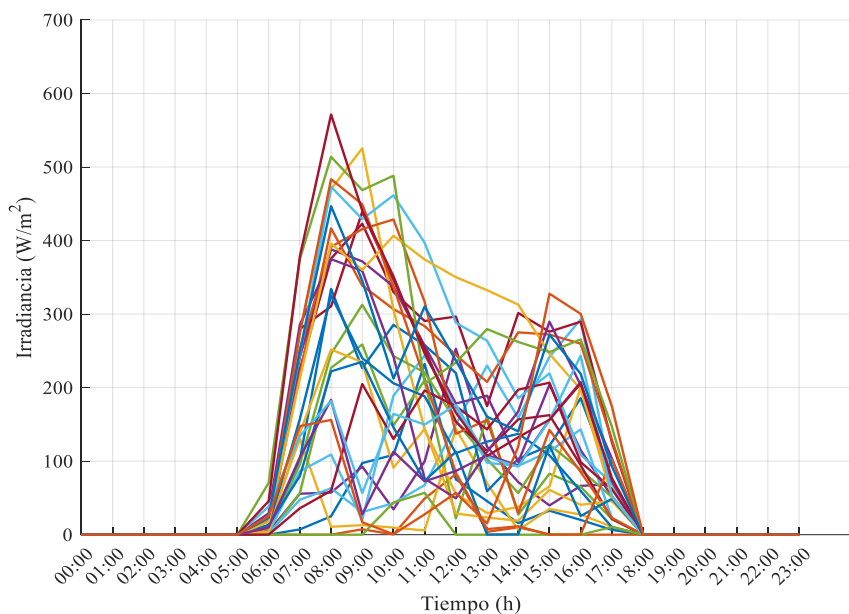


Figura 16. recurso solar del mes de abril

A continuación, en la Figura 17, se muestran los gráficos medios de radiación solar de cada semana del mes de marzo. Esto permite observar que la semana 3 presenta una mayor radiación solar que las demás semanas, considerando que al mediodía se alcanza el punto de máxima

radiación solar con 249.89 W/m^2 , por otra parte, la semana 2 tiene menor radiación solar al mediodía con un valor de 160.53 W/m^2 .

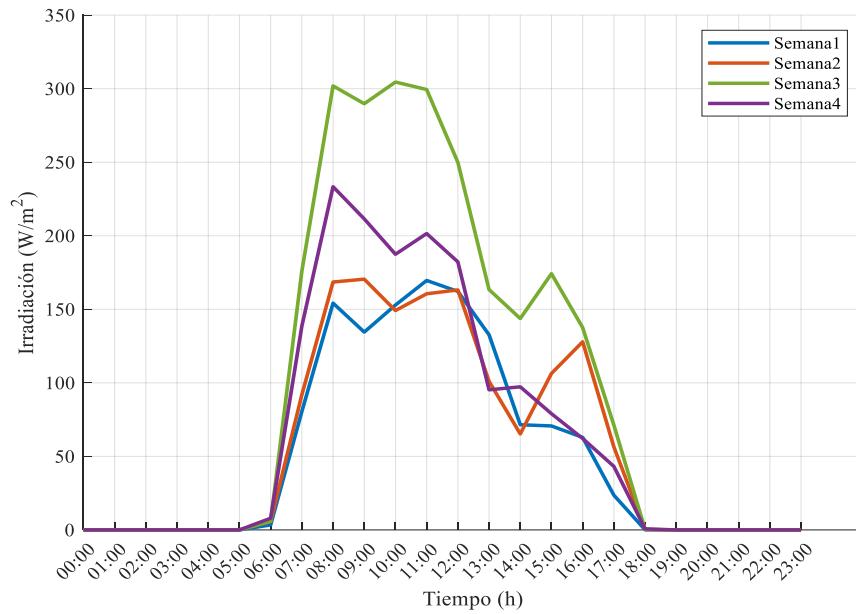


Figura 17. Irradiancia promedio de cada semana del mes de marzo

De igual manera, en la Figura 18, se presenta las gráficas promedio de radiación solar de cada semana del mes de abril, de esta manera se puede apreciar que la semana 2 tiene mayor radiación solar que las demás semanas tomando en cuenta que al mediodía es el punto máximo de radiación solar que es de 168.36 W/m^2 , por otra parte, la semana 3 tiene menor radiación solar al mediodía con un valor de 112.75 W/m^2 .

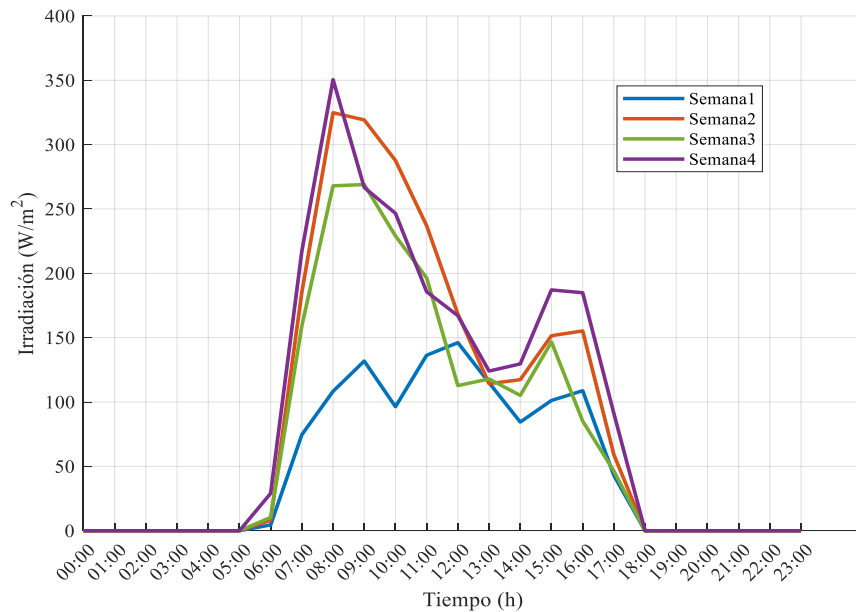


Figura 18. Irradiancia promedio de cada semana del mes de abril

Adicionalmente, se realizaron mediciones mediante el piranómetro durante los días de pruebas de carga. Como se observa en la Figura 19, el día 1 de medición presenta la mayor radiación solar al mediodía con un valor de 569 W/m², mientras que el día con menos radiación solar al mediodía es de 114 W/m².

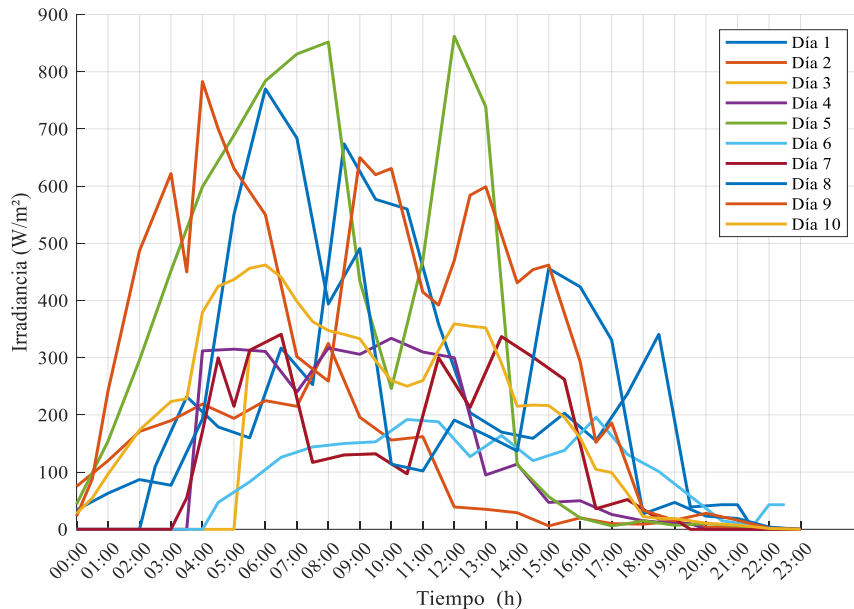


Figura 19. Irradiancia promedio de cada día de medición

Estos resultados con los datos obtenidos, se observa que el recurso solar se encuentra en las horas de la mañana ya que a medio día los niveles de irradiancia sol disminuyen progresivamente. Esta variación influye directamente en la eficiencia del proceso de carga de los sistemas fotovoltaicos.

4.5 Pruebas experimentales de carga de baterías

Las pruebas de carga en las dos tecnologías de baterías se desarrollaron mediante tres escenarios experimentales, variando la configuración del sistema fotovoltaico en cuanto al número de módulos utilizados. Para cada caso se emplearon paneles solares en paralelo, en el primer escenario se utilizaron dos módulos, en el segundo, cuatro, y en el tercero, seis módulos. Todas estas pruebas se llevaron a cabo con una inclinación fija de 15° para maximizar el aprovechamiento de la radiación solar incidente en la ubicación geográfica del sitio de ensayo.

Para cuantificar la corriente durante el procedimiento de carga, se detuvo el circuito en la salida positiva de la batería y se asignó el multímetro digital al pin positivo del controlador de carga. Esta medida permitió documentar de manera exacta la corriente que los paneles fotovoltaicos proporcionaban a las baterías en cada situación. Se supervisó directamente la tensión en los conectores de las baterías de LFP y VRLA, lo que permitió realizar un monitoreo constante del

progreso de la carga durante las horas de mayor actividad solar. Además, se empleó un controlador de carga que tiene como objetivo principal salvaguardar las baterías frente a sobrecargas y descargas intensas. En el caso de las baterías de VRLA, el proceso de carga se dividió en tres etapas: carga inicial, absorción y flotación. Durante la fase de absorción se llevó a cabo la ecualización de voltaje entre celdas para garantizar un equilibrio adecuado, y en las fases posteriores el controlador mantuvo un voltaje constante mientras la corriente disminuía progresivamente, evitando daños por sobrecarga [5]. El propio controlador indicaba en pantalla la etapa activa en cada momento.

Por otro lado, las baterías de LFP no requieren procesos de ecualización ni flotación. En su caso la carga se realiza mediante la entrega constante de voltaje o corriente según el estado de la batería, hasta alcanzar el umbral máximo de carga definido por el fabricante. Este tipo de gestión permite una carga más directa y eficiente, y reduce los tiempos de reposo entre etapas. La Figura 20 muestra el diagrama de flujo del procedimiento experimental empleado para evaluar el SOC durante la carga de las baterías. Este protocolo fue aplicado de forma independiente a cada tecnología de batería, asegurando así la comparabilidad entre los resultados obtenidos bajo condiciones similares.

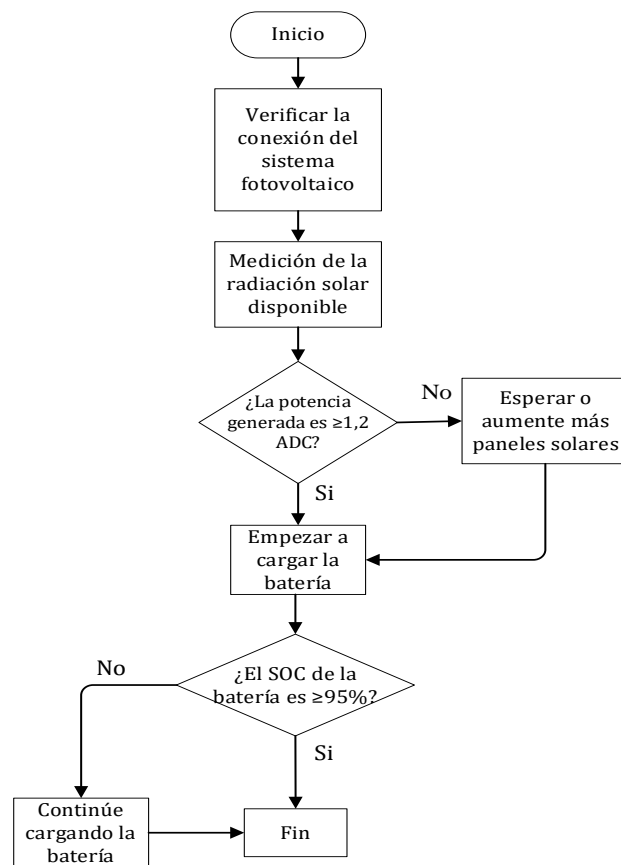


Figura 20. Diagrama de flujo de pruebas de carga de batería

4.6 Pruebas experimentales de descarga de baterías

Para llevar a cabo las pruebas de descarga de las baterías se conectó el multímetro digital en la salida positiva de cada batería, entre ésta y el terminal positivo del inversor, permitiendo registrar la corriente suministrada durante todo el proceso. Asimismo, la tensión de la batería fue medida directamente en sus terminales de salida, cabe aclarar que estas pruebas se realizaron con el sistema alimentado únicamente por las baterías, es decir, sin aporte de los paneles solares durante la descarga.

Las pruebas se diseñaron considerando cuatro escenarios con perfiles de demanda diferenciados. Los tres primeros perfiles simulan situaciones típicas de uso doméstico con variaciones en tiempo y potencia utilizando los equipos electrónicos en la Tabla 14. Mientras que el cuarto evalúa la respuesta de las baterías ante tasas de corriente constante (C-rate).

Tabla 14. Demanda de potencia de los equipos electrónicos utilizados para pruebas de descarga

Equipos	Cantidad	Potencia [W]
Focos led	4	60
Focos led	1	9
Cargador de celular	1	70
Cargador de celular	1	23
Laptop	1	250
Laptop	1	61
Televisión	1	122
Parlante	1	60
Taladro	1	610
LG Monitor 20mk400h	1	15
Total	13	1280

En el primer perfil de descarga, se conectaron múltiples dispositivos electrónicos durante un periodo de 24 horas. La carga total de 594 W, generando un consumo energético diario de aproximadamente 867 Wh. Donde se aplicó un factor de demanda del 50 % para simular un patrón de uso típico intermitente. En la Tabla 15 se presenta el levantamiento de cargas del primer escenario realizado.

