

Desarrollo de un Sistema de Gestión de Energía para Baterías de Ion-Litio Integrado a una Microrred DC

Edwin Leandro Ramos Zambrano
 Asesor: PhD. Javier Revelo Fuelagán
 Programa de ingeniería electrónica
 Universidad de Nariño

Resumen—Los sistemas de gestión de baterías (*Battery Management System*, BMS) son fundamentales para garantizar la operación segura y eficiente de los sistemas de almacenamiento de energía (*Battery Energy Storage System*, BESS) en microrredes. Este trabajo presenta el diseño e implementación de un BMS para un banco de baterías de ion-litio integrado a una microrred DC de 24 V. El sistema desarrollado incorpora las funcionalidades de monitoreo, protección y control de los procesos de carga y descarga. Se realizaron pruebas experimentales que validaron el rendimiento del BMS para estabilizar la microrred ante cambios de los recursos energéticos renovables y demanda de potencia, manteniendo el voltaje del bus DC dentro de los límites establecidos. Los resultados demostraron una respuesta efectiva de los sistemas de protección ante distintas condiciones de operación. Las pruebas de integración del BMS en la microrred en DC, validaron el funcionamiento de gestión de almacenamiento de energía, manteniendo la operación continua de la microrred. Finalmente, el BMS desarrollado se convierte en una solución de almacenamiento de energía en aplicaciones que integran fuentes de energía renovable.

Index Terms—BMS, BESS, batería, ion-litio, microrred, BUS DC.

I. INTRODUCCIÓN

La demanda energética global ha experimentado un crecimiento sostenido y significativo en las últimas décadas. Este aumento se atribuye principalmente a tres factores: el crecimiento demográfico, la rápida industrialización de las economías emergentes y la creciente urbanización [1]. En particular, países como China e India han sido motores clave de este incremento, con su acelerado desarrollo económico y la mejora del nivel de vida de sus poblaciones [2]. El sector industrial continúa siendo el mayor consumidor de energía a nivel mundial, seguido de cerca por el transporte y los edificios residenciales y comerciales [3]. Además, la digitalización y la proliferación de dispositivos electrónicos han introducido nuevas formas de consumo energético [4]. Este aumento constante en la demanda plantea desafíos significativos para la sostenibilidad y la seguridad energética, impulsando la

Informe final del Trabajo de Grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. 13 de marzo de 2025.

Edwin Leandro Ramos Zambrano, estudiante de ingeniería electrónica.
 email: elramosz@udenar.edu.co

Javier Revelo Fuelagán, Profesor, Departamento de Electrónica. email:
 javierrevelof@udenar.edu.co

necesidad de una transición hacia fuentes de energía más eficientes y renovables [5].

Para abordar los desafíos planteados por la creciente demanda energética y la necesidad de transición hacia fuentes renovables, las microrredes inteligentes ofrecen una solución innovadora para integrar eficazmente las energías renovables en los sistemas de distribución eléctrica, abordando así los desafíos del aumento en el consumo energético [6]. Estas redes a pequeña escala, que pueden operar autónomamente o conectadas a la red principal, permiten gestionar eficientemente recursos energéticos distribuidos como paneles solares, turbinas eólicas, generación hidráulica, entre otras [7]. La incorporación de tecnologías de almacenamiento, como los BESS, mitiga la intermitencia de las fuentes renovables, mejorando la estabilidad del suministro [8], [9]. Los sistemas de control inteligente optimizan el flujo de energía en tiempo real [10], aumentando la resiliencia de la red y promoviendo la participación de los consumidores como “prosumidores” [11], llamados así porque pueden producir y consumir energía.

Los sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías mitigan las fluctuaciones de energía mejorando la resiliencia de las microrredes DC. Entre las diversas tecnologías disponibles para la construcción de BESS, las baterías de ion-litio se han posicionado como una opción preferente debido a su alta densidad energética, larga vida útil y rendimiento superior en aplicaciones de redes eléctricas [12]. No obstante, para maximizar el potencial de estas baterías y garantizar su operación segura, es fundamental contar con un BMS eficiente y adaptado a las necesidades de las microrredes DC.

El BMS es responsable de monitorear y controlar diversos parámetros de las baterías, incluyendo el estado de carga, la temperatura y el voltaje de las celdas individuales [13]. En el contexto de las microrredes DC, el BMS debe además integrarse eficazmente con otros componentes del sistema para contribuir a la estabilización de la red, especialmente durante operaciones en modo isla. Esta integración requiere de estrategias de control avanzadas que permitan una gestión óptima de los flujos de energía entre las fuentes de generación, las cargas y el sistema de almacenamiento [14].

La investigación en sistemas de gestión de baterías para microrredes DC no solo tiene implicaciones significativas para la mejora de la eficiencia energética y la integración de fuentes de energía renovables, sino que también contribuye

al desarrollo de comunidades energéticas más resilientes y autosuficientes [7]. El avance en este campo tiene el potencial de acelerar la transición hacia un modelo energético más sostenible, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y mejorando la estabilidad energética a nivel local y regional.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un sistema de gestión de energía para baterías de ion-litio específicamente diseñado para su integración en microredes DC. A través de un enfoque integral que abarca desde la definición de criterios de diseño hasta la implementación y validación experimental, esta investigación busca contribuir al avance del conocimiento en el campo del almacenamiento de energía de los sistemas distribuidos y proporcionar soluciones prácticas para los desafíos actuales en la gestión de energía en microrredes.

I-A. Definición del problema

En el contexto de las microrredes inteligentes y el almacenamiento de energía renovable, el Sistema de Gestión de Baterías es el encargado de monitorear y controlar el estado de carga (*State of Charge*, SOC) y el estado de salud (*State of Health*, SOH) de las baterías [15]. Este sistema está compuesto por varios módulos interconectados, cada uno con funciones específicas. El módulo de medición es responsable de recopilar datos precisos sobre voltaje, corriente y temperatura de cada celda [13]. El módulo de commutación controla la conexión y desconexión de las baterías para protegerlas contra sobrecarga o sobredescarga [16]. El módulo de balanceo asegura que todas las celdas mantengan niveles de carga similares, optimizando así el rendimiento y la vida útil del pack de baterías [17]. Por último, el módulo de comunicación facilita el intercambio de datos entre el BMS y otros sistemas de la microrred, permitiendo un control y monitoreo en tiempo real [18]. La integración eficiente de estos módulos en el BMS es fundamental para maximizar la eficiencia, seguridad y vida útil de los sistemas de baterías en aplicaciones que involucran almacenamiento de energía, como vehículos eléctricos y almacenamiento de energía renovable.

Los Sistemas de Gestión de Baterías robustos comerciales, como el caso de los fabricantes JBS, Daly y JK, ofrecen características avanzadas, pero presentan limitaciones significativas en su implementación y operación [19]. Estos sistemas típicamente utilizan interfaces de comunicación externas que, si bien permiten un monitoreo remoto y una operabilidad mejorada, requieren la instalación de componentes adicionales como servidores, canales de comunicación y aplicaciones específicas [13]. Esta complejidad no solo dificulta el proceso de implementación, sino que también puede incrementar sustancialmente los costos del sistema [20]. Además, muchos de estos BMS comerciales sufren de limitaciones en términos de capacidad de cómputo y almacenamiento de datos [21]. Aunque estos sistemas gestionan adecuadamente la energía, su diseño no siempre se adapta a usos específicos. Por ejemplo, para baterías de baja capacidad, los BMS consumen la energía de carga de las baterías para sostener su propio funcionamiento, comprometiendo el rendimiento general del sistema de almacenamiento de energía.

Ante las limitaciones identificadas en los sistemas BMS comerciales actuales, se hace evidente la necesidad de desarrollar una solución más avanzada y eficiente [22]. Un BMS mejorado incorpora una interfaz de monitoreo intuitiva que no requiera la instalación o adquisición de componentes adicionales, simplificando así tanto la implementación como el mantenimiento y reduciendo significativamente los costos operativos [23]. Este nuevo sistema aborda las limitaciones en la capacidad de cómputo y almacenamiento de datos que presentan los BMS comerciales.

En este contexto, en el presente proyecto se da respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál debe ser el diseño electrónico de un sistema de gestión de baterías de tecnología de ion-litio que permita integrarlo en una microrred en DC y que contemple las funcionalidades de carga, descarga, balance y monitoreo?

I-B. Estado del arte

Los Sistemas de Gestión de Baterías (BMS) han experimentado una notable evolución desde su introducción en la década de 1970, cuando su uso se limitaba principalmente a aplicaciones espaciales y militares [24]. Esta evolución ha estado intrínsecamente ligada al desarrollo de la tecnología de baterías, especialmente las de ion-litio, que emergieron como una solución revolucionaria en la década de 1990 [25]. En sus inicios, los BMS eran sistemas rudimentarios diseñados para monitorear parámetros básicos como voltaje y temperatura. Sin embargo, el rápido avance en la tecnología de baterías, impulsado por la creciente demanda de dispositivos electrónicos portátiles y vehículos eléctricos, catalizó una transformación significativa en la complejidad y capacidades de los BMS [26].

A medida que las baterías de ion-litio se volvieron más potentes y versátiles, los BMS evolucionaron para incorporar funciones avanzadas de gestión y optimización. Estas incluyen la estimación del SOC y el SOH, el balanceo activo de celdas, y algoritmos sofisticados para la predicción de la vida útil de la batería [27]. Además, la integración de tecnologías de comunicación avanzadas ha permitido la implementación de BMS en red, facilitando la gestión remota y el diagnóstico predictivo [13].

La miniaturización y la reducción de costos en la electrónica han influido en la evolución de los BMS, permitiendo su incorporación en una amplia gama de aplicaciones, desde pequeños dispositivos electrónicos hasta grandes sistemas de almacenamiento de energía para redes eléctricas [18]. En el contexto actual, con el auge de las energías renovables y las microrredes, los BMS han adquirido un papel fundamental en la optimización del rendimiento y la vida útil de los sistemas de almacenamiento de energía, contribuyendo significativamente a la eficiencia y sostenibilidad de estas infraestructuras [28].

Los BMS modernos son sistemas complejos que integran hardware y software avanzados. En cuanto al hardware, incluyen sensores de voltaje y corriente para monitorizar cada celda [27], unidades de control térmico para mantener la temperatura óptima [29], módulos de comunicación para la interconexión de componentes [30], circuitos de protección contra sobrecorrientes y cortocircuitos [26], y circuitos de balanceo para

equilibrar la carga entre celdas [31]. Respecto al software, implementan algoritmos sofisticados para la estimación del SOC [32] y del SOH [33], gestión térmica activa, balanceo de celdas, predicción de vida útil, diagnóstico de fallos [15], y optimización de carga [26].

Los BMS han incorporado técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático, revolucionando sus capacidades. Estos avances teóricos incluyen algoritmos de aprendizaje profundo para mejorar la precisión en la estimación del SOC y SOH [32], técnicas de análisis de big data para procesar grandes volúmenes de datos históricos y mejorar las predicciones de vida útil [15], y sistemas de gestión predictiva que utilizan modelos de aprendizaje por refuerzo para definir estrategias de carga y descarga en tiempo real [34].

En el sector automotriz, estos sistemas se encargan de mantener el rendimiento y la vida útil de las baterías, además de garantizar la seguridad del vehículo [35]. Los BMS en vehículos eléctricos deben manejar altas potencias y ciclos de carga/descarga frecuentes, lo que ha impulsado innovaciones en algoritmos de gestión energética y térmica [36].

El almacenamiento de energía renovable representa otro campo de aplicación para los BMS. La intermitencia inherente de las fuentes de energía renovable plantea desafíos significativos para la estabilidad de la red eléctrica. Los sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías, gestionados por BMS, ofrecen una solución prometedora a este problema [37]. Estos sistemas permiten almacenar el exceso de energía generada durante períodos de alta producción y baja demanda, para luego liberarla cuando la demanda supera la generación, contribuyendo así a la estabilidad y confiabilidad de la microrred [18].

En el contexto de las energías renovables, los BMS deben enfrentar desafíos únicos, como manejar capacidades de almacenamiento significativamente mayores y optimizar la eficiencia del ciclo de carga/descarga para maximizar la vida útil de las baterías y minimizar las pérdidas de energía [38], [39]. Además, deben integrar funcionalidades avanzadas de pronóstico y planificación, incorporando algoritmos predictivos que pueden anticipar patrones de generación y demanda basados en datos meteorológicos y patrones de consumo históricos [40].

En el campo de los dispositivos electrónicos portátiles, los BMS se enfrentan al desafío de gestionar baterías más pequeñas pero con una alta densidad energética. Esto ha impulsado el desarrollo de soluciones de BMS altamente integradas y eficientes, que incorporan tecnologías avanzadas de semiconductores y algoritmos sofisticados para optimizar la vida útil de la batería y la experiencia del usuario [41], [20].

A pesar de estos avances, los BMS aún enfrentan desafíos importantes que impulsan la investigación y el desarrollo continuo en este campo. La precisión en la estimación del SOC y SOH sigue siendo un área de intensa investigación, buscando métodos que combinen precisión, eficiencia computacional y adaptabilidad a diferentes tipos de baterías [15]. La gestión térmica eficiente, especialmente en condiciones extremas, continúa siendo un desafío [42]. Además, la escalabilidad y gestión de sistemas complejos, como los utilizados en aplicaciones de red o vehículos eléctricos de gran escala,

requieren arquitecturas de BMS más sofisticadas [43].

Varias tendencias están dando forma al desarrollo de BMS. La integración de tecnologías de Internet de las Cosas *internet of things, IoT*, permite mejorar la conectividad y el monitoreo remoto de los sistemas de baterías [44]. La aplicación de inteligencia artificial y aprendizaje automático está ganando terreno, ofreciendo el potencial de mejorar significativamente la precisión en la estimación del SOC y SOH, a la vez que permite mejorar las estrategias de carga y descarga [45].

Existe también una tendencia creciente hacia el desarrollo de BMS más flexibles y adaptables, que puedan funcionar eficientemente con diferentes tipos de baterías y en diversas aplicaciones [46]. Esta flexibilidad permite adaptarse a tecnologías de baterías emergentes, que pueden estar orientadas a dispositivos portátiles o sistemas de almacenamiento de energía a escala de red.

Finalmente, la integración con redes inteligentes y sistemas de energía renovable está impulsando el desarrollo de BMS con funcionalidades avanzadas para responder a señales de la red en tiempo real, participar en servicios de regulación de frecuencia y voltaje, y optimizar el almacenamiento y la descarga de energía en función de las condiciones de la red y los precios de la electricidad [47].

En conclusión, el campo de los BMS está evolucionando rápidamente para abordar los desafíos actuales y aprovechar las nuevas tecnologías emergentes. La integración de IoT, IA, y la adaptabilidad a diversas tecnologías de baterías y aplicaciones marcan la tendencia de los BMS, prometiendo sistemas más robustos, seguros y sostenibles para el almacenamiento de energía.

I-C. Contribuciones del trabajo

La ejecución de este trabajo de investigación ha generado las siguientes contribuciones significativas al campo de los Sistemas de Gestión de Baterías:

- Se implementó un prototipo de BMS capaz de gestionar el almacenamiento de energía en un arreglo baterías de ion-litio de configuración 6S, que permite el monitoreo y control del estado de carga de las baterías. Este prototipo integra tanto el hardware como el software necesarios para el monitoreo y control del conjunto de baterías.
- Se diseñó e implementó un algoritmo en C++ que se ejecuta en el ESP32, este gestiona los procesos de carga, descarga y protección del paquete de baterías de ion-litio. El desarrollo, incluyendo el código fuente y su historial de versiones, disponible en un repositorio de GitHub <https://github.com/Leo-Ram/TESISV3>.
- Se desarrolló una aplicación web con HTML, CSS y JavaScript alojada en el ESP32, que actúa como servidor y permite acceder a su interfaz mediante un navegador en la red local. Esta aplicación muestra en tiempo real el estado de carga de las baterías, las lecturas del sistema y permite configurar los parámetros del BMS para gestionar la energía.

I-D. Contribuciones del trabajo

La ejecución de este trabajo de investigación ha generado las siguientes contribuciones significativas al campo de los

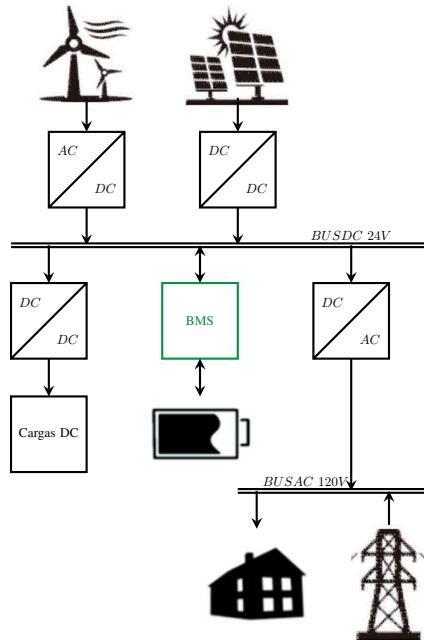


Figura 1: Diagrama de una microrred con un BUS DC de 24V.