Tabla 15. Primer perfil

Equipos	Cantidad	Potencia [W]	PT [W]	Horas de uso [H]	Factor de demanda	Energía por día [Wh/day]
Focos led	4	15	60	5	0.5	150
Focos led	1	9	9	5	0.5	22.5
Cargador de celular	1	70	70	1	0.5	35
Cargador de celular	1	23	23	1	0.5	11.5
Laptop	1	250	250	2	0.5	250
Televisión	1	122	122	6.5	0.5	396.5
Parlante	1	60	60	3.5	0.5	105
Total	10	549	594	24	0.5	867

El segundo perfil consistió en una descarga de 12 horas continuas, con una carga total de 1134 W. Bajo las mismas condiciones de factor de demanda (50 %), se obtuvo un consumo energético total de 653.5 Wh. En la Tabla 16 se presenta el estudio de cargas del segundo escenario.

Tabla 16. Segundo perfil

Equipos	Cantidad	Potencia [W]	PT [W]	Horas de uso [H]	Factor de demanda	Energía por día [Wh/day]
Focos led	3	15	45	3	0.5	67.5
monitorLG 20mk400h	1	15	15	1	0.5	7.5
Cargador de celular	1	70	70	1	0.5	35
Cargador de celular	1	23	23	2	0.5	23
Laptop	1	250	250	1	0.5	125
Laptop	1	61	61	1	0.5	30.5
Taladro	1	610	610	1	0.5	305
Parlante	1	60	60	2	0.5	60
Total	10	1104	1134	12	0.5	653.5

El tercer perfil implicó la conexión de una carga total de 184 W durante un periodo de 10 horas, generando un consumo diario estimado en 191 Wh. Este escenario representa una situación de baja demanda energética con operación sostenida. En la Tabla 17 se presenta el estudio de cargas del tercer escenario.

Tabla 17. Tercer perfil

Equipos	Cantidad	Potencia [W]	PT [W]	Horas de uso [H]	Factor de demanda	Energía por día [Wh/day]
Focos led	3	15	45	5	0.5	112.5
Focos led	1	9	9	3	0.5	13.5
Cargador de celular	1	70	70	1	0.5	35
Parlante	1	60	60	1	0.5	30
Total	6	154	184	10	0.5	191

Estos perfiles de usos diario permiten evaluar el comportamiento del sistema frente a cargas simultaneas, proporcionando una comparativa de rendimiento de las tecnologías de LFP Y VRL a través del análisis de corriente por cada equipo durante el tiempo aplicado en cada escenario. En esta evaluación, el SOC se ve afectado en función de la respuesta del sistema al cambio de equipo, dado que por la corriente que varía en cada tiempo de uso.

El cuarto perfil se enfocó en analizar el comportamiento de cada tecnología frente a diferentes tasas de descarga, aplicando corrientes constantes de 10 A, 7.5 A, 5 A y 2.5 A. Estas corrientes fueron aplicadas por separado tanto a la batería LFP como a la VRLA, permitiendo identificar su capacidad de respuesta frente a distintos C-rate, así como los efectos en la profundidad de descarga (DOD) y estabilidad del voltaje.

Para esta evaluación, se considera que la batería puede descargar a mayor profundidad debido a su mayor capacidad de almacenamiento. A partir de las características de descarga aplicadas a cada tecnología como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Tasa C con corriente promedio y tiempo de descarga para una batería 50 Ah

C-rate	Capacidad Nominal [Ah]	Corriente [A]	Tiempo de descarga [h]
0.1 C	50	10	5
0.15 C	50	7.5	6.7
0.2 C	50	5	10
0.05 C	50	2.5	20

La tasa C se define como el cociente entre la corriente y la capacidad de la batería[38]. Para calcular el C-rate de la batería, se utiliza la ecuación (10).

$$C = \frac{I [A]}{C_{n \text{ batería}} [Ah]} \quad (10)$$

Para obtener el tiempo de descarga de la batería, se utiliza la siguiente ecuación (11).

$$t = \frac{1}{C} \text{ o } \frac{C_{n \text{ batería}} [Ah]}{I [A]} \quad (11)$$

La Figura 21 muestra el diagrama de flujo del procedimiento experimental empleado para evaluar el SOC durante la descarga de las baterías, aplicado de forma independiente a cada una de las tecnologías. A partir del monitoreo continuo de la tensión de salida y la corriente entregada por las baterías bajo las distintas condiciones de operación, se construyeron los perfiles de descarga para LFP y VRLA. En cada caso, la profundidad de descarga (DOD) alcanzado fue determinado conforme a los límites operativos permitidos por cada tipo de tecnología, evidenciando sus diferencias en rendimiento, eficiencia y capacidad de respuesta.

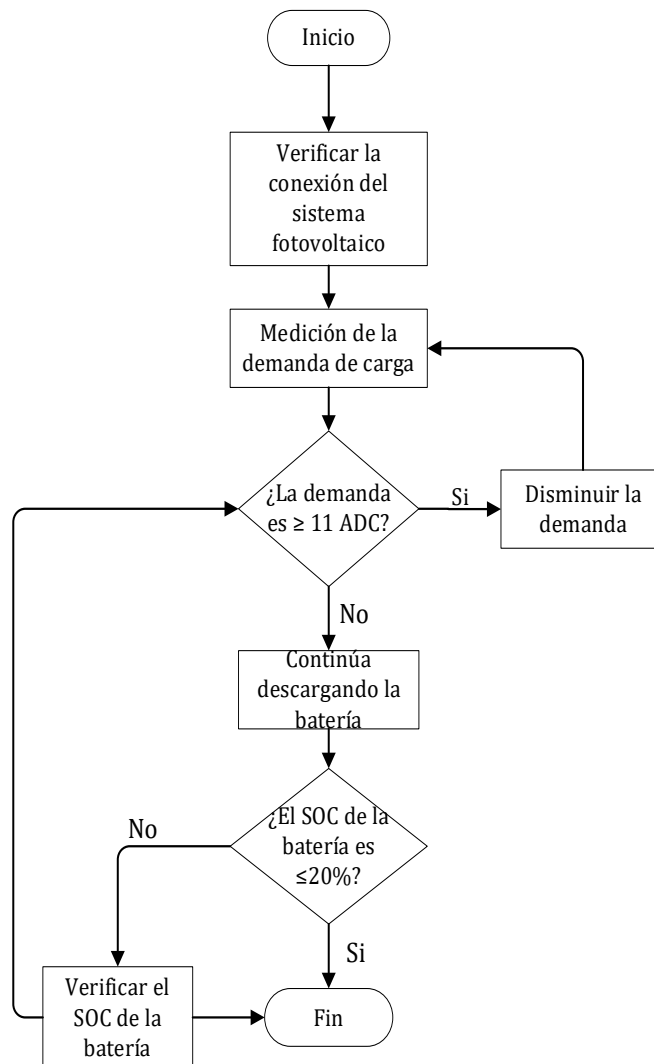


Figura 21. Diagrama de flujo de pruebas de descarga de batería

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente apartado se detallan los resultados obtenidos del proyecto investigativo sobre el sistema de generación fotovoltaico. El análisis se inicia con la evaluación del recurso solar disponible en los laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi, seguido por la selección de la capacidad de la batería más adecuada para el sistema. Finalmente, se presentan los resultados del análisis de los parámetros eléctricos, los cuales permiten comprender el comportamiento del sistema de almacenamiento.

5.1 Evaluación del recurso solar

De acuerdo con el análisis de las condiciones climáticas, basado con la revisión histórica del sitio destinado para el proyecto, se presenta en la Figura 22 el comportamiento de la radiación solar promedio durante el mes de marzo. Se observa que la radiación solar es beneficiosa desde

las 6h00 hasta las 18h00, alcanzando un valor promedio de radiación solar al mediodía de 189 W/m². Sin embargo, el valor de radiación solar más alto de radiación solar durante este mes se presentó a las 08h00 que es de 216 W/m².

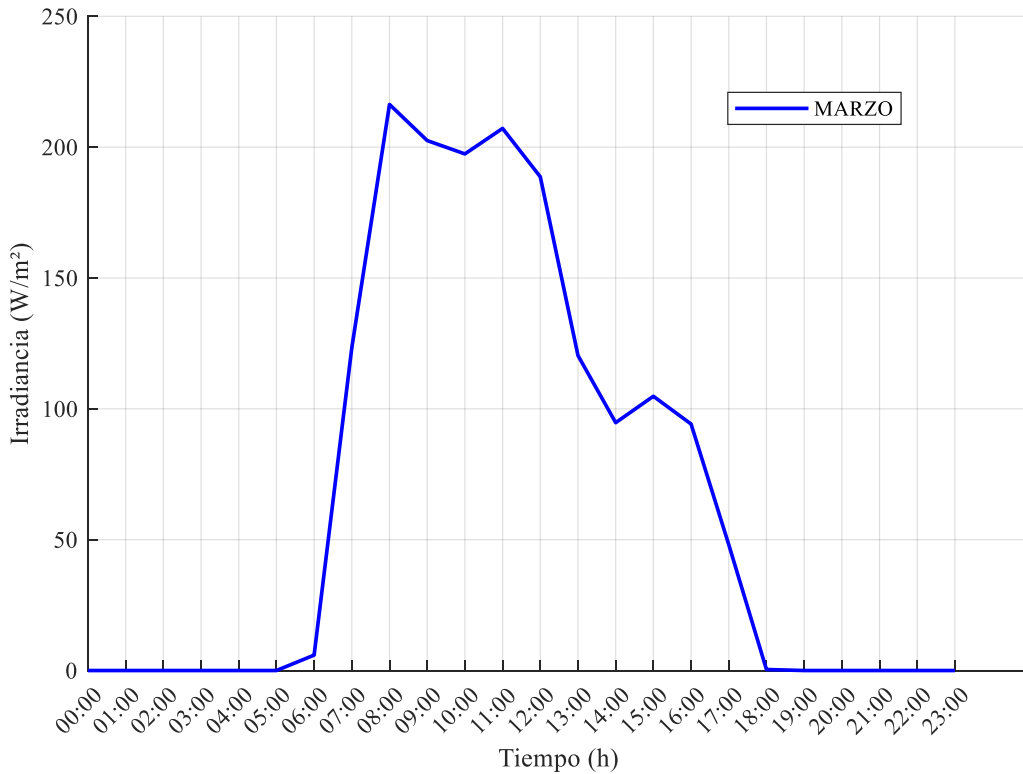


Figura 22. Irradiancia promedio del mes de marzo

Por otro lado, la Figura 23 muestra el comportamiento promedio de la radiación solar correspondiente al mes de abril. Se evidencia que este recurso está disponible aproximadamente durante 12 horas al día. Al igual que marzo, el valor promedio de radiación al mediodía fue de 189 W/m², lo cual se explica por la presencia de un clima lluvioso durante esta época del año. No obstante, en el mes de abril se alcanzó un pico de radiación de 269 W/m² a las 08h00. Durante estos meses, se evidencia una disminución en la intensidad solar por las tardes, correspondiente al aumento de nubosidad y las precipitaciones.

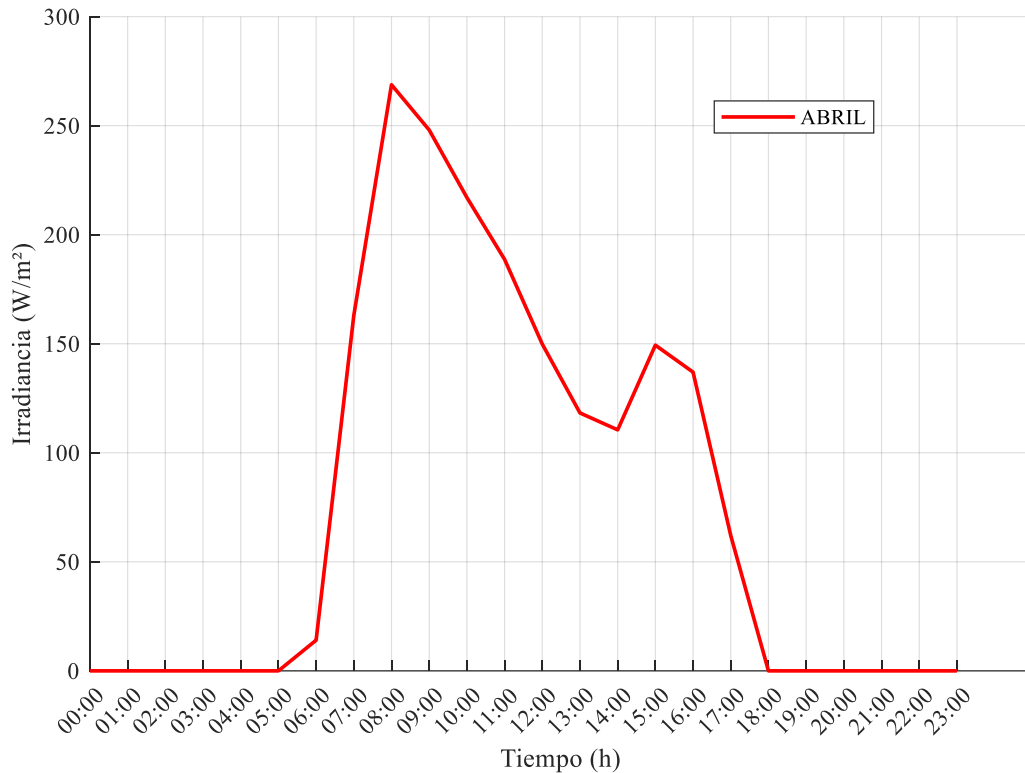


Figura 23. Irradiancia promedio del mes de abril

Además, los registros experimentales obtenidos con el piranómetro Apogee MP-200 durante los días de prueba correspondiente a los meses abril y marzo. Tal como se observa en la Figura 24, la radiación solar estuvo presente de manera continua entre las 06h00 y las 18h00, registrándose un promedio estimado de entre 4 y 5 horas solar pico por jornada. La irradiancia al mediodía fue de 271 W/m², mientras que el valor máximo registrado fue de 410 W/m² a las 10h00.

Al comparar estos resultados con los datos satelitales de referencia, se observa una leve correspondencia en las tendencias diarias, lo cual respalda la confiabilidad de las mediciones realizadas in situ. No obstante, los niveles de irradiancia obtenidos durante el periodo de estudio se consideran relativamente bajos para una operación óptima de los módulos fotovoltaicos utilizados. Esta limitación influye directamente en la cantidad de energía generada y, en consecuencia, en el tiempo requerido para completar el proceso de carga de las baterías, especialmente en escenarios con alta demanda energética o con un número reducido de paneles solares.

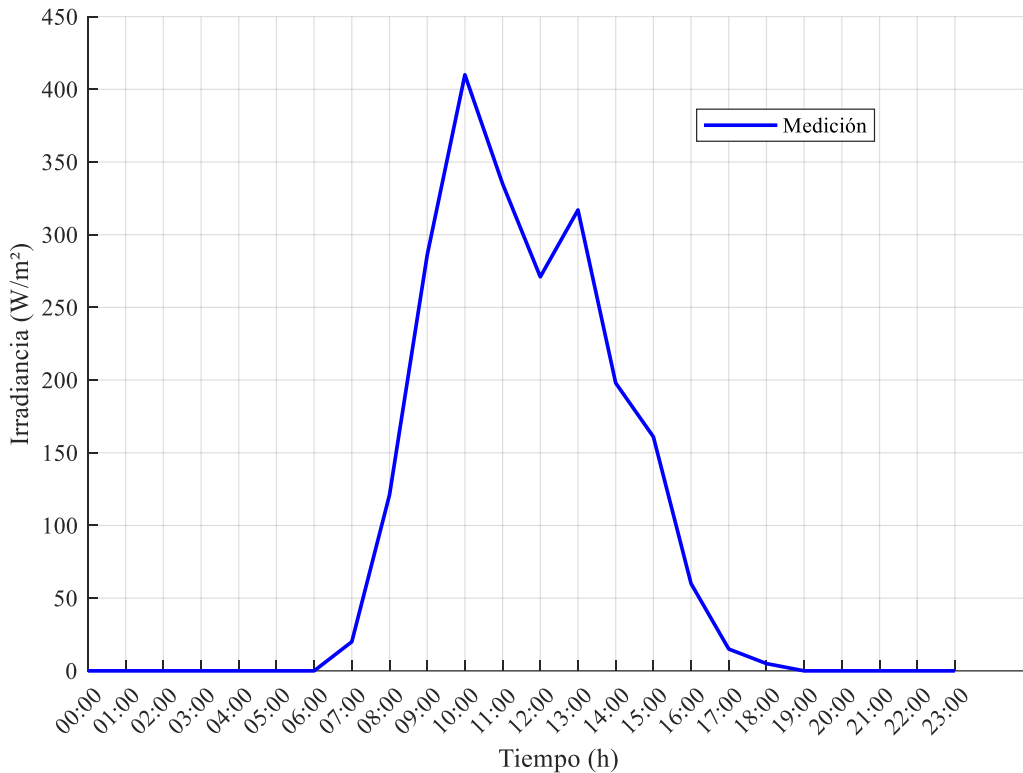


Figura 24. Irradiancia promedio medidas

5.2 Evaluación del Estado Carga (SOC)

En el procedimiento de carga de la batería de ion-litio, se analizó el rendimiento de las baterías frente a diversas disposiciones del sistema fotovoltaico, empleando 2, 4 y 6 paneles vinculados en paralelo. La Figura 25 ilustra la correlación directa entre la irradiación solar, ilustrada en gris, y la corriente de carga producida a lo largo del tiempo. Durante el día, se nota que la irradiancia empezó a incrementarse desde las 08h00 y persistió hasta el mediodía, lo que demuestra su efecto directo en el desempeño eléctrico del sistema.

En el escenario de cuatro paneles, se registró la corriente de carga más alta, llegando a niveles de 6 a 7 A durante tres horas seguidas, lo que refleja condiciones ideales de radiación y aprovechamiento energético. Por otro lado, en la situación con seis paneles, las condiciones de radiación solar resultaron ser menos ventajosas, lo que restringió la contribución energética a pesar del incremento en la cantidad de módulos conectados. No obstante, el sistema mostró un comportamiento estable, proporcionando una corriente estable de 3 a 6 A desde las 09h00 hasta las 13h00. Esto demuestra que la eficiencia del sistema no se basa en la cantidad de paneles, sino más bien en la intensidad de la radiación solar. Por otro lado, en el caso de dos paneles presentó una capacidad de generación limitada, con corriente que no superaron los 2.5 A durante

la mayor parte del tiempo, siendo dependiente de los picos de irradiancia para sostener una carga eficiente.

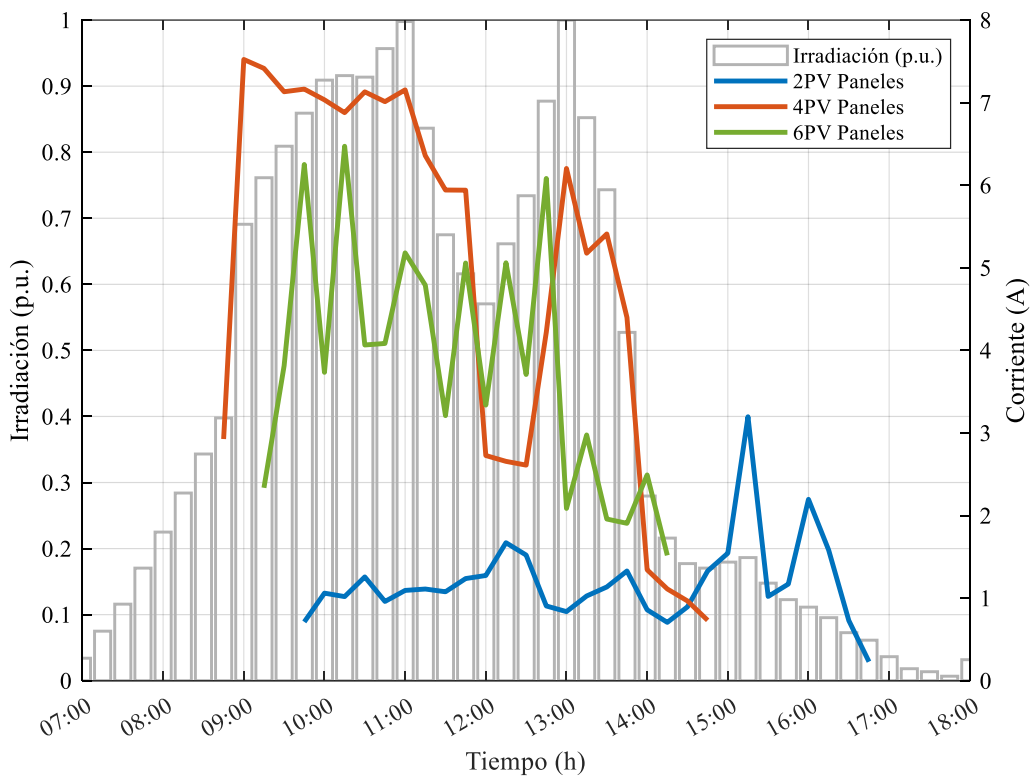


Figura 25. Irradiación solar por unidad vs. carga de batería de iones de litio en tres escenarios de uso

Por otra parte, la Figura 26 muestra la corriente de carga suministrada a la batería de plomo-ácido de gel bajo los tres escenarios evaluados, comparándola con los niveles de irradiancia solar por unidad. El escenario que presentó la mayor corriente de carga fue el que empleó seis paneles solares conectados en paralelo, alcanzando valores entre 3 y 5 A. Este comportamiento se explica por el hecho de que durante ese día alcanzó una irradiancia máxima suficiente para generar una corriente significativa dado por el mayor número de paneles. En contraste, los escenarios con dos y cuatro paneles registraron picos de radiación breves e intermitentes lo que impidió alcanzar niveles óptimos de carga en la batería plomo-ácido gel, debido a que el suministro energético fue inconstante y de menor intensidad.

A diferencia de la batería de ion-litio, la batería de plomo-ácido gel mostró una mayor sensibilidad frente a variaciones en la irradiancia, lo cual se relaciona con su menor capacidad para admitir corrientes elevadas de carga y de su proceso de carga (bulk, absorción y flotación). Esta característica tecnológica limita el aprovechamiento inmediato de los picos de irradiancia solar, reduciendo su eficiencia en condiciones variables.

Además, se puede observar entre las 11h30 y 13h00 la tendencia de las fluctuaciones notables en las curvas de corriente de los tres escenarios, debido a la presencia de nubosidad y variaciones de la radiación solar. Por lo general, cuando un sistema tiene más potencia instalada debería generar más corriente, como en el caso de 6 paneles frente a los 2 paneles, por factores del medio no ocurre de manera proporcional. Cabe recalcar que, en las horas de la tarde, la irradiancia disminuye progresivamente, pero el caso con mayor número de paneles opera de manera estable pese a la menor radiación existente.

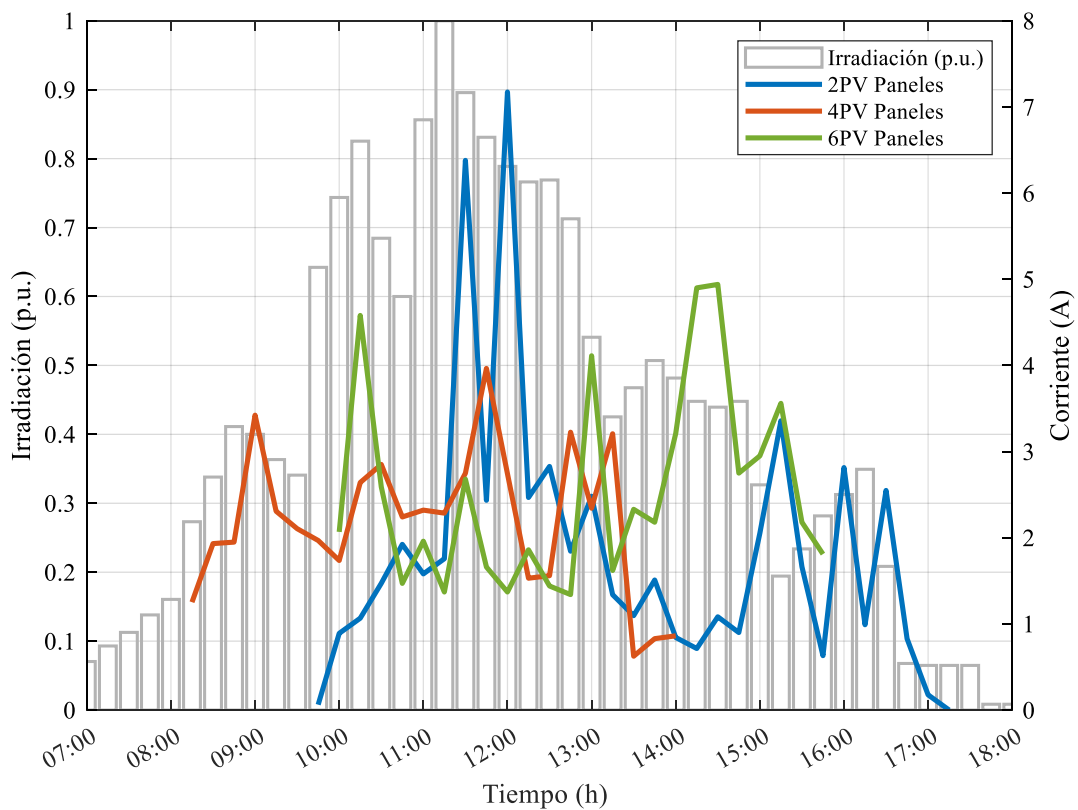


Figura 26. Irradiación solar por unidad vs. carga de batería de plomo-ácido en tres escenarios de uso

A continuación, se presentan los perfiles de carga obtenidos en función de los diferentes escenarios del sistema fotovoltaico, considerando variables como la irradiancia solar, el voltaje, la corriente y el estado de carga (SOC) para ambas tecnologías de baterías: ion-litio y plomo-ácido gel. Para este análisis, la Tabla 19 muestra los niveles de irradiancia registrados por hora durante el proceso de carga de la batería de ion-litio, en configuraciones con 2, 4 y 6 paneles solares conectados en paralelo. El estudio de carga se centró en los días más representativos, seleccionados en función de los niveles más altos de eficiencia, tomando en cuenta las horas con mayor disponibilidad de irradiancia solar.

Tabla 19. Irradiación registrada en la carga de la batería de ion-litio.

Tiempo en horas	2 paneles (W/m ²)	4 paneles (W/m ²)	6 paneles (W/m ²)
7:00	-	44	-
8:00	120	296	47
9:00	312	599	65
10:00	311	784	104
11:00	317	852	147
12:00	334	246	172
13:00	300	862	157
14:00	114	113	142
15:00	50	20	167
16:00	13	15	116
17:00	6	10	37
18:00	2	3	14

De manera similar, la Tabla 20 se muestra los perfiles de irradiación registrados durante la carga de la batería de plomo-ácido gel con las mismas configuraciones del sistema fotovoltaico. En ambos casos, los datos permiten establecer comparaciones entre el comportamiento de cada tecnología de almacenamiento frente a las condiciones de radiación solar.