Sistemas de Gestión de Baterías:

- Se implementó un prototipo de BMS capaz de gestionar el almacenamiento de energía en un arreglo de baterías de ion-litio de configuración 6S, que permite el monitoreo y control del estado de carga de las baterías. Este prototipo integra tanto el hardware como el software necesarios para el monitoreo y control del conjunto de baterías.
- Se diseñó e implementó un algoritmo en C++ que se ejecuta en el ESP32, este gestiona los procesos de carga, descarga y protección del paquete de baterías de ion-litio. El desarrollo, incluyendo el código fuente y su historial de versiones, disponible en un repositorio de GitHub <https://github.com/Leo-Ram/TESISV3>.
- Se desarrolló una aplicación web con HTML, CSS y JavaScript alojada en el ESP32, que actúa como servidor y permite acceder a su interfaz mediante un navegador en la red local. Esta aplicación muestra en tiempo real el estado de carga de las baterías, las lecturas del sistema y permite configurar los parámetros del BMS para gestionar la energía.

II. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL BMS

El BMS diseñado se integra a una microrred DC cuya arquitectura se muestra en la Fig. 1. Esta configuración muestra diversos elementos en torno a un bus DC de 24 V, que es el punto de acople de los diferentes elementos de la microrred.

El bus DC constituye el punto de interconexión principal para las fuentes de energía alternativa, las cargas en corriente continua y el inversor de DC a AC. En este entorno, el BMS se conecta directamente al bus DC, para gestionar el flujo de energía en ambas direcciones entre el sistema y las baterías [48], permitiendo alternar entre la carga y la descarga según las necesidades de la microrred.

Adicionalmente, la microrred incorpora un bus de corriente alterna (bus AC), que representa la conexión con la red eléctrica convencional y dispone de sus propias cargas y sistemas de conversión. Esta configuración híbrida AC/DC proporciona mayor flexibilidad en la administración energética [21]. En este contexto, el BMS mantiene la estabilidad de la tensión en el bus DC, mediante el control del flujo de potencia.

Cuando el sistema de generación de energía produce un excedente por encima del consumo actual de los usuarios, el BMS gestiona el excedente energético dirigiéndolo al almacenamiento en baterías hasta alcanzar su capacidad máxima de carga. Por el contrario, cuando el consumo supera la generación, el sistema inicia un proceso de descarga controlada que permite alimentar cargas como luces o electrodomésticos; simultáneamente, mantiene el funcionamiento de la microrred durante períodos de ausencia de generación del recurso renovable.

II-A. Requisitos y especificaciones

Un BMS está compuesto de 4 módulos, cada uno con una función específica.

1. **Módulo de medición:** Es el encargado de recopilar datos del arreglo de baterías, como voltaje, corriente y temperatura.
2. **Módulo de potencia:** Gestiona la carga, la descarga y el balance de acuerdo con los parámetros configurados en el BMS y el SOC de las baterías.
3. **Módulo de comunicación:** Permite el monitoreo del estado de las baterías y la configuración de parámetros, tales como los límites de carga, temperatura y corriente.
4. **Módulo de control:** Es el núcleo del sistema, ya que procesa los datos de los sensores y ejecuta algoritmos para gestionar el SOC de las baterías y el sistema de comunicación.

II-B. Criterios de diseño del BMS

Con base en los requisitos identificados, se establecieron los siguientes criterios de diseño, los cuales abarcan aspectos de rendimiento, eficiencia y seguridad:

- Conexión al bus de corriente continua: El arreglo de baterías debe contar con un puerto de dos terminales conectado directamente al bus DC. Esto permite que tanto la carga como la descarga ocurran a través del mismo punto, simplificando su integración a la microrred DC.
- Monitoreo en tiempo real: Es fundamental que el sistema proporcione datos en tiempo real sobre el SOC del arreglo de baterías.
- Balanceo de celdas: Debido a las diferencias en el SOH y el SOC inicial, las celdas individuales pueden experimentar desequilibrios. Por ello, el BMS debe incorporar un sistema de balanceo, que puede ser pasivo, activo o híbrido, para garantizar una distribución uniforme de la carga.
- Regulación de corriente de carga: Más allá de ser un simple interruptor, el sistema debe regular la corriente

de carga para evitar daños en las celdas. Esto permite implementar diferentes estrategias de carga en función de las necesidades del sistema y el software del BMS.

- Interfaces configurables: Los BMS más avanzados deben permitir la configuración de parámetros para adaptarse a distintos tipos de baterías, mejorando su versatilidad y aplicabilidad en diversas condiciones de operación.
- Cálculo del SOC: Generalmente, el SOC se determina mediante la relación entre la carga actual y la capacidad total de la batería. Si bien existen métodos más precisos, estos suelen requerir una capacidad de procesamiento elevada.
- Monitoreo de temperatura: La temperatura afecta el rendimiento de las baterías. El BMS debe contar con un sistema de detección y respuesta ante sobrecalentamientos para evitar daños en las celdas y garantizar la seguridad del sistema.

Una vez definidos los requisitos y criterios de diseño, se procede al desarrollo de la arquitectura del BMS, concebida con un enfoque modular e integrado que combina hardware especializado con software dedicado. Esta arquitectura se estructura en dos áreas principales: hardware y software.

II-C. Arquitectura de Hardware

Con base en los requisitos y especificaciones establecidos en la sección II A, y atendiendo a los criterios de diseño expuestos en la sección II B, se ha desarrollado la arquitectura de hardware del sistema. La Fig. 2 muestra el diagrama correspondiente, en el que se ilustran las conexiones y los componentes principales.

Para **El módulo de control**, se eligió el microcontrolador ESP32 [49], debido a su conectividad Wi-Fi, conversores DAC y ADC integrados, alta capacidad de procesamiento con su tecnología de doble núcleo y facilidad de programación. Gracias a su tecnología de doble núcleo, el ESP32 asigna un hilo al **módulo de comunicación**, encargado de gestionar un servidor web accesible desde cualquier dispositivo con un navegador en la red local.

El **modulo de potencia** se implementó mediante MOSFET IRFZ44N [50], que regulan los procesos de carga y descarga, controlando la corriente que fluye a través de las baterías, como se muestra en la Fig. 3. En esta configuración, $B-$ representa el negativo del banco de baterías y $P-$ el negativo conectado al bus DC. La capacidad de corriente del circuito depende del número de MOSFET conectados en paralelo con $M1$ y $M2$.

Los opto acopladores reciben la señal analógica emitida por el ESP32, de protección contra sobre voltaje (*Over Voltage Protection, OVP*) y contra bajo voltaje (*Under Voltage Protection, UVP*). Posteriormente, los opto acopladores transmiten la señal analógica a los MOSFET $M1$ y $M2$, estableciendo la lógica de carga y descarga según se detalla en la Tabla I. La señal analógica que reciben los MOSFET permiten ejercer un control sobre el flujo de corriente en el arreglo de baterías.

El sistema de balanceo es de tipo activo, se basa en una serie de capacitores que se conectan a las baterías a través de MOSFET dobles, lo que permite distribuir la diferencia

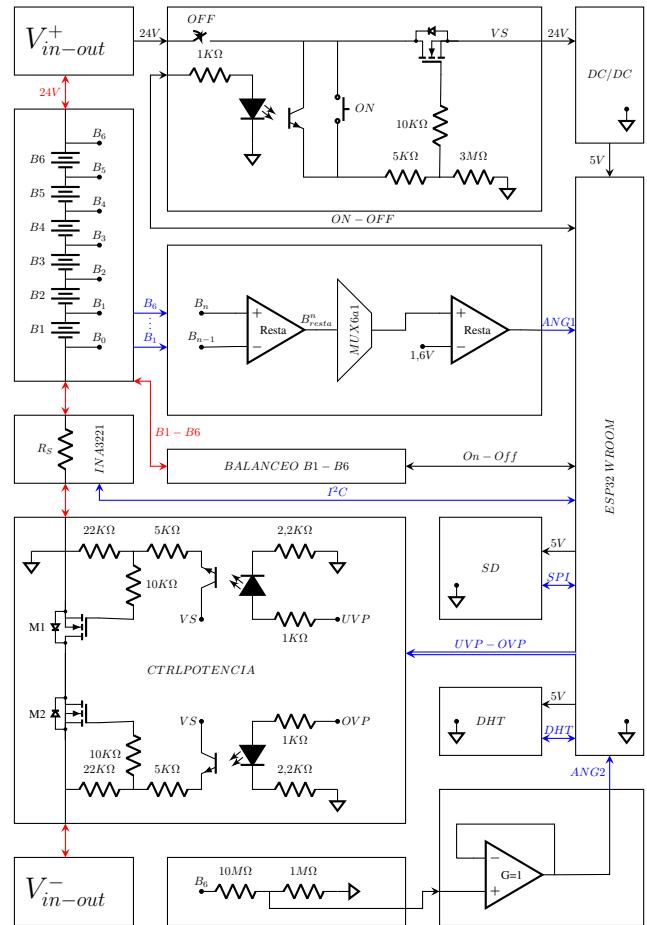


Figura 2: Diagrama del circuito del BMS, con módulos de control y comunicación integrados en un ESP32, el cual actúa como servidor wifi para una interfaz web de monitoreo y control en la red local.