Tabla 20. Irradiación registrada en la carga de la batería de plomo-ácido gel

Tiempo en horas	2 paneles (W/m ²)	4 paneles (W/m ²)	6 paneles (W/m ²)
7:00	-	75	-
8:00	110	171	-
9:00	206	219	313
10:00	239	225	327
11:00	464	325	124
12:00	569	156	115
13:00	282	39	257
14:00	165	29	319
15:00	179	20	149
16:00	289	9	35
17:00	41	4	18
18:00	-	3	-

Tras la evaluación de los perfiles horarios de irradiancia obtenidos durante el proceso de carga de ambas tecnologías de baterías, fue posible analizar el comportamiento de los sistemas de almacenamiento. Durante las pruebas de carga solar de la batería de ion-litio, se registró una irradiancia solar promedio al mediodía de 251 W/m², alcanzando un valor máximo de 440 W/m². En el caso de la batería de plomo-ácido gel, la irradiancia promedio al mediodía fue de 280 W/m², con un valor máximo de 355 W/m².

Se observa, en particular, la variación del voltaje de carga en función del estado de carga (SOC) de la batería, lo cual permite identificar las condiciones operativas del proceso de carga. Al comparar los datos de radiación acumulada registrados por el piranómetro durante los días de

medición, se obtuvo una radiación total de 8,582 W/m² para la batería de ion-litio y de 7,440 W/m² para la batería de plomo-ácido gel. Esto representa una diferencia del 13.3% menos de radiación durante las pruebas realizadas con esta última. Sin embargo, dado que las pruebas se llevaron a cabo en días diferentes, es necesario normalizar los valores de irradiación en unidades por unidad. Esto permite observar que la variación en la irradiancia solar influye directamente en el rendimiento de ambas tecnologías, afectando tanto los tiempos de carga como el comportamiento del estado de carga (SOC).

En este sentido, se presenta la Figura 27 correspondiente a la batería de ion-litio, que ilustra el efecto de los diferentes ensayos fotovoltaicos sobre el perfil de voltaje durante el proceso de carga. Se observa la evolución diaria del SOC de la batería de ion litio bajo los tres escenarios definidos por el número de paneles solares en función del nivel de tensión de la batería. En el primer escenario, con dos paneles de 50 W, la batería de ion-litio no logró superar el 50% de su capacidad de carga, debido a la limitada corriente disponible y a las condiciones de radiación solar relativamente bajas registradas durante ese día. Al aumentar a cuatro paneles, se evidenció una mejora significativa en el proceso de carga, alcanzando un SOC de 92%, coincidiendo con una jornada de irradiancia favorable. Mientras que, en el tercer escenario, con seis paneles conectados en paralelo, la batería alcanzó un SOC del 80%, a pesar de que ese día se registraron niveles bajos de radiación. Este resultado pone en evidencia la ventaja de contar con una mayor potencia instalada, ya que permite compensar parcialmente la variabilidad del recurso solar.

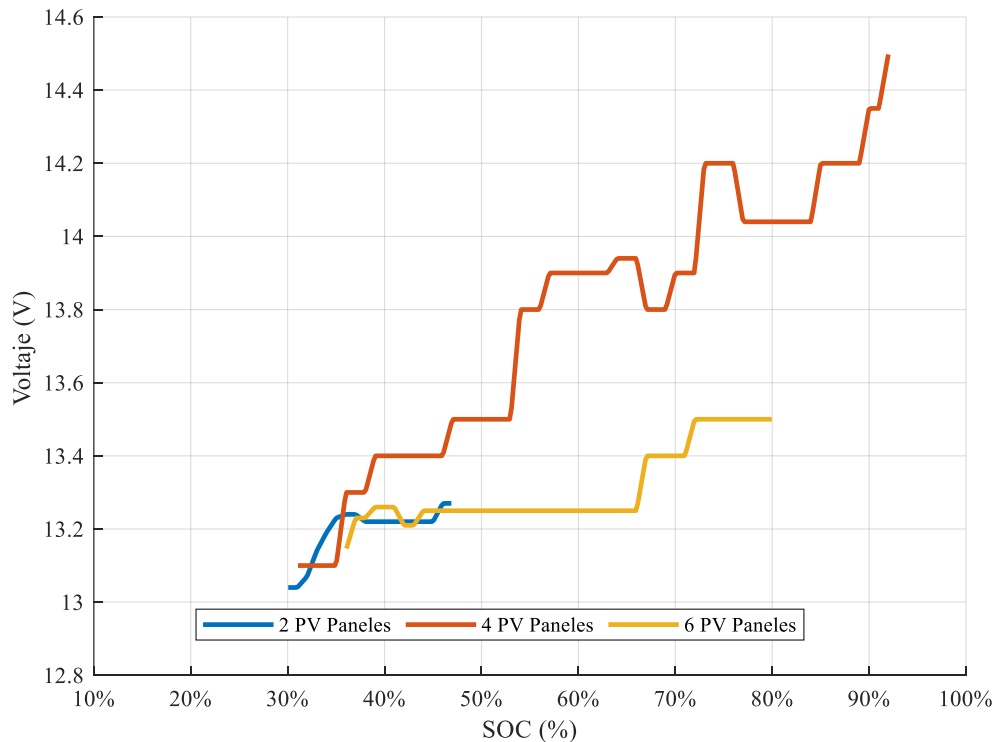


Figura 27. Estado de carga (SOC) vs. voltaje de la batería de iones de litio

Además, se observa que el escenario con dos paneles el voltaje se mantiene relativamente bajo y estable, lo que indica una carga lenta; con cuatro paneles, se alcanza un voltaje superior de hasta 14.5 V, evidenciando una carga rápida y eficiente. Por otro lado, con seis paneles, a pesar de tener mayor capacidad de instalación, el sistema limita el voltaje a niveles bajos entre 13 y 13.5 V, o que podría deberse al regulador para evitar sobrecargas o a la disponibilidad solar. Cabe destacar que el día de pruebas con cuatro paneles se obtuvo una energía equivalente de 15,350 W/m², en comparación del día de prueba con seis paneles, donde la energía fue de 8,582 W/m². Esto representa una irradiancia de 44.09% menor con respecto al escenario con cuatro paneles.

En cuanto a la batería de plomo-ácido gel, la Figura 28 muestra la relación entre el estado de carga (SOC) y voltaje bajo las tres configuraciones del sistema fotovoltaico. En el caso de la conexión de dos paneles, se alcanzó un valor de 58%; con cuatro paneles, el SOC fue de 62% y con seis paneles fue un SOC del 66%. Estos resultados reflejan una limitación operativa significativa, la combinación entre una baja irradiancia solar y un número reducido de paneles impide que la batería de plomo-ácido gel alcance su máxima capacidad de carga. Incluso al incrementar la cantidad de módulos fotovoltaicos, como en el caso de seis paneles, el SOC sigue siendo moderado, evidenciando que la eficiencia de carga en esta tecnología es más susceptible a la variabilidad del recurso solar.

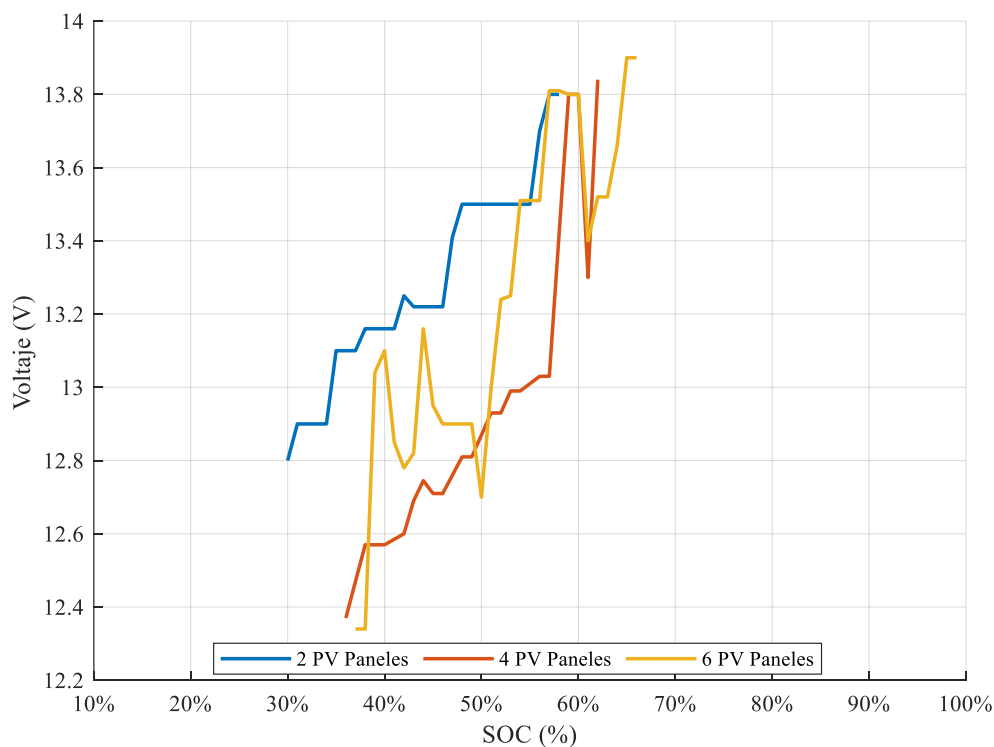


Figura 28. Estado de carga (SOC) vs. voltaje de la batería de plomo-ácido gel

Asimismo, se puede observar como la batería se encuentra con un SOC entre 30% y 40%, el voltaje ronda de 12.4 V a 12.8V al iniciar el proceso de carga. Con dos paneles, el voltaje empieza en 12.7 V y aumenta progresivamente hasta alcanzar 13.8V, lo que indica que la carga fue estable. En el caso de cuatro paneles, el voltaje inicial es de 12.37V y asciende rápidamente a 13.84 V, pero con más fluctuaciones. Lo que significa que la batería recibió más energía, por la mayor cantidad de radiación solar, pero con variaciones bruscas de voltaje lo que puede generar desgaste a largo plazo. Con seis paneles el voltaje inicial fue de 12.34 V, se incrementa gradualmente hasta alcanzar los 14 V mostrando una tendencia con picos y caídas. Esto sucede por un día de radiación favorable combinado con cambios climáticos, lo que permitió una carga rápida, sin embargo, tanto la batería como el controlador limitan el sobrevoltaje ya que se recomienda en baterías de plomo-ácido exceder los 14.4 V para evitar la degradación del sistema. Cabe destacar que el día de pruebas con cuatro paneles se obtuvo una energía equivalente de 5,151 W/m², en comparación del día de prueba con seis paneles, donde la energía fue de 7,440 W/m². Esto representa una irradiancia de 44.43% mayor con respecto al escenario con cuatro paneles.

Tanto la batería ion-litio como la de plomo-ácido gel se ven afectadas por la intensidad de la radiación solar, ya que es una de los factores determinantes para el proceso de carga. Sin embargo, el desempeño de cada batería depende en gran medida de la tecnología empleada. Así

como se observó, la batería de plomo-ácido gel presentó una carga más lenta, incluso ante una mayor disponibilidad de irradiación, lo que evidencia las limitaciones de capacidad de absorción y carga. Además, en el escenario con seis paneles (cuatro de 50 W y dos de 60 W), la batería de litio cargó menos debido a una baja irradiación, mientras que, en el escenario de cuatro paneles, con mayor irradiación, la batería de litio logró un mejor desempeño. Esto demuestra que, no solo la potencia instalada influye en el proceso de carga, sino también la radiación disponible y las características técnicas de cada batería.

5.3 Selección de la capacidad de la batería

En la Tabla 21, se presenta la energía requerida para la carga de las baterías.

Tabla 21. Energía disponible para completar la carga de la batería

Batería	Energía requerida (Wh)	Energía disponible (Wh/día)	¿Carga completa en un día?
50 Ah	690 Wh	1280 Wh	Sí
100 Ah	1380 Wh	1280 Wh	No

Tras el análisis realizado, se determinó que la batería de 50 Ah (12 V) es la opción más adecuada para el sistema, ya que su energía de carga requerida es de 690 Wh considerando pérdidas y un factor de pérdidas adicional del 15 %. Los paneles solares generan una energía diaria aproximada de 1280 Wh/día, lo cual permite no solo cargar completamente la batería de 50 Ah en un solo día, sino también contar con un margen de energía sobrante para compensar pérdidas adicionales por variaciones en la radiación solar, temperatura o eficiencia del sistema.

Por el contrario, la batería de 100 Ah (12 V) requiere alrededor de 1380 Wh para alcanzar una carga completa, lo que supera la energía que los paneles pueden entregar en un día. Esto implica que, incluso en condiciones ideales, la batería de 100 Ah no podría cargarse totalmente en una sola jornada, provocando un déficit energético que, acumulado con el tiempo, podría disminuir el rendimiento del sistema y reducir la vida útil de la batería por cargas incompletas.

5.4 Evaluación de descarga

5.4.1 Descarga de las baterías con cargas variables

Para la descarga de las baterías se consideraron los siguientes componentes detallados en la Tabla 14. A partir de estos, se simularon tres escenarios de uso común, cada uno con distintos perfiles de consumo: un perfil de 24 horas (Tabla 15), un perfil de 12 horas (Tabla 16) y un perfil de 10 horas (Tabla 17). Estos perfiles se emplearon a ambas tecnologías de

almacenamiento: batería de plomo-acido gel y batería de ion-litio, con el fin de evaluar el comportamiento de profundidad de descarga (DOD) frente a diferentes tipos de demandas: cargas variables y cargas constantes. Este análisis permite identificar la capacidad de entrega de las baterías de cada tecnología bajo condiciones reales de operación en sistemas aislados, considerando distribuciones horarias de demanda.