Tabla I:
VALORES LÓGICOS CIRCUITO DE POTENCIA

M1	M2	Descarga	Carga
0	0	Off	Off
0	1	Off	On
1	0	On	Off
1	1	On	On

*Los valores que controlan los MOSFET son analógicos .

de voltaje entre las celdas adyacentes. La activación de este circuito se realiza mediante una señal proveniente del ESP32.

El BMS cuenta con un circuito de enclavamiento encargado de gestionar su alimentación. Este circuito se inicia mediante un pulsador y se enclava con una señal de activación (EN) proveniente del ESP32, como se muestra en la Fig. 4. Una vez en funcionamiento, el sistema puede apagarse de forma manual mediante un interruptor que interrumpe la alimentación V_{in-out} o automáticamente mediante una señal proveniente del ESP32. Este mecanismo permite desconectar el BMS cuando las baterías se descargan por debajo de su nivel operativo.

Del circuito de gestión de alimentación del BMS, (véase Fig. 4), se obtiene un voltaje de salida, VS , que alimenta un

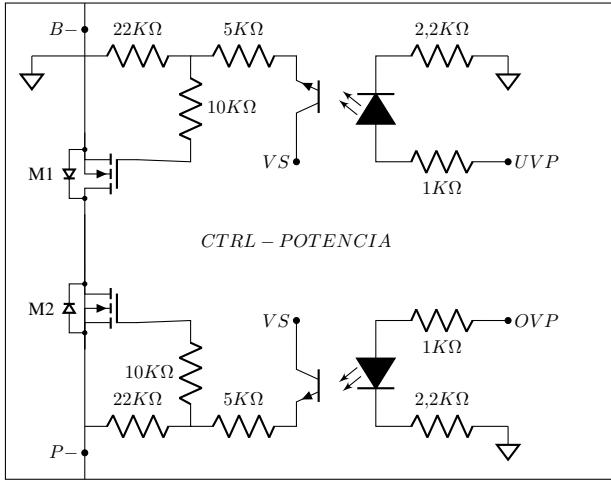


Figura 3: Circuito de control de potencia encargado de gestionar los procesos de carga y descarga.

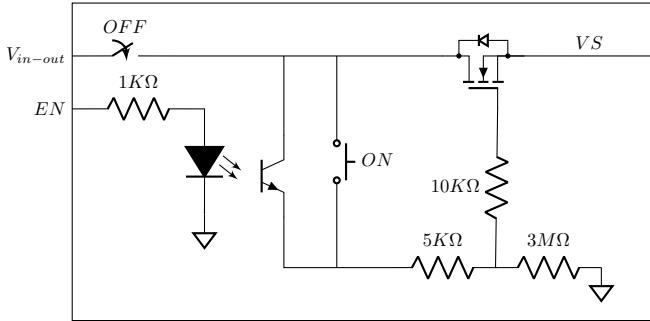


Figura 4: Circuito que gestiona la alimentación del BMS

conversor DC/DC reductor con salida de 5 V. El voltaje de 5 V se utiliza para alimentar la parte digital del BMS como se ve en la Fig. 2. El sistema digital incluye el ESP32, el MUX, la tarjeta SD para el almacenamiento de datos, el sensor DHT y los amplificadores LM324N cuya salida se conecta directamente al conversor ADC del ESP32. Por otro lado, los amplificadores en modo restador que se conectan a las baterías se alimentan directamente con VS para garantizar un funcionamiento lineal en sus operaciones.

En cuanto al **módulo de medición**, se utilizó el sensor de corriente INA3221 [51] por su alta precisión y su interfaz I2C, que permite integración directa con el ESP32. Adicionalmente, se incluyó un sensor DHT11 para la medición de temperatura.

Un divisor de voltaje de relación 10:1 lleva la señal del voltaje total de las baterías (B_6) al rango lineal del ESP32 (0.7 - 2.8) V, el divisor se conecta al ESP32 por medio de un seguidor de voltaje que aísla el circuito de potencia del circuito digital, como se ve en la parte inferior de la Fig. 2.

Los voltajes individuales se acondicionaron utilizando amplificadores LM324N [52] configurados en modo restador, según se aprecia en la Fig. 5. El sistema emplea un multiplexor CD4051 para gestionar los voltajes de cada batería, canalizándolos a una única línea donde se aplica una sustracción de 1.6 V para ajustarlos al rango de conversión. Dado que las baterías están dispuestas en serie, donde B_n representa el terminal positivo de la batería n y B_{n-1} su negativo, este

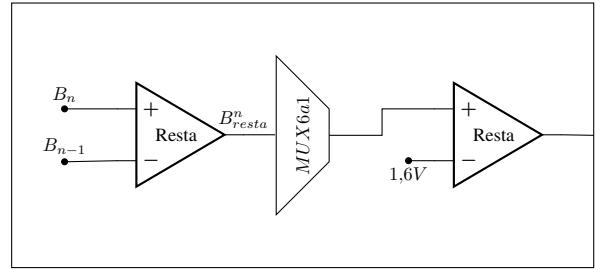


Figura 5: Acondicionamiento de voltajes individuales del arreglo de baterías.



Figura 6: Interfaz web del BMS mostrando el panel de monitoreo.

esquema permite mediciones precisas y sistemáticas.

II-D. Arquitectura de software

La implementación del software del BMS consta de dos componentes principales, ambos alojados en el ESP32: la interfaz web con su servidor y el algoritmo de control.

La **interfaz web**, desarrollada en HTML, CSS y JavaScript, se almacena en la memoria del ESP32. El dispositivo ejecuta un servidor en el núcleo 0 del ESP32, el cual asigna una dirección IP en la red local. Esto permite que, al ingresar dicha dirección en un navegador web, el servidor envíe la página web almacenada. La interfaz web se divide en tres secciones:

1. **Panel de monitoreo:** muestra en tiempo real variables clave como voltaje, corriente, temperatura y SOC, como se ilustra en la Fig. 6
2. **Panel de configuración:** permite al usuario ajustar parámetros del sistema tales como límites de voltaje, corriente y temperatura, entre otros. Con opciones pre-determinadas para baterías de ion-litio y una interfaz simplificada con deslizadores.
3. **Guía de conexión:** proporciona instrucciones para el arranque, configuración y conexión del BMS, tanto a las baterías como al bus DC.

El **algoritmo de control**, desarrollado en C++ e implementado con Arduino, gestiona la interacción entre los módulos de lectura, potencia y comunicación. El proceso ejecutado en

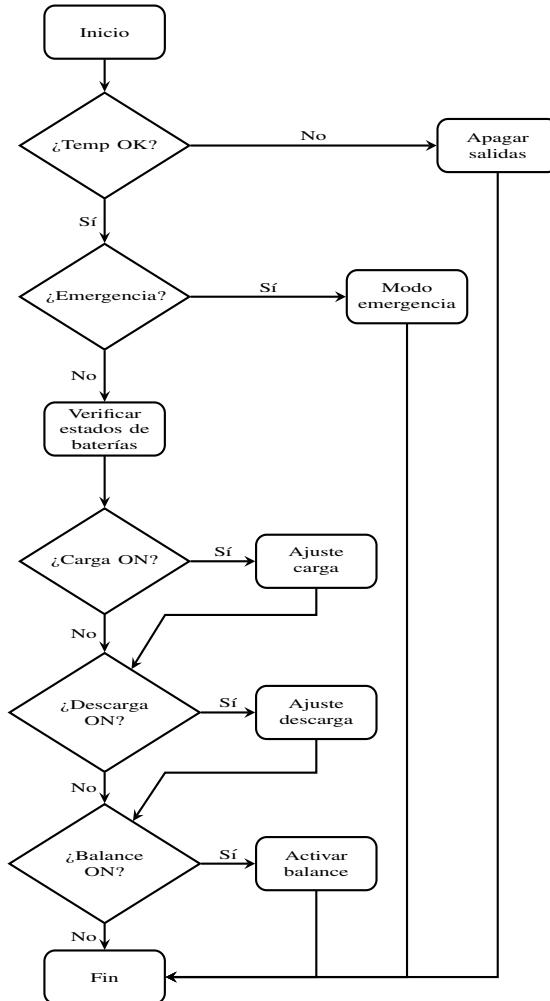


Figura 7: Diagrama del algoritmo que controla el flujo de potencia en el BMS.

el núcleo 1 del ESP32, inicia con la adquisición de todas las variables provenientes del módulo de lectura, las cuales se almacenan en la memoria SD. Con estas variables disponibles, se ejecuta el ciclo de control.

El ciclo de control mostrado en la Fig. 7 comienza con una verificación de temperatura. Si la temperatura no es adecuada, se interrumpe completamente el flujo de corriente en las baterías. Si no, a continuación, el sistema evalúa el estado de emergencia, el cual solo puede ser activado por el usuario en caso de requerir toda la energía disponible de las baterías, ignorando las protecciones por bajo voltaje. Si el estado de emergencia no está activo, el control revisa el estado de las baterías. Si están por debajo de su límite de descarga, se genera una orden interna para apagar el BMS, si no, los distintos estados se almacenan en variables lógicas para continuar con el proceso. Si la opción de carga está activada en la interfaz web y las baterías tienen un SOC suficiente según la evaluación de estados, se inicia el proceso de carga mediante el algoritmo de ajuste correspondiente. Del mismo modo, se toman decisiones sobre la descarga y el balanceo de las baterías hasta completar el ciclo del algoritmo.

Con la arquitectura de hardware y software definida, se

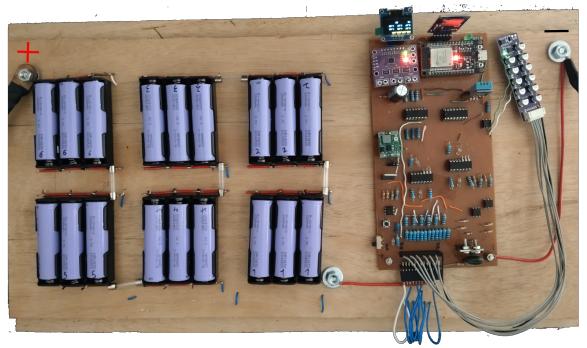


Figura 8: Montaje del BMS conectado a las baterías a un BUS-DC en funcionamiento

procedió al montaje experimental del prototipo, tal como se observa en la Fig. 8. En ella se muestra el BMS instalado y conectado a un banco de baterías de ion-litio, de 6 baterías en serie con 3 en paralelo (6S-3P), con sus terminales positivo y negativo de entrada y salida.

El montaje del prototipo cuenta con la capacidad de manejar hasta 8 A de corriente constante y 10 A de corriente pico, valores que están determinados por la resistencia del INA3221 (Fig. 2) y por las características de los MOSFET M1 y M2. No obstante, en aplicaciones destinadas a microrredes con mayores demandas, sería necesario mejorar el proceso de medición de corriente y utilizar configuraciones de MOSFET en paralelo para incrementar la capacidad de conducción. Asimismo, el número de baterías está limitado a un máximo de 8S debido a la disponibilidad de puertos y límite de voltaje de los amplificadores LM324 y en el convertidor DC/DC. En cuanto a la integración con la microrred, el BMS es capaz de manejar cargas y conexiones con una potencia máxima de 160 Wh, de acuerdo con los parámetros previamente mencionados. Además, admite cargas capacitivas y resistentivas.

III. RESULTADOS DEL PROTOTIPO DE BMS

Para realizar las pruebas, se instaló un medidor externo de corriente INA3221 de 3 canales, junto con un INA226 para medir el voltaje en el bus DC. Para medir los flujos de potencia entre el BMS, la microrred y una carga, complementando además los datos obtenidos del propio BMS.

III-A. Prueba del BMS conectado a una fuente DC

El montaje se realizó utilizando una fuente DC variable y una tira led de 10 W como carga, ambos conectados al BMS con sus baterías. Durante el experimento se varía la potencia que suministra la fuente, cuando la potencia de la fuente supera la demanda de la carga como se ve en la Fig. 9c, de t₁ a t₂ el excedente se almacena en las baterías por acción del BMS. En cambio, si la fuente no proporciona la potencia necesaria para la carga, de t₂ a t₃ el BMS actúa proporcionando la potencia faltante, manteniendo el nivel de voltaje Fig. 9a y el

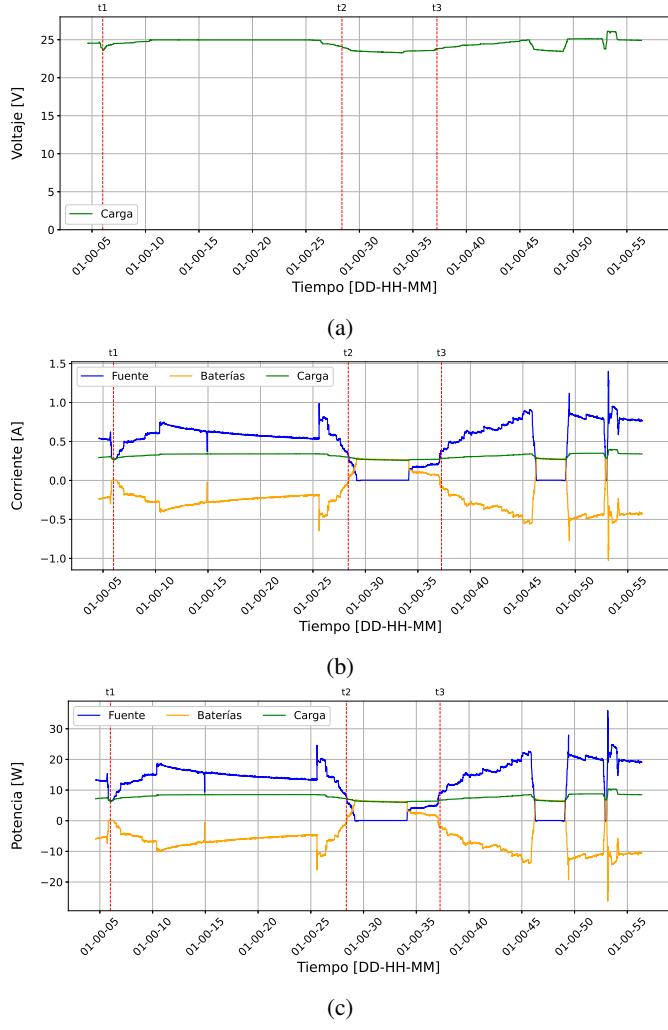


Figura 9: Medición de voltaje, corriente y potencia en el punto de conexión

suministro de corriente Fig. 9b. Además, se realizaron pruebas de transición en las que se introdujeron cambios abruptos en la fuente, para evaluar la capacidad de respuesta y rapidez de reacción del sistema, los resultados, a partir del t3 , demuestran la estabilidad en el suministro de potencia hacia la carga.

La Estabilidad de voltaje que se ve en la Fig. 9a, provoca que la gráfica de potencia sea semejante a la de corriente, este fenómeno se debe a que los cambios en el voltaje, están alineados y en la misma dirección que los de corriente.

III-B. Pruebas del BMS integrado a la microrred DC

Se conectó el BMS a la microrred DC experimental como se muestra en la Fig. 1, la cual se encuentra ubicada en el laboratorio de microrredes y energías de la Universidad de Nariño. Las pruebas de integración del BMS en la microrred permitieron evaluar su desempeño ante cambios en el recurso energético renovable.