En la Figura 29 muestra el comportamiento del SOC de la batería de ion-litio en función del tiempo bajo tres escenarios de descarga, cada uno con diferentes potencias y duraciones. El escenario de mayor demanda es de 1.134 kW durante 12 horas, la batería de ion-litio presentó una descarga más profunda, alcanzando un SOC final al 22.10%. Este resultado refleja el esfuerzo energético exigido ante cargas elevadas en un tiempo reducido. En el segundo escenario de 0.184 kW durante 10 horas, la descarga fue más moderada, con una disminución del SOC hasta el 30.48%. Finalmente, en el tercer escenario de menor intensidad, pero mayor duración (0.594 kW durante 24 horas), la batería mostró una descarga estable y progresiva, alcanzando un SOC final del 18.37%. A pesar de su mayor duración, este perfil implicó una demanda promedio menor, lo que se tradujo en un menor esfuerzo energético para el sistema de almacenamiento.

Estos resultados evidencian que la profundidad de descarga de la batería ion-litio está estrechamente relacionada con la potencia demandada que, por el tiempo de suministro, lo que resulta fundamental al momento de dimensionar el sistema según las necesidades reales de carga. Cuando la demanda de potencia es alta, como en el escenario de 12 horas, la descarga es más rápido y refleja una caída más pronunciada del SOC. Por otro lado, el escenario de 24 horas representa la condición de menor estrés, debido a que requiere menos esfuerzo y mantiene una descarga sostenida y gradual.

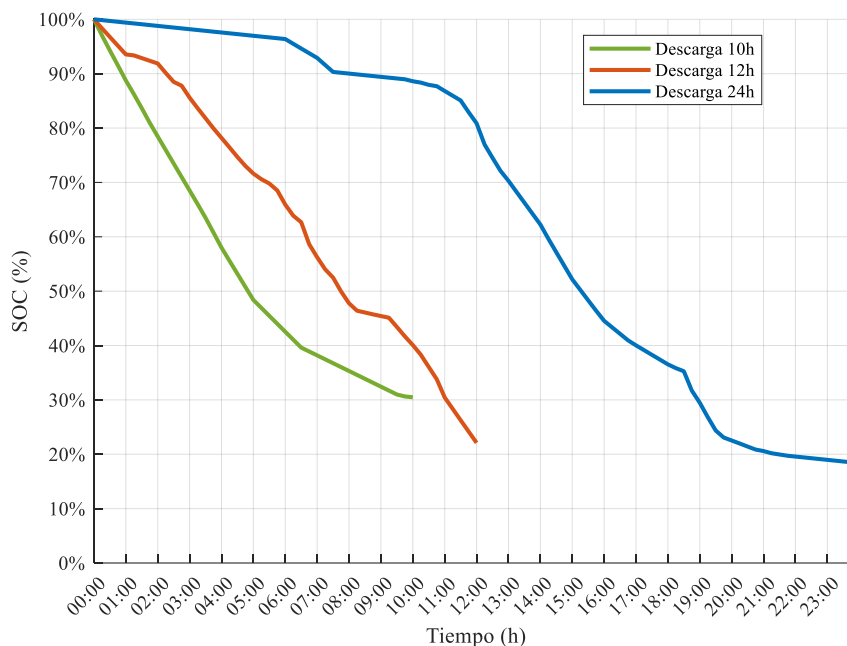


Figura 29. Estado de descarga (DOD) en función del tiempo en horas de la batería de ion-litio

De igual manera, en la Figura 30 se analiza el comportamiento del estado de carga en los diferentes niveles de consumo de la batería de plomo-ácido. Se puede observar que la descarga es más pronunciada en las primeras horas en los escenarios de 10 y 12 horas, lo que indica una mayor exigencia y una respuesta irregular ante cargas elevadas. Esto representa como la batería opera bajo estrés con una descarga rápida y con fluctuaciones.

En el escenario de 24 horas, el SOC se mantiene estable durante las primeras seis horas, con una ligera caída progresiva. A partir de 8 horas consecutivas existen caídas más notorias y cuando está en 11 horas la pendiente se pronuncia considerablemente. Esto refleja el aumento de la demanda durante esas horas, ocasionando una descarga rápida. Sin embargo, después de esa exigencia, la curva desciende gradualmente y alcanzó un valor del 28.1%.

En el escenario de 12 horas, la batería inicia con una descarga leve, pero la pendiente se vuelve cada vez más inclinada conforme avanza el tiempo, evidenciando un consumo de energía creciente que fuerza a la batería a responder con mayor intensidad. En este caso, el SOC final fue del 38.81%. Finalmente, el escenario de 10 horas mostró la mayor pendiente de descarga desde el inicio, lo que indica que la batería enfrentó una carga intensa que no pudo sostener eficientemente, alcanzando un SOC final del 39.8%.

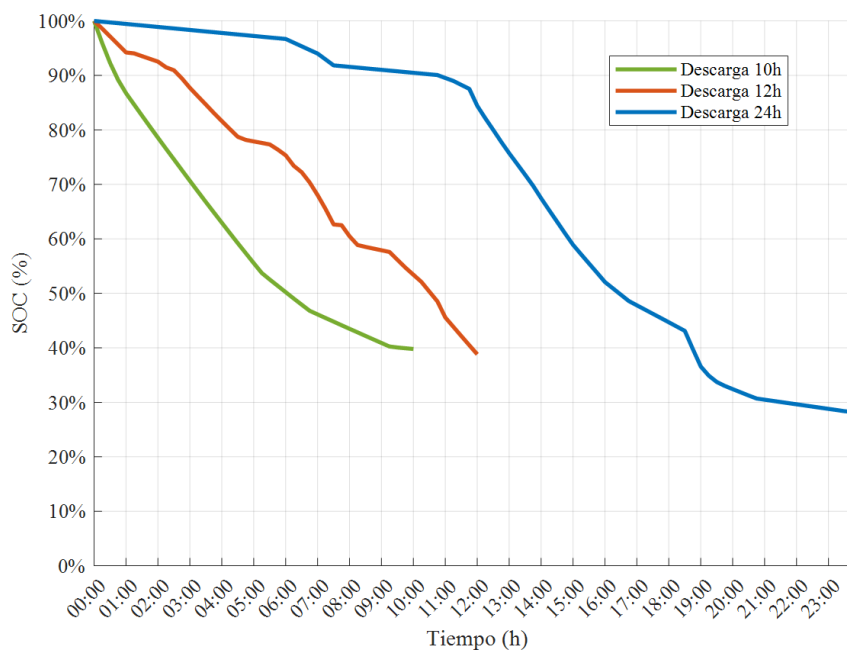


Figura 30. Estado de descarga (DOD) en función del tiempo en horas de la batería de plomo-ácido gel

Finalmente, las baterías de ion-litio y plomo-ácido gel presentan diferentes comportamientos dependiendo las características de cada tecnología pese a tener las mismas condiciones de prueba. La batería de ion-litio en todos los casos presentó una mayor profundidad (DOD) lo que indica que entrega más energía antes de llegar al su límite operativo, proporcionando un suministro constante. Por otro lado, la batería plomo-ácido se limita frente a elevadas corrientes que pueden llegar dañar su composición.

Dentro del mismo análisis de descarga bajo las condiciones de demanda real, se evalúa el comportamiento de la corriente en función del tiempo. En la Figura 31 se presenta perfiles de corriente en función del tiempo para la batería de ion-litio. En el escenario de 24 horas, se observa un perfil de corriente más uniforme y estable. Durante el proceso de descarga, la corriente se mantiene en corrientes menores a 0.5 A con algunos picos por encima de 1 A y un pico repentino de 7.108 A en media hora. La distribución de corriente durante las 24 horas representa una descarga menos agresiva y progresiva hacia el interno de la batería.

En el escenario de 12 horas, la corriente de descarga muestra un comportamiento más irregular. Durante las primeras horas, los valores están entre 3 y 4 horas, pero se observan picos significativos que alcanza entre 6 y 8 A en cortos intervalos. Estos picos de corrientes evidencian una demanda exigente del sistema, por la activación intermitente de cargas, lo cual somete a una mayor capacidad de respuesta de la batería.

Por último, en el escenario de 10 horas, la batería enfrenta una demanda intensa desde el inicio. Se registran corrientes elevadas entre 4.9 y 5.9 A, durante las primeras 5 horas. Seguidas de una disminución progresiva hasta alcanzar valores mínimos de 0.3 A. Este perfil de descarga representa un esfuerzo para la batería, con una alta tasa de energía en poco tiempo, lo cual incrementa la profundidad de descarga (DOD).

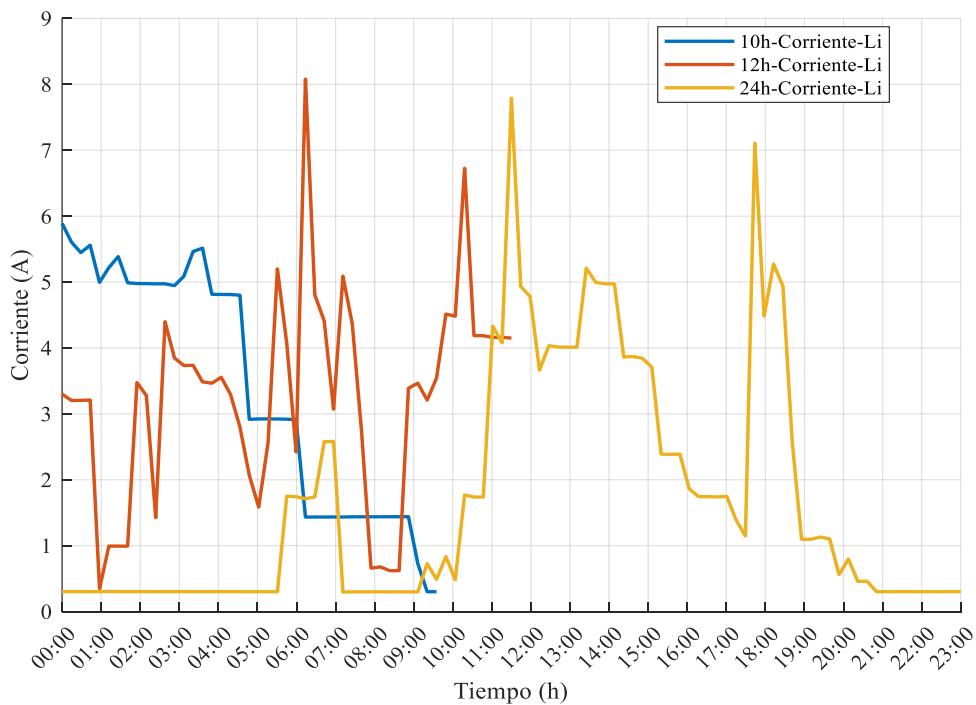


Figura 31. Corrientes de descarga en función del tiempo de la batería de ion-litio

En la Figura 32, se muestra el comportamiento de la corriente en función del tiempo durante la descarga de la batería de plomo-ácido bajo tres escenarios distintos.

En el escenario de 24 horas, se observa una corriente inicial baja, cercada a 0.2753A durante las primeras 6 horas, lo cual representa un estado de descarga sostenido. Sin embargo, se presentan varios picos de corriente entre 4 A y 6 A en ciertos intervalos. Estos incrementos indican momentos de mayor exigencia por parte de las cargas conectadas. A pesar de estos picos, la mayor parte del tiempo la corriente permanece en niveles moderados, lo que ayuda un menor estrés sobre la batería.

En el escenario de 12 horas, la corriente presenta mayores oscilaciones, variando entre 0.6 y 6 A. Estas fluctuaciones se deben a las cargas variables del consumo. Aunque se registran picos considerables, la corriente se mantiene dentro un rango manejable que evita una descarga agresiva.

En el escenario de 10 horas, la batería experimenta una corriente inicial elevada de 8.065 A, indicando alta demanda. A medida que transcurren las horas, la corriente disminuye gradualmente, pero se mantiene en valores elevados durante gran parte del ciclo. Lo que resalta, que la batería se compromete a niveles de corrientes que aceleran procesos de degradación interna afectando la vida útil del sistema.

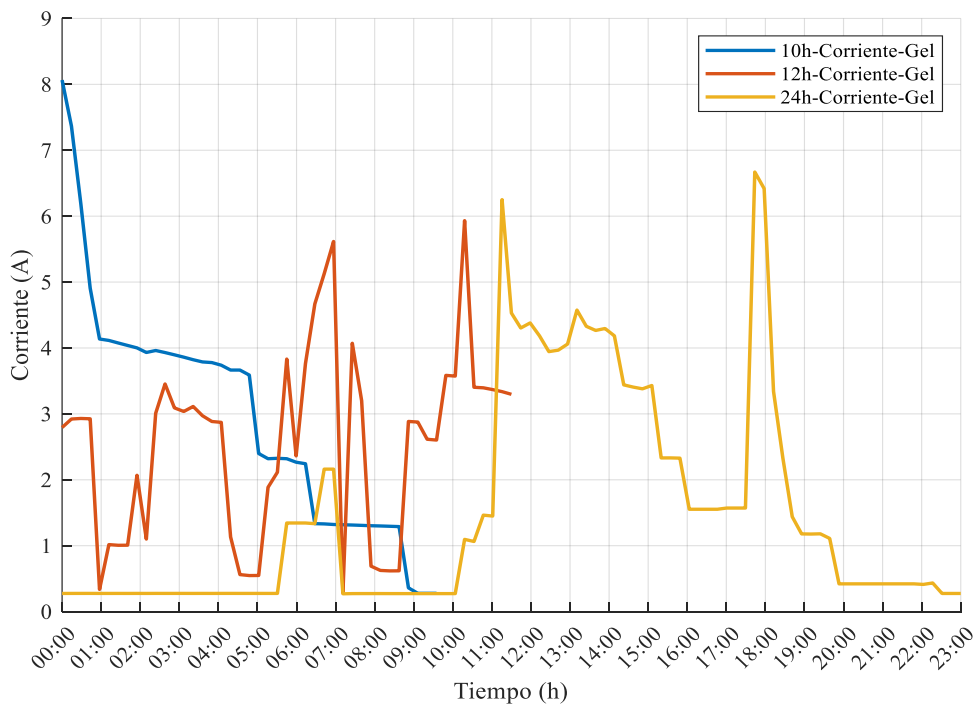


Figura 32. Corrientes de descarga en función del tiempo de la batería de plomo-ácido gel

Como resultado de las pruebas realizadas se concluye que la batería de ion-litio presenta una mayor estabilidad durante la descarga, manteniendo valores constantes a lo largo del tiempo. En comparación, la batería de plomo-ácido, aunque es funcional en condiciones de baja demanda, evidencia una mayor oscilación en la corriente, especialmente en cargas dinámicas. Ambos sistemas muestran picos de corriente en ciertos intervalos, sin embargo, la tecnología de ion-litio demuestra una mejor tolerancia ante las exigencias, sin registrar caídas abruptas cuando se producen cambios en la carga conectada. Lo que significa una eficiencia para sostener descargas profundas sin comprometer la estabilidad de suministro.

Por el contrario, la batería de plomo-ácido muestra desempeño óptimo en escenario de descarga lenta y regular. No obstante, en situaciones de descargas aceleradas, como en los escenarios de 10 y 12 horas, presenta una mayor sensibilidad, lo que necesita mayor esfuerzo interno, incremento de pérdidas térmicas y potencial reduciendo la vida útil.

Para complementar este análisis comparativo bajo las condiciones simuladas de uso real, a continuación, se presenta el comportamiento del voltaje en los escenarios de 10 y 12 horas, donde ambas tecnologías operaron bajo mayor exigencia energética

En la Figura 33. se muestra el comportamiento del voltaje de la batería de ion-litio en función del tiempo durante los escenarios de descarga. En el escenario de 12 horas, el voltaje inicia con un voltaje de 13.5V y desciende de manera progresiva hasta 13.2 V, evidenciando una caída rápida pero controlada. Posteriormente, el voltaje se estabiliza dentro de un rango de 13.2 V y 13.13 V. Alrededor de la sexta hora, se observa una leve recuperación, alcanzando nuevamente los 13.18 V, posiblemente debido a una disminución temporal de la demanda. A partir de la novena hora, el voltaje desciende nuevamente de forma más notoria, pasando de 13.14 V a 13.02 V. No obstante, estos valores de voltaje se mantienen dentro de un rango seguro y estable.

En el escenario de 10 horas igualmente con un voltaje inicial de 13.5 V, cae irregularmente dentro de las primeras dos horas llegando a 12.98V. Esta disminución indica una mayor exigencia de corriente, lo que provocó una caída pronunciada en la tensión. Durante las siguientes tres horas, el voltaje se mantiene relativamente estable, mostrando estabilidad bajo una demanda menor. Sin embargo, a diferencia del escenario de 12 horas el voltaje permanece por debajo de los 13V A, indicando un mayor esfuerzo para sostener la carga. Finalmente, el voltaje disminuye ligeramente hasta los 12.5V, aunque se encuentra dentro de los límites aceptables, representa una condición menos favorable para una recuperación del sistema si la descarga continúa.

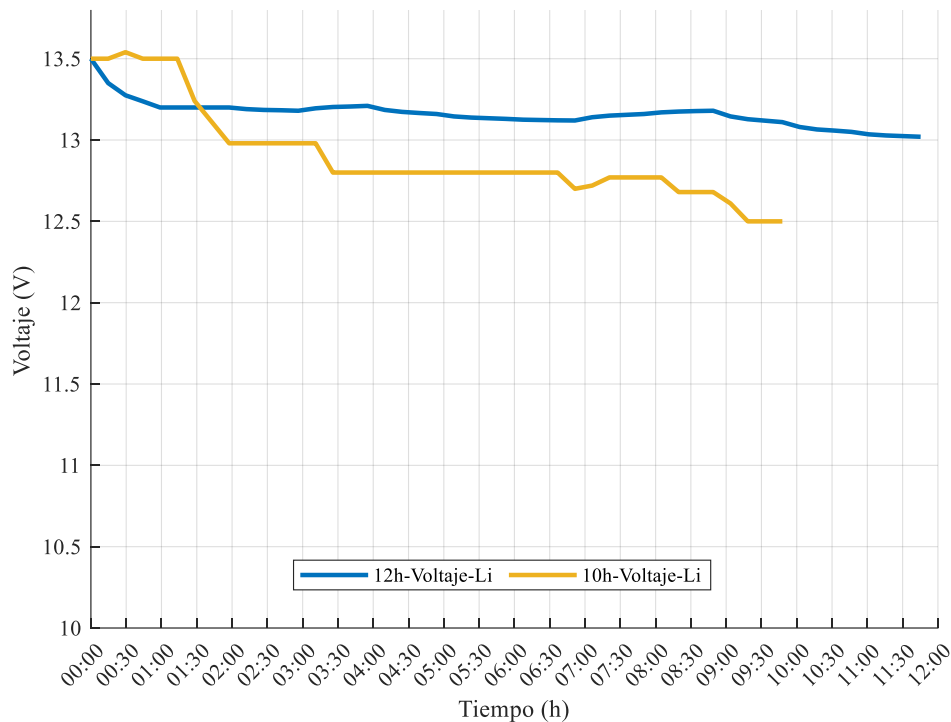


Figura 33. Voltaje en función del tiempo en horas de descarga de la batería de ion-litio

La Figura 34, representa el voltaje en función del tiempo para la batería de plomo-ácido gel, se analizan dos escenarios: descarga en 12 horas y en 10 horas. En el escenario de 12 horas, el voltaje inicial es de 12.785 V y desciende de forma gradual durante las primeras seis horas, presentando ligeras oscilaciones. Posteriormente, mantiene una tendencia descendente hasta alcanzar el valor final de 12.26 V, presentando una estabilidad.

En el escenario de 10 horas, el voltaje inicial es de 12.8 V y se mantiene constante durante los primeros 90 min, presentando una carga ligera. Luego, el voltaje disminuye rápidamente hasta 12.98 V y se mantiene por un tiempo. Posteriormente, se produce una caída más pronunciada de 11.8V, evidenciando un mayor esfuerzo de la batería y mayor inestabilidad.

Los resultados obtenidos del análisis de voltaje muestran que la batería de ion-litio mantiene una tensión estable a lo largo del tiempo, incluso al suministrar cargas variables, presentando leves recuperaciones en ciertos intervalos. En contraste, la batería plomo-ácido gel comienza a degradarse más temprano en el tiempo con oscilaciones y caídas irregulares, sobre todo en el caso de 10 horas. Esto evidencia que, en condiciones más exigentes, tanto el voltaje como la corriente presentan mayores dificultades para las baterías. A medida que la corriente aumenta, el voltaje en la batería de ion-litio disminuye de forma progresiva y estable, manteniéndose en niveles seguros. En cambio, la batería de plomo-ácido gel presenta una caída de voltaje más

abrupta conforme la corriente se incrementa, alcanzando valores cercanos a 11.8 V. Este comportamiento afecta a la resistencia interna y una menor eficiencia en cargas elevadas.

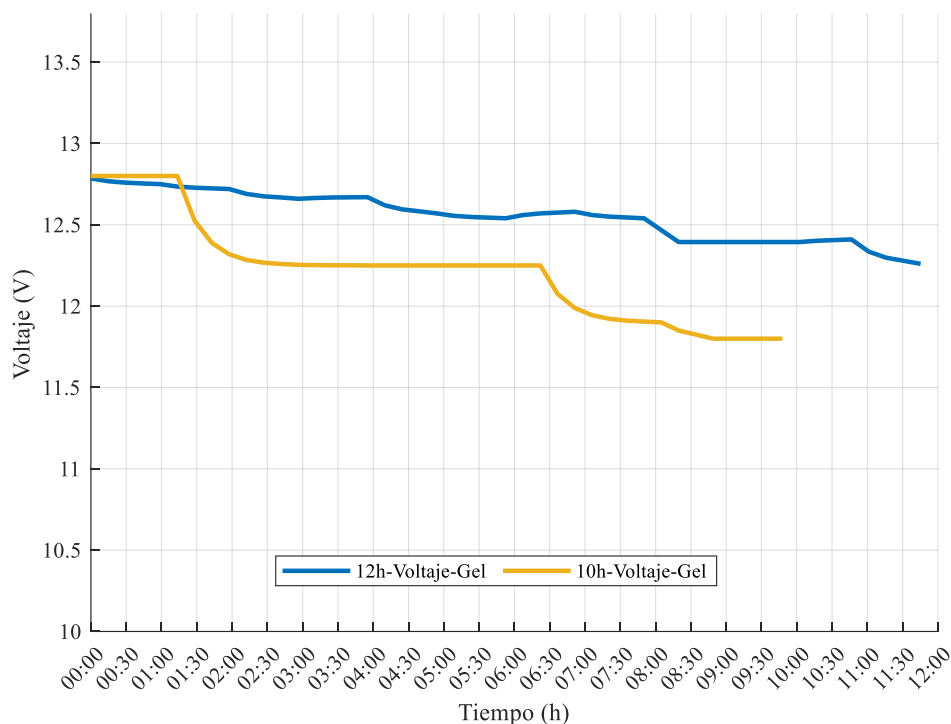


Figura 34. Voltaje en función del tiempo en horas de descarga de la batería de plomo-ácido gel

5.3.2 Descarga C-rate

Para el análisis de descarga, se consideraron diferentes tasas de corriente constante (C-rate) para ambas tecnologías de baterías: ion-litio y plomo-ácido gel, como se detalla en la Tabla 18. Para cada tasa aplicada (0.05 C, 0.1 C, 0.15 C y 0.2 C), se calculó la duración teórica de descarga, partiendo de una capacidad nominal de 50 Ah.

La Figura 35 muestra la evolución del voltaje de la batería de ion-litio bajo estas cuatro condiciones. A una tasa de 0.05 C (2.5 A), la descarga es altamente estable: el voltaje se mantiene por encima de 12.72 V durante más de 19 horas, con mínima oscilación. La pendiente de caída solo se vuelve pronunciada al final del ciclo, justo antes de alcanzar el límite de descarga, un comportamiento típico de las celdas LiFePO₄ al acercarse a su voltaje de corte.

En el caso de 0.1 C (5 A), el voltaje inicial es ligeramente inferior al de 0.05 C debido a la resistencia interna. Sin embargo, la curva de descarga se mantiene relativamente plana durante unas 10 horas, con una caída gradual que se acentúa a partir de la hora 11, acercándose al voltaje de corte cerca de las 12 horas. Aunque la estabilidad disminuye frente a 0.05 C, sigue siendo una descarga eficiente.

Con una descarga de 0.15 C (7.5 A), se observa una caída de voltaje más rápida desde las primeras horas. Alrededor de las 6 horas ya se aproxima a los 12.6 V, lo cual evidencia una menor capacidad utilizable y mayor estrés para la batería.

En el caso de 0.2 C (10 A), la respuesta es aún más exigente: el voltaje cae por debajo de 13 V en los primeros 90 minutos y continúa disminuyendo hasta alcanzar los 12.6 V hacia la quinta hora. Esto limita considerablemente el tiempo de operación útil y refleja un esfuerzo interno significativo.

Las curvas de descarga demuestran que la batería tiene un rendimiento óptimo con cargas bajas (0.05 C), manteniendo un voltaje considerable durante más de 10 horas, lo que indica alta eficiencia. Bajo tasas más exigentes (0.2 C), el voltaje cae más rápidamente, implicando un mayor desgaste, mayor generación de calor y menor eficiencia. Las tasas intermedias (0.1 C y 0.15 C) representan un punto de equilibrio.

En todos los casos, el voltaje se mantuvo dentro de un rango operativo seguro (entre 13.2 V y 12.6 V) durante la mayor parte del proceso. Estas observaciones reflejan las características sobresalientes de la batería de ion-litio: admite corrientes continuas elevadas (hasta 50 A), posee baja resistencia interna y una vida útil estimada de hasta 6000 ciclos al 80 % de profundidad de descarga (DoD).