Se llevó a cabo una **prueba del sistema de balanceo**, durante la cual se muestrearon datos con el sistema desactivado desde t0 hasta t1. Los resultados evidenciaron que, a diferencia de las demás, una de las celdas se descargó por debajo de

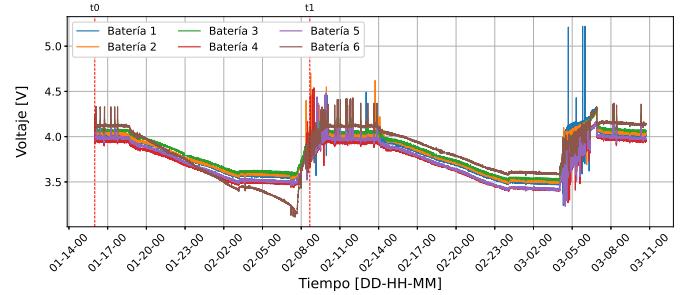


Figura 10: Voltajes en las baterías con balanceo desactivado hasta las 8:00 h y posteriormente activo

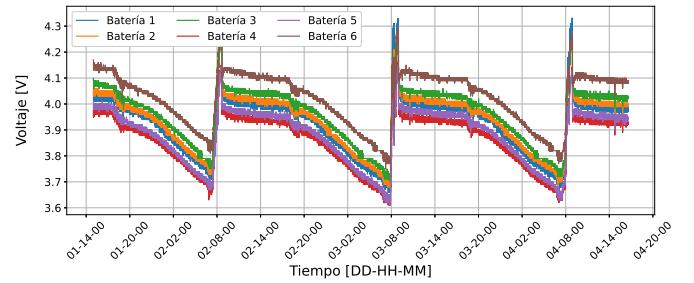


Figura 11: Voltajes de baterías durante tres días continuos de operación.

3.5 V, como se ve en la Fig. 10. Posteriormente, se activó el sistema de balanceo y, a partir de ese momento, las celdas mantuvieron su balance de voltaje.

Posteriormente, se realizó una **prueba del funcionamiento** del BMS configurado con todos los sistemas de carga, descarga y balance activos, por un periodo de tres días. Durante este tiempo, el BMS gestionó la energía proveniente de la microrred DC para cargar las baterías. Por la noche, la microrred se comporta como una carga, provocando que las baterías perdieran energía; durante el día, se recargaban hasta su límite. Este ciclo se repitió a lo largo de los tres días, demostrando que el sistema puede mantener el arreglo de baterías por debajo del nivel de voltaje configurado (4.2 V), considerando que el voltaje real se puede observar cuando se finaliza el proceso de carga a las 9:00 h de cada día aproximadamente, como se observa en la Fig. 11.

La distribución de las lecturas presentadas en la Fig. 11 se analiza mediante el diagrama de cajas y bigotes ilustrado en la Fig. 12. En esta representación gráfica, la *caja* abarca el 50 % central de los datos. Específicamente, los bordes de la caja definen el intervalo donde se concentra la variabilidad típica de los voltajes de las baterías (3.8 - 4.1) V, la *línea dentro de la caja* es la mediana de los voltajes. Por su parte, los *bigotes*, extendiéndose desde los extremos de la caja, señalan la dispersión de los datos hacia los valores mínimo y máximo dentro del rango considerado típico. Finalmente, los *puntos* identifican valores atípicos, que corresponden a lecturas de voltaje que se desvían significativamente del patrón general.

Si bien los voltajes de cada batería no están alineados, esto no se debe a una variación real de sus mediciones, sino a la precisión del proceso de calibración realizado a través de la

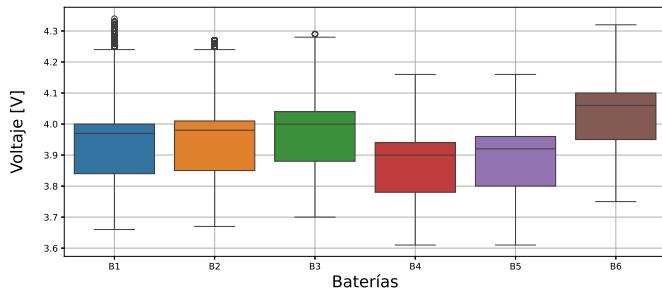


Figura 12: Distribución del voltaje de cada batería durante los 3 días de operación de la Fig. 11.

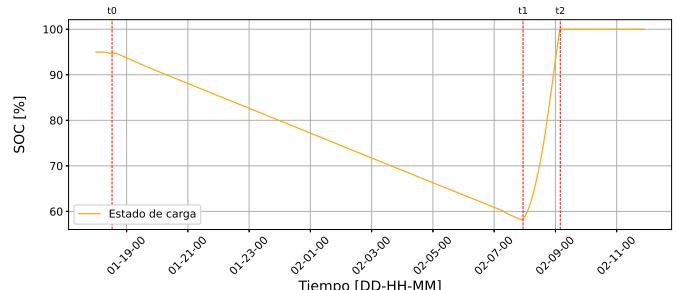
interfaz web. Este rango de desfase se forzó intencionalmente para poder apreciar las mediciones individuales de cada batería al graficar, así como el comportamiento general del BMS al enfrentarse a un paquete de baterías desbalanceadas.

Para analizar la **interacción con una carga de 2 W**, se utilizaron los datos obtenidos mediante el medidor externo. La prueba consistió en un muestreo de 24 horas de operación. El SOC de la batería inició su proceso de descarga desde un 95 % en t1. Esto se debe a que, durante el día, las baterías se descargaron al alimentar el BMS. Sin embargo, esta descarga no fue lo suficientemente profunda como para activar el proceso de recarga, ya que el sistema está diseñado para preservar el SOH, evitando ciclos cortos de carga y descarga.

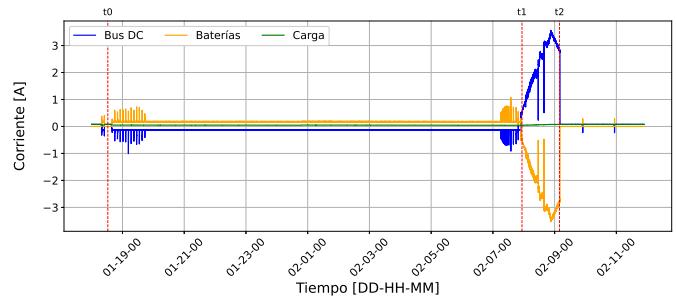
Durante todo el ciclo, la tira LED de 2 W permaneció encendida, junto con el consumo de otros componentes de la microrred DC, como los medidores y el controlador de carga MPPT. Estos flujos de potencia pueden observarse en la Fig. 13. En t2, con el inicio de la generación de las fuentes renovables, las baterías comenzaron su proceso de carga, regulado por el BMS, alcanzando su máximo SOC en t3.

Continuando con las pruebas del BMS se conecta una **carga de 10 W** utilizando una tira led de 3 segmentos. Este experimento está diseñado para alcanzar el límite de descarga configurado durante la noche. En t1, se alcanzó el punto de máxima descarga configurada, momento en el cual el BMS desconectó las baterías para protegerlas, interrumpiendo el suministro de energía a la carga y dejando el bus DC sin energía, como se ve en la Fig. 14. En t2, se registró un pico de potencia, en el cual las baterías experimentaron un breve aumento en su voltaje de recuperación, seguido de un descenso rápido, ya que, a pesar de recuperar su voltaje, no cuentan con la energía suficiente para alimentar el arranque de la microrred DC. Con el amanecer en t3, se inició un nuevo ciclo de carga, esta vez con el MPPT aprovechando directamente la energía de los paneles solares para su arranque, lo que evidencia la capacidad del sistema para recuperarse y reiniciar su ciclo de operación.

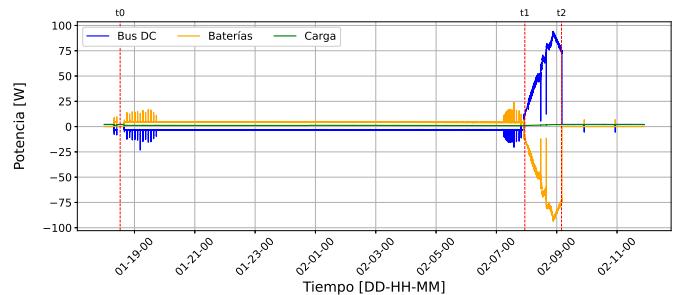
El proceso de carga incrementa progresivamente a medida que el sol alcanza su máxima irradiancia alrededor de las 12:00 h. Sin embargo, desde t4 el BMS inicia un proceso de control que limita la corriente de carga que reciben las baterías. Este parámetro es configurable mediante la interfaz del sistema, lo cual permite preservar el SOH de las baterías, dado que poseen



(a)



(b)



(c)

Figura 13: Flujo de potencia en el BUS-DC durante 24 horas.

un límite de corriente de carga de 3.3 A.

Los resultados de las pruebas realizadas en los diferentes escenarios de operación validan el funcionamiento del BMS, demostrando que los mecanismos de control y gestión energética operan conforme a los parámetros establecidos en el diseño. La Tabla II sintetiza los datos obtenidos en estas evaluaciones, confirmando el desempeño efectivo del sistema en diversos escenarios operativos.

Tabla II:
RESULTADOS DE FUNCIONAMIENTO

Prueba	Resultado
Control direccional de potencia	Exitoso
Protección sobrevoltaje	Exitoso
Protección bajo voltaje	Exitoso
Protección sobrecorriente	Exitoso
Control de carga	Exitoso
Control de descarga	Exitoso
Control de balanceo	Exitoso
Estabilidad e integración en el Bus DC	Exitoso
Envío y recepción de datos (IoT)	Exitoso
Interfaz WEB	Completa

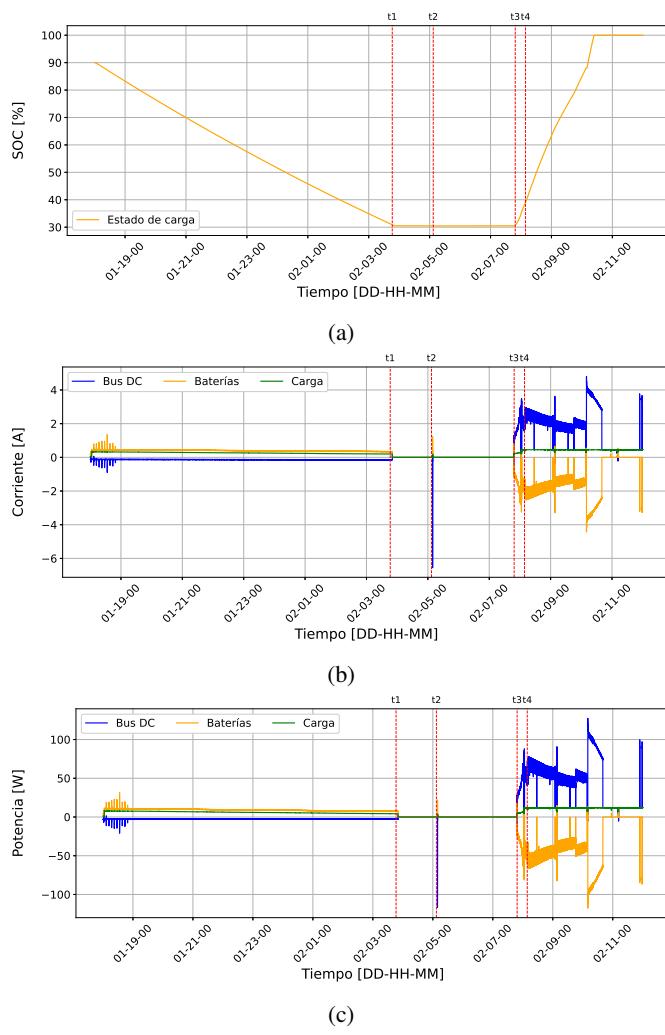


Figura 14: Flujo de potencia con carga hasta el corte por protección de bajo voltaje.

III-C. Análisis de datos

Para analizar la variabilidad real del sistema de baterías, consideramos los cambios incrementales en lugar de los valores absolutos. Para cada batería individual, calculamos primero la diferencia de voltaje entre mediciones consecutivas usando 1, donde $V_i(t)$ representa el voltaje de la batería i en el instante t . Este enfoque permite observar las fluctuaciones instantáneas en el sistema.

La desviación estándar (σ) de estos cambios se calculan usando 2, donde $\mu_{\Delta V_i}$ representa la media de los cambios de voltaje para la batería i la cual esta definido por 3. El ciclo de carga o descarga del sistema se determina a partir de la corriente $I(t)$ en cada instante usando 4.

$$\Delta V_i(t) = V_i(t) - V_i(t-1) \quad (1)$$

$$\sigma_{\Delta V_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=2}^n (\Delta V_i(t) - \mu_{\Delta V_i})^2} \quad (2)$$

$$\mu_{\Delta V_i} = \frac{1}{n-1} \sum_{t=2}^n \Delta V_i(t) \quad (3)$$

$$\text{Estado}(t) = \begin{cases} \text{Carga} & \text{si } I(t) > 0 \\ \text{Descarga} & \text{si } I(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

este método se emplea para las demás muestras, obteniendo los resultados de la desviación estándar durante el ciclo de carga y descarga, como se ve en la Tabla III.

Tabla III:
DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS MEDIDAS

Nombre	Descarga	Carga
$N_{muestras}$	167612	8958
σ Carga	σ Descarga	
Batería 1	0.0072 V	0.0128 V
Batería 2	0.0058 V	0.0106 V
Batería 3	0.0055 V	0.0103 V
Batería 4	0.0061 V	0.0108 V
Batería 5	0.0059 V	0.0099 V
Batería 6	0.0052 V	0.0098 V
V_{total}	0.0416 V	0.0779 V
I_{total}	16.4 mA	86.6 mA

*Este análisis se hizo con los datos de la Fig. 11.

Para calcular la energía de intercambio durante los procesos de carga y descarga de las baterías, se utilizó la integral discreta de la potencia respecto al tiempo, representada en 5:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n P_i \times \Delta t_i \quad (5)$$

En esta Ecuación, E_{total} representa la energía total entregada (o absorbida) durante el proceso, medida en Wh. Los datos empleados en el análisis corresponden a los presentados en la Fig. 14. Es importante destacar que, para proteger el SOH de las baterías, el sistema inició su operación con un 90 % de carga y se limitó la descarga hasta un 30 %, lo que impide visualizar la capacidad real completa del paquete de baterías. Los resultados indicaron que, durante la descarga, se obtuvo una capacidad de 89.36 Wh por día, mientras que durante la carga se alcanzaron 102.35 Wh por día, lo que refleja una eficiencia del 87.3 %.

IV. CONCLUSIONES

El prototipo, a nivel de hardware, posee la capacidad de adquirir los datos necesarios y ejecutar las órdenes provenientes del software, el cual fue diseñado para garantizar un SOC seguro para las baterías. La efectividad del sistema se ha verificado mediante pruebas de integración del BMS en la microrred DC, tanto en condiciones de carga ligera como en escenarios que demandan toda la energía almacenada en las baterías de ion-litio.

El desarrollo e implementación del software permitió integrar el sistema de control y una interfaz de usuario accesible a través de un navegador en la red local, lo que facilitó la monitorización y configuración del sistema. Gracias a esta integración, se puede gestionar el BMS y supervisar el estado del arreglo de baterías sin requerir hardware o software adicionales.

Como línea de investigación futura, se propone la miniaturización del BMS mediante la adaptación de su diseño a componentes de montaje superficial, considerando un aumento

de su capacidad y manejo de corriente, permitiendo la expansión en el número de baterías. Además, se sugiere utilizar los datos adquiridos para desarrollar algoritmos destinados a la estimación del SOH de las baterías.

V. NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de sus autores.”

Artículo 1º del Acuerdo No. 324 del 11 de octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”. Artículo 13, Acuerdo No. 005 del 2010 emanado del Honorable Consejo Académico.

VI. AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermana, pilares fundamentales en mi vida, cuyo amor incondicional, sacrificio y apoyo constante, me permitieron recorrer este camino universitario que hoy culmina con la presentación de esta tesis. Sus palabras de aliento y fe en mí han sido mi mayor motivación.

A mi asesor, por su invaluable dedicación, paciencia y sabiduría. Su guía experta y motivación constante no solo enriquecieron este trabajo de investigación, sino que también contribuyeron significativamente a mi formación profesional.

A la Universidad de Nariño, mi alma máter, especialmente al Departamento de Ingeniería Electrónica y sus docentes, quienes compartieron generosamente sus conocimientos y experiencias. Un agradecimiento especial al grupo de investigación GHEE, por abrirme sus puertas y brindarme el espacio y los recursos necesarios para desarrollar este trabajo. Su apoyo académico y profesional ha sido fundamental en la culminación exitosa de esta etapa.