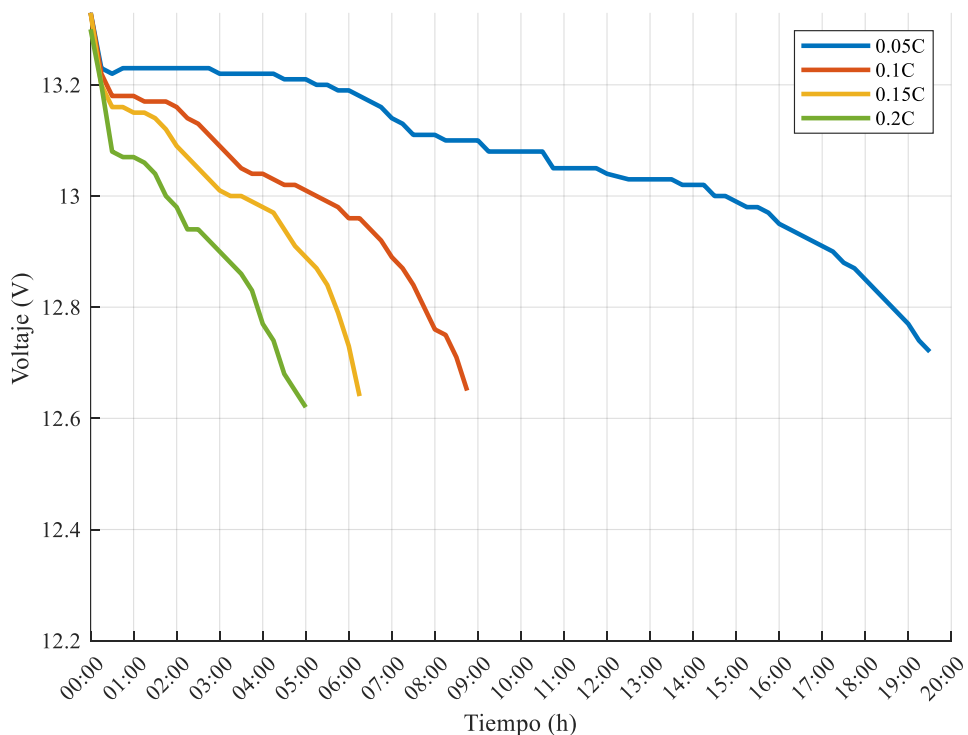


Figura 35. Rendimiento de descarga de baterías de iones de litio a diferentes tasas C

La Figura 36 muestra el comportamiento de la batería de plomo-ácido gel bajo condiciones de descarga a distintas tasas de corriente constante (C-rate), tal como fueron establecidas en los ensayos experimentales. En ningún escenario la batería alcanzó la duración teórica esperada en función de su capacidad nominal de 50 Ah.

En la descarga más exigente de 10 A, el voltaje cayó por debajo de 12 V en apenas 2 horas, lo que evidencia un esfuerzo excesivo de la batería frente a demandas elevadas de corriente. A una tasa de 0.15 C, el voltaje se mantuvo más estable, pero también descendió por debajo del umbral antes de las 5 horas. En el caso de 0.1 C (5 A), mostro una caída progresiva de 13.27 V a 11.05 en 8 horas sin alcanzar las 10 horas teóricas. El comportamiento más significativo se observó a 0.05 C (2.5 A), aunque se esperaba una autonomía de 20 horas, la batería descendió por debajo de 11 V tras solo 9.5 horas, es decir, menos del 50 % del tiempo proyectado.

A diferencia del comportamiento en la batería ion-lito, la batería de plomo-ácido presentó una caída de voltaje más abrupta ante tasas elevadas de descarga y una menor duración, como en el caso de 0.2C, donde la tensión disminuyó rápidamente. En cambio, con tasas más bajas como 0.05C, la caída de voltaje fue más lenta, aunque más pronunciada hacia el final del ciclo, indicando una menor capacidad para sostener tensiones estables en descargas prolongadas. Este comportamiento se encuentra limitado por las propias características de diseño de la batería VRLA, que incluye una corriente máxima de descarga de 15 A y una vida útil de alrededor de 200 ciclos cuando se somete a descargas del 100% del DOD. Estas restricciones tecnológicas hacen que la VRLA sea menos eficiente y menos resistente frente a descargas profundas o tasas de corriente elevadas, lo que condiciona su rendimiento en aplicaciones que exigen flexibilidad operativa o ciclos de uso frecuentes.

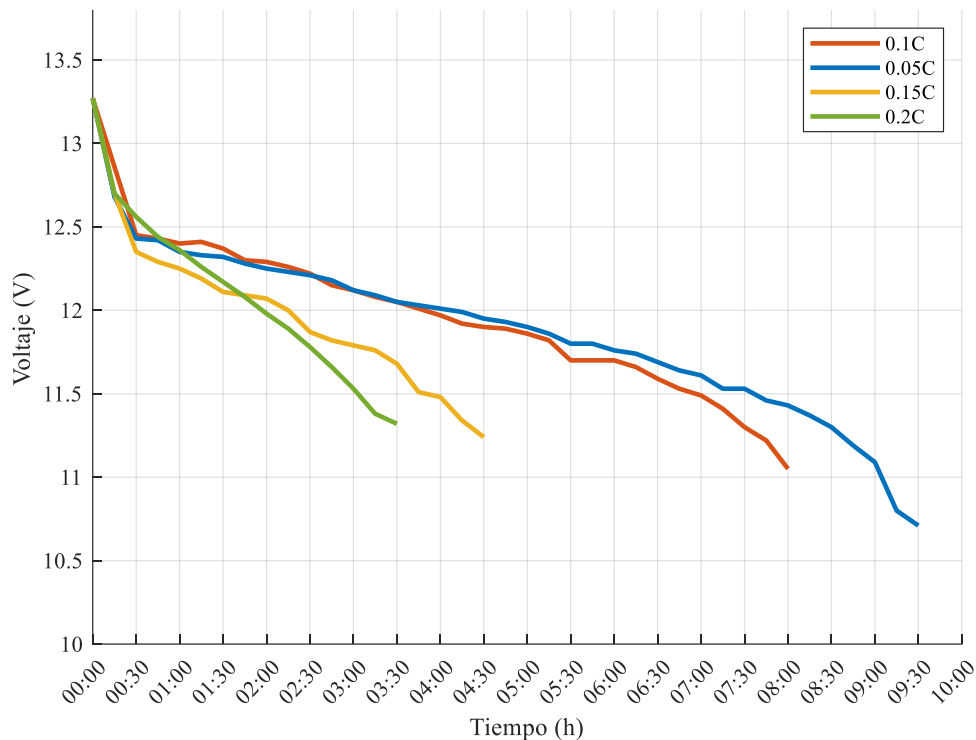


Figura 36. Rendimiento de descarga de la batería de plomo-ácido bajo diferentes índices C

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Esta investigación presenta la determinación del estado de carga (SOC) de dos tecnologías de baterías: ion-litio (Li-ion) y plomo-ácido gel (VRLA), utilizadas en sistemas solares fotovoltaicos aislados, bajo las mismas condiciones de uso. El estudio se basa en datos experimentales obtenidos de pruebas prácticas, donde se observa que la corriente suministrada a las baterías es directamente proporcional a la irradiancia solar disponible, influyendo de manera determinante en la eficiencia del proceso de carga. Además, se evidencia que la dinámica del proceso de carga varía según cada tecnología. En el caso de la batería de ion-litio, se registra una carga más rápida y eficiente, mientras que la batería de plomo-ácido gel, a pesar de presentarse días con buena irradiancia, el proceso de carga es más lento. Esto se debe a su configuración de carga en tres etapas: bulk, absorción y flotación, lo que prolonga el tiempo para alcanzar un SOC elevado. Cabe destacar que, al utilizar seis paneles con irradiancia reducida, se logró superar el 50 % de carga en ambos tipos de baterías. De igual forma, con cuatro paneles y niveles medios de irradiancia, se alcanzó una carga óptima, lo cual sugiere que, para una batería de 50 Ah, el uso de cuatro paneles de 50 W es suficiente siempre que se cuente con buena radiación solar en la zona de estudio. Estos resultados evidencian que la batería de ion-

litio alcanza eficiencias de carga entre el 80 % y 90 %, mientras que la batería de plomo-ácido gel presenta eficiencias menores, entre el 50 % y 60 %, reflejando diferencias significativas en su rendimiento en condiciones similares.

- Durante las pruebas de descarga se aplicaron tres perfiles de demanda eléctrica: 1.134 kW durante 12 horas, 0.184 kW durante 10 horas y 0.594 kW durante 24 horas. Al analizar el comportamiento de las baterías ante estas distintas cargas, se observó una mayor eficiencia en la batería de ion-litio, la cual alcanzó una descarga un 10 % más profunda en comparación con la batería de plomo-ácido gel, registrando un SOC mínimo del 20 %, frente al 30 % observado en la VRLA. Además, la batería de ion-litio mostró una mejor capacidad para regular la corriente ante variaciones en la demanda. Al someter ambas tecnologías a diferentes tasas de descarga (C-rates de 0.05C, 0.1C, 0.15C y 0.2C), el desempeño superior de la batería LFP fue evidente. Esta logró una profundidad de descarga de hasta el 90 % sin comprometer la estabilidad del sistema. En cambio, la batería VRLA solo alcanzó entre un 60 % y 70 % de descarga útil, presentando una caída de voltaje más rápida y pronunciada, lo que redujo significativamente su tiempo de operación efectiva.
- En base a los resultados obtenidos, se concluye que, aunque ambas tecnologías son aptas para sistemas fotovoltaicos aislados, la batería de LFP ofrece un mejor desempeño general. Esta tecnología es más recomendable para sistemas con demanda variable o no controlada, como en aplicaciones residenciales. Por su parte, la batería VRLA puede ser adecuada en sistemas con una demanda estable o controlada, donde baja eficiencia pueda ser compensada por condiciones operativas predecibles.

6.2 Recomendaciones

- En trabajos futuros se podría evaluar el desempeño de ambas tecnologías en procesos de carga/descarga simultáneos y poder evidenciar su comportamiento.
- La investigación evidenció que el proceso de carga de las baterías en un sistema fotovoltaico está estrechamente vinculado con la cantidad de radiación solar disponible en el lugar de instalación. Por esta razón, se recomienda realizar la carga de las baterías utilizando una fuente de corriente continua controlada. Esto permite evaluar de manera precisa el comportamiento individual de cada batería y determinar cuál presenta las mejores características para su integración óptima.

- Se recomienda realizar un análisis comparativo entre los datos iniciales de la batería cuando era nueva y su comportamiento después de varios ciclos de carga y descarga. Esto permitirá evaluar la degradación progresiva de la capacidad y el rendimiento de la batería a lo largo del tiempo, facilitando un mejor entendimiento de su vida útil y eficiencia en condiciones reales de operación.

7. REFERENCIAS

- [1] D. Azuatalam, K. Paridari, Y. Ma, M. Förstl, A. C. Chapman, and G. Verbič, “Energy management of small-scale PV-battery systems: A systematic review considering practical implementation, computational requirements, quality of input data and battery degradation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 555–570, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.007.
- [2] C. J. Rydh, “Energy Analysis Of Batteries In Photovoltaic Systems,” 2003.
- [3] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed, and A. Ayob, “Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 771–789, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.171.
- [4] A. A. Kebede *et al.*, “Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application,” *J Energy Storage*, vol. 40, p. 102748, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102748.
- [5] R. Dufo-López, T. Cortés-Arcos, J. S. Artal-Sevil, and J. L. Bernal-Agustín, “Comparison of Lead-Acid and Li-Ion Batteries Lifetime Prediction Models in Stand-Alone Photovoltaic Systems,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 1099, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11031099.
- [6] V. Pop, H. J. Bergveld, P. H. L. Notten, and P. P. L. Regtien, “State-of-the-art of battery state-of-charge determination,” Dec. 01, 2005, *Institute of Physics Publishing*. doi: 10.1088/0957-0233/16/12/R01.
- [7] D. L. Jiménez J, J. Toapanta, P. Muñoz, and R. S. Achig, “State-of-Health Assessment of Lithium-Ion Batteries in Two Scenarios: Microgrids and Electric Vehicles,” in *2023 IEEE Seventh Ecuador Technical Chapters Meeting (ECTM)*, IEEE, Oct. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ETCM58927.2023.10309053.

- [8] Q. Lin, J. Wang, R. Xiong, W. Shen, and H. He, “Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries,” *Energy*, vol. 183, pp. 220–234, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.128.
- [9] P. Román and D. Fernando, “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS Y PILAS DE COMBUSTIBLE.”
- [10] K. Rahul, J. Ramprabhakar, and S. Shankar, “Comparative study on modeling and estimation of State of Charge in battery,” in *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*, IEEE, Aug. 2017, pp. 1610–1615. doi: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358637.
- [11] H. Beltran, P. Ayuso, and E. Pérez, “Lifetime Expectancy of Li-Ion Batteries used for Residential Solar Storage,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 3, p. 568, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13030568.
- [12] M. Astaneh, R. Roshandel, R. Dufo-López, and J. L. Bernal-Agustín, “A novel framework for optimization of size and control strategy of lithium-ion battery based off-grid renewable energy systems,” *Energy Convers Manag*, vol. 175, pp. 99–111, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.08.107.
- [13] S. N. Islam, S. Saha, M. E. Haque, and M. A. Mahmud, “Comparative Analysis of Commonly used Batteries for Residential Solar PV Applications,” in *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, IEEE, Dec. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994441.
- [14] R. Dufo-López, T. Cortés-Arcos, J. S. Artal-Sevil, and J. L. Bernal-Agustín, “Comparison of Lead-Acid and Li-Ion Batteries Lifetime Prediction Models in Stand-Alone Photovoltaic Systems,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, p. 1099, Jan. 2021, doi: 10.3390/app11031099.
- [15] R. Morales and C. Muzzio, “METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO E IMPLEMENTACIÓN PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADO A LUGARES AISLADOS EN EL GOLFO DE GUYAQUIL.”
- [16] O. Cobos and E. Gomez, “PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO UNA ALTERNATIVA DE SOSTENIBILIDAD

ENERGÉTICA PARA EL CENTRO DE DESARROLLO CORPORACIÓN MINUTO DE DIOS, MUNICIPIO DE CÚCUTA-NORTE DE SANTANDER,” 2018.

- [17] L. Arciniegas, “DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE CARGA MPPT PARA SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS DESCONECTADOS DE LA RED ELÉCTRICA.”
- [18] C. L. Cortés Cortés, G. S. Gómez Gómez, F. Betancur Londoño, S. X. Carvajal Quintero, and N. Guerrero González, “Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: caso de estudio Manizales,” *TecnoLógicas*, vol. 23, no. 47, pp. 1–21, Jan. 2020, doi: 10.22430/22565337.1403.
- [19] V. De la Cruz, “SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO PARA MAYOR DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SENATI,” 2020.
- [20] A. Singh, K. Pal, and C. B. Vishwakarma, “State of charge estimation techniques of Li-ion battery of electric vehicles,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 6, p. 100328, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100328.
- [21] W.-Y. Chang, “The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review,” *ISRN Applied Mathematics*, vol. 2013, pp. 1–7, Jul. 2013, doi: 10.1155/2013/953792.
- [22] L. Gamba, “Estimación y análisis del estado de salud de las baterías de un Nissan Leaf a partir de datos reales de conducción,” 2023.
- [23] A. Contreras, “ESTIMACION DE LOS ESTADOS DE CARGA Y SALUD DE UNA BATERIA DE ION-LITIO,” 2018.
- [24] D. López Sánchez, “Tecnologías de Baterías,” 2019.
- [25] C. Luna and Valdez Angelo, “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO PARA EL ABASTO PARCIAL DE ENERGÍA EN UNA VIVIENDA DE LA ZONA RURAL DE LA PROVINCIA DE COTOPAXI,” 2024.
- [26] M. Yekini Suberu, M. Wazir Mustafa, and N. Bashir, “Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 499–514, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.04.009.
- [27] A. Rodríguez, M. Ortiz, and J. Thomas, “Baterías de ion litio: presente y futuro.”

- [28] J. Molina, “Implementación de un sistema fotovoltaico Off Grid para abastecer de energía eléctrica a una vivienda, ubicada en un sector rural del cantón Isidro Ayora en la provincia del Guayas.”
- [29] G. Gonzáles, J. Zambrano, and E. Estrada, “ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR EN LA COMUNA PRUETO ROMA DE LA ISLA MONGRADON DEL GOLFO DE GUAYAQUIL, PROVINCIA DE GUAYAS.”
- [30] M. A. Abella, “Sistemas Fotovoltaicos.”
- [31] L. López and B. López, “DISEÑO ELÉCTRICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO ON GRID PARA EL COMPLEJO DE CONCIENTIZACIÓN Y CUIDADO DEL MAR, YUBARTA.”
- [32] J. M. Rodríguez-Gómez, “La radiación solar en extremo ultravioleta: implicaciones en la atmósfera de la Tierra,” *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 46, 2024, doi: 10.1590/1806-9126-rbef-2023-0212.
- [33] E. Villegas and L. Alcivar, “DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA LA ESCUELA DE EDUCACIÓN BÁSICA SIMÓN BOLÍVAR EN LA COMUNIDAD MASA 2, GOLFO DE GUAYAQUIL.”
- [34] D. Farez and E. Chicaiza, “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO.”
- [35] CELEC EP, “ESTUDIO DE POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO DEL ECUADOR.” [Online]. Available: www.celec.gob.ec
- [36] Apogee Instruments, “SOLAR RADIATION METER Models MP-100 and MP-200,” 2022. Accessed: May 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.apogeeinstruments.com/content/MP-100-MP-200-manual.pdf>
- [37] Fluke Corporation, “Manual del usuario,” 2009. [Online]. Available: <http://www.fluke.com>.
- [38] S. C. Konradt and H. Rottengruber, “Determination of the optimal battery capacity of a PEM fuel cell vehicle taking into account recuperation and supercapacitors,” *Automotive and Engine Technology*, vol. 6, no. 3–4, pp. 181–189, Dec. 2021, doi: 10.1007/s41104-021-00086-1.

8. ANEXOS

8.1 ANEXO 1

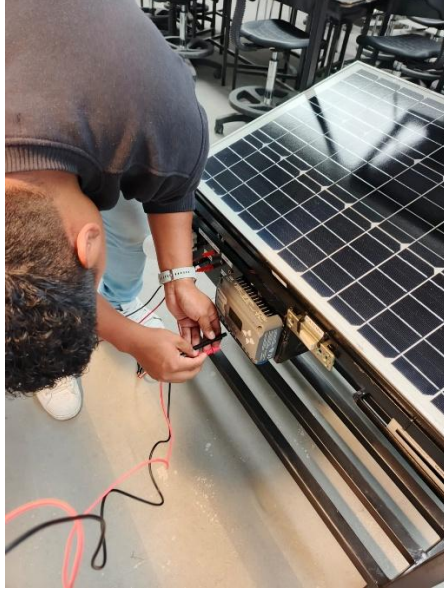


Figura 37. Inspección de la funcionalidad del prototipo repotenciado

8.2 ANEXO 2



Figura 38. Obtención del recurso solar mediante el piranómetro

8.3 ANEXO 3



Figura 39. Evaluación del recurso solar a las 10:00 am

8.4 ANEXO 4



Figura 40. Conexión de la batería de Ion- Litio para la carga

8.5 ANEXO 5



Figura 41. Conexión de la batería de ácido-plomo gel para la carga

8.6 ANEXO 6



Figura 42. Medición del voltaje en los bornes de la batería

8.7 ANEXO 7

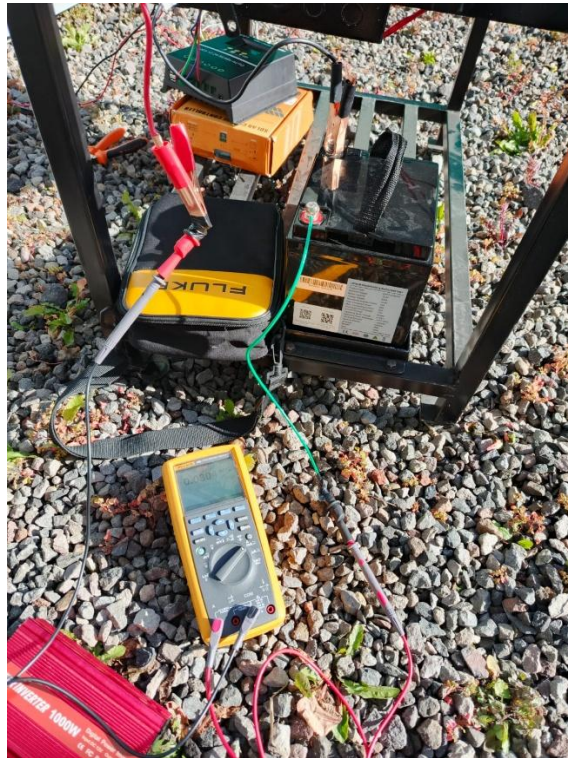


Figura 43. Medición de la corriente que ingresa en la batería

8.8 ANEXO 8



Figura 44. Elaboración de las conexiones para las cargas electrónicas

8.9 ANEXO 9



Figura 45. Evaluación de la funcionalidad para las descargas

8.10 ANEXO 10



Figura 46. Descarga de la batería bajo condiciones de uso

8.11 ANEXO 11



Figura 47. Descarga de la batería (C-rate)

8.12 ANEXO 12

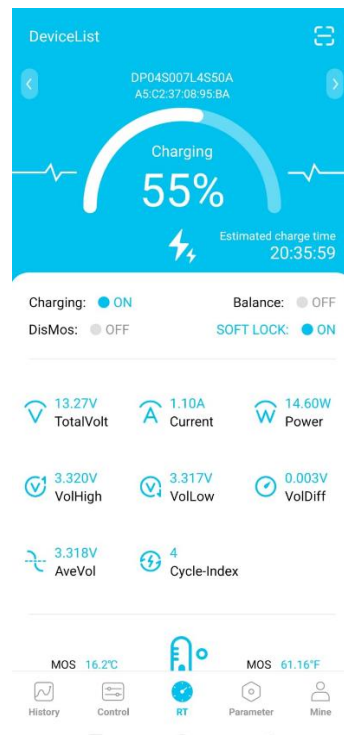


Figura 48. Observación de la carga de la batería Ion-Litio

8.13 ANEXO 13

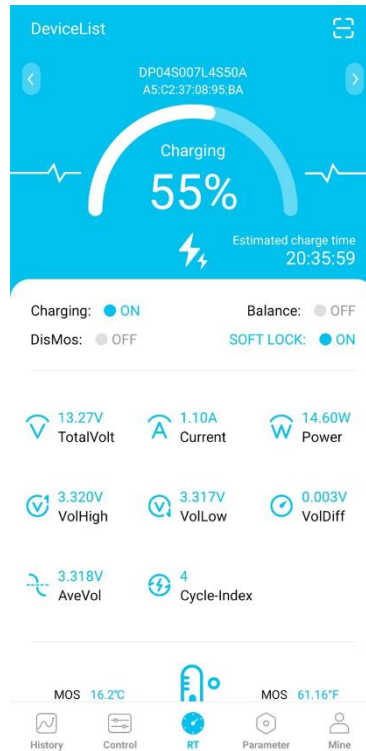


Figura 49. Observación de la descarga de la batería Ion-Litio

8.14 ANEXO 14

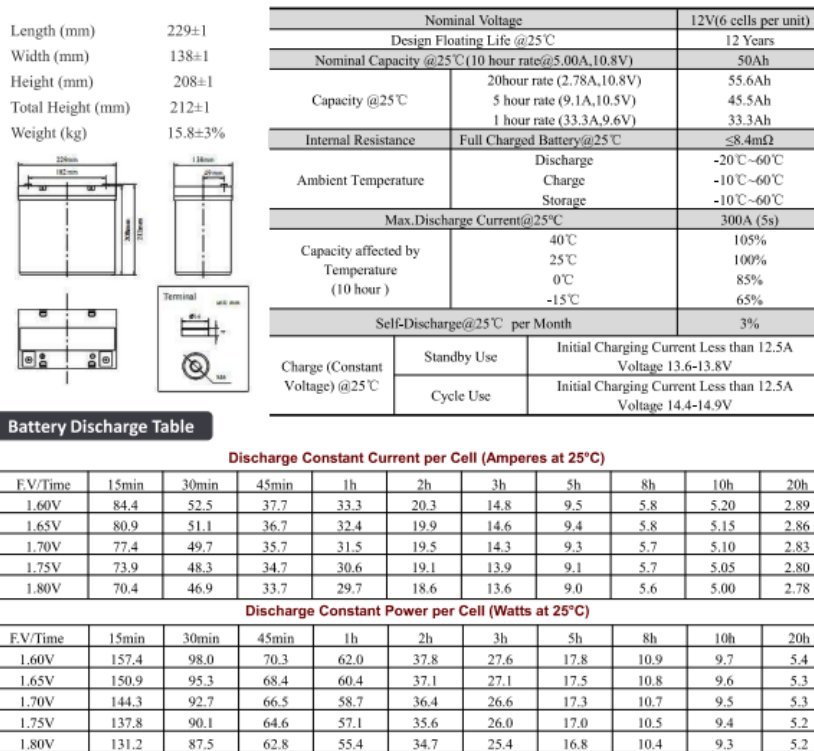


Figura 50. Datasheet de la batería de plomo-ácido gel

8.15 ANEXO 15

Parameters

Model	EM12.8-6LPH	EM12.8-8LPH	EM12.8-50LPH	EM12.8-50LPS	EM12.8-100LPH	EM12.8-100LPS
Nominal Voltage	12.8V	12.8V	12.8V	12.8V	12.8V	12.8V
Nominal Capacity	6Ah	8Ah	50Ah	50Ah	100Ah	100Ah
Efficiency	≥96%	≥96%	≥96%	≥96%	≥96%	≥96%
Cell Type	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4
Charge Voltage	14.6V	14.6V	14.6V	14.6V	14.6V	14.6V
Standard Charging Current	1.2A	1.6A	10A	10A	20A	20A
Max.Continuous Charging Current	7.5A	7.5A	50A	50A	100A	100A
Standard Discharge Current	3A	4A	25A	25A	50A	50A
Continuous Discharge Current	7.5A	7.5A	50A	50A	100A	100A
Peak Discharge Current	30±10A (10ms)	30±10A (10ms)	100±50A (0.3s)	100±50A (0.3s)	200±80A (0.3s)	200±80A (0.3s)
Discharge Cut-off Voltage	10V	10V	10V	10V	10V	10V
Charge Temperature Range	0-60°C	0-60°C	0-60°C	0-60°C	0-60°C	0-60°C
Discharge Temperature Range	-10°C-65°C	-10°C-65°C	-10°C-65°C	-10°C-65°C	-10°C-65°C	-10°C-65°C
Storage Temperature Range	-5-40°C	-5-40°C	-5-40°C	-5-40°C	-5-40°C	-5-40°C
Storage Humidity	65±20 %HR	65±20 %HR	65±20 %HR	65±20 %HR	65±20 %HR	65±20 %HR
Size(L *W*H)	90*72*108mm	151*65*94mm	195*166*170mm	195*166*170mm	330*173*216mm	330*173*216mm
Package Size (L *W*H)	375*235*155mm	335*235*143mm	212*186*207mm	212*186*207mm	347*192*265mm	347*192*265mm
Shell Material	plastic	plastic	plastic	plastic	plastic	plastic
Net Weight	-0.9kg	-1.0kg	-6kg	-6kg	-10kg	-10kg
Gross Weight	-0.95kg	-1.05kg	-6.3kg	-6.3kg	-10.3kg	-10.3kg
Package Method	8pcs per carton	6pcs per carton	1pcs per carton	1pcs per carton	1pcs per carton	1pcs per carton
Cycle Life	80% DOD, ≥6000 times	80% DOD, ≥6000 times	80% DOD, ≥6000 times	80% DOD, ≥6000 times	80% DOD, ≥6000 times	80% DOD, ≥6000 times
Self Discharge	4% per month	4% per month	3% per month	3% per month	2% per month	2% per month
SOC Indication	can be customized	can be customized	can be customized	can be customized	can be customized	can be customized
Communication Mode	can be customized	can be customized	can be customized	Bluetooth	can be customized	Bluetooth

Figura 51. Datasheet de la batería de ion-litio