REFERENCIAS

- [1] BP, “Statistical review of world energy,” BP p.l.c., London, UK, Tech. Rep., 2023.
- [2] International Energy Agency, “World energy outlook 2022,” IEA, Paris, France, Tech. Rep., 2022.
- [3] Enerdata. (2023) Global energy statistical yearbook 2023. [Online]. Available: <https://yearbook.enerdata.net/>
- [4] A. S. Andrae, “New perspectives on internet electricity use in 2030,” *Engineering and Applied Science Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 19–31, 2020.
- [5] International Renewable Energy Agency, “World energy transitions outlook 2023: 1.5°C pathway,” IRENA, Abu Dhabi, UAE, Tech. Rep., 2023.
- [6] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, “State of the art in research on microgrids: A review,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890–925, 2015.
- [7] A. Hirsch, Y. Parag, and J. Guerrero, “Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 402–411, 2018.
- [8] A. H. Fathima and K. Palanisamy, “Optimization in microgrids with hybrid energy systems – a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 431–446, 2015.
- [9] J. Li, D. Hui, Y. Xue, and T. Chen, “Advanced power electronic interfaces for distributed energy systems part 1: Systems and topologies,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 10, pp. 7945–7958, 2017.
- [10] L. Meng, E. R. Sanseverino, A. Luna, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1263–1273, 2016.
- [11] A. Llaria, O. Bruey, A. Berbey, and P. Guglielmi, “Integration of microgrids in low-voltage smart distribution networks: A review on management systems and control,” *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2087, 2020.
- [12] E. Banguero, A. Correcher, Pérez-Navarro, F. Morant, and A. Aristizabal, “A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems,” *Energies*, vol. 12, no. 21, p. 4167, 2019.
- [13] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, “A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834–854, 2018.
- [14] R. Salas-Puente, S. Marzal, R. González-Medina, E. Figueres, and G. Garcerá, “Experimental study of a centralized control strategy of a dc microgrid working in grid connected mode,” *Energies*, vol. 11, no. 4, p. 794, 2018.
- [15] R. Xiong, L. Li, and J. Tian, “Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods,” *Journal of Power Sources*, vol. 405, pp. 18–29, 2018.
- [16] M. Lelie, T. Braun, M. Knips, H. Nordmann, F. Ringbeck, H. Zappen, and D. Sauer, “Battery management system hardware concepts: An overview,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 4, p. 534, 2018.
- [17] M. Daoud, N. Omar, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, “Passive and active battery balancing comparison based on matlab simulation,” in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, pp. 1–7.
- [18] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, and M.-Y. Chow, “Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 4–16, 2013.
- [19] X. Zhao, I. Sánchez-Díaz, D. Halaszynski, G. Savant, D. A. Rodriguez, and R. Qin, “A framework for integration of uncertain quasi-real-time electric vehicle charging load using aggregate modeling approach,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 62764–62773, 2018.
- [20] K. Liu, K. Li, Q. Peng, and C. Zhang, “A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 14, pp. 47–64, 2019.
- [21] Y. Wang, J. Tian, Z. Sun, L. Wang, R. Xu, M. Li, and Z. Chen, “A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 131, p. 110015, 2020.
- [22] S. M. Rezvanianian, Z. Liu, Y. Chen, and J. Lee, “Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (ev) safety and mobility,” *Journal of Power Sources*, vol. 256, pp. 110–124, 2014.
- [23] Y. Xing, E. W. M. Ma, K. L. Tsui, and M. Pecht, “Battery management systems in electric and hybrid vehicles,” *Energies*, vol. 14, no. 7, p. 2167, 2021.
- [24] N. H. Kutkut and D. M. Divan, “Dynamic equalization techniques for series battery stacks,” *INTELEC. Twenty-First International Telecommunications Energy Conference*, pp. 1–8, 1999.
- [25] A. Yoshino, “The birth of the lithium-ion battery,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 51, no. 24, pp. 5798–5800, 2012.
- [26] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, “A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles,” *Journal of Power Sources*, vol. 226, pp. 272–288, 2013.
- [27] Y. Xing, W. He, M. Pecht, and K. L. Tsui, “State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2581–2588, 2011.
- [28] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T.-L. Lee, and P. C. Loh, “Advanced control architectures for intelligent microgrids—part i: Decentralized and hierarchical control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1254–1262, 2013.
- [29] J. Jaguemont, L. Boulon, and Y. Dubé, “A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures,” *Applied Energy*, vol. 164, pp. 99–114, 2016.
- [30] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P. J. Ker, “State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19362–19378, 2017.
- [31] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, M. I. Milanes-Montero, and M. A. Guerrero-Martinez, “Battery equalization active methods,” *Journal of Power Sources*, vol. 246, pp. 934–949, 2014.

- [32] M. S. H. Lipu, M. A. Hannan, A. Hussain, M. M. Hoque, P. J. Ker, F. Blaabjerg, and A. Miao, "A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations," *Journal of Cleaner Production*, vol. 205, pp. 115–133, 2018.
- [33] M. Bercicabar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van den Bossche, "Critical review of state of health estimation methods of li-ion batteries for real applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 572–587, 2016.
- [34] Z. Wei, T. K. Lim, M. Skyllas-Kazacos, N. Wai, and K. J. Tseng, "Online state of charge and model parameters estimation of the lifepo4 battery in electric vehicles using the covariance union algorithm," *Applied Energy*, vol. 212, pp. 1234–1246, 2018.
- [35] M. Brandl, H. Gall, M. Wenger, V. Lorentz, M. Giegerich, F. Baronti, G. Fantechi, L. Fanucci, R. Roncella, R. Saletti, S. Saponara, A. Thaler, M. Cifrain, and W. Prochazka, "Batteries and battery management systems for electric vehicles," *2012 Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition (DATE)*, pp. 971–976, 2012.
- [36] R. Xiong, J. Cao, Q. Yu, H. He, and F. Sun, "Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1832–1843, 2019.
- [37] M. T. Lawder, B. Suthar, P. W. Northrop, S. De, C. M. Hoff, O. Leitermann, M. L. Crow, S. Santhanagopalan, and V. R. Subramanian, "Battery energy storage system (bess) and battery management system (bms) for grid-scale applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014–1030, 2014.
- [38] H. C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic, and A. Jossen, "Lithium-ion battery storage for the grid—a review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids," *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 2107, 2017.
- [39] D.-I. Stroe, V. Knap, M. Swierczynski, A.-I. Stroe, and R. Teodorescu, "Operation of a grid-connected lithium-ion battery energy storage system for primary frequency regulation: A battery lifetime perspective," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 430–438, 2016.
- [40] A. Berrueta, A. Ursúa, I. S. Martín, A. Eftekhari, and P. Sanchis, "Supercapacitors: Electrical characteristics, modeling, applications, and future trends," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50 869–50 896, 2018.
- [41] K. S. Ng, C.-S. Moo, Y.-P. Chen, and Y.-C. Hsieh, "Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries," in *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. IEEE, 2009, pp. 1513–1519.
- [42] A. A. Pesaran, "Battery thermal management in ev and hevs: issues and solutions," *Battery Man*, vol. 43, pp. 34–49, 2001.
- [43] H. Kim, K. Y. Shin, H.-S. Shin, and M. N. Akram, "Necessity of hybrid battery management system for utility-scale energy storage system," *Journal of Energy Storage*, vol. 23, pp. 447–458, 2019.
- [44] A. Allam, S. Onori, S. Marelli, and C. Taborelli, "Battery health management system for automotive applications: A retrospective of battery health estimation methods," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 16, p. 160517, 2020.
- [45] E. Chemali, P. J. Kollmeyer, M. Preindl, and A. Emadi, "State-of-charge estimation of li-ion batteries using deep neural networks: A machine learning approach," *Journal of Power Sources*, vol. 400, pp. 242–255, 2018.
- [46] X. Hu, F. Feng, K. Liu, L. Zhang, J. Xie, and B. Liu, "State estimation for advanced battery management: Key challenges and future trends," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, p. 109334, 2019.
- [47] Vázquez-Rodríguez, J. Martínez-Román, L. Serrano-Iribarnegaray, and Abellán-García, "Comprehensive battery management system in smart grids," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 38–44, 2020.
- [48] H. Zhou, F. Zhou, and J. Xu, "Hybrid ac/dc microgrids: A review on protection systems and coordination strategies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 149, p. 111393, 2021.
- [49] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet*, 2022, version 4.5. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [50] Infineon Technologies, *IRFZ44N HEXFET Power MOSFET*, 2010, rev. 2.0. [Online]. Available: <https://www.infineon.com/dgdl/irfz44n.pdf?fileId=5546d462533600a4015356289dcf1fe2>
- [51] T. Instruments, *INA3221 Triple-Channel, High-Side Measurement, Shunt and Bus Voltage Monitor with I2C- and SMBUS-Compatible Interface*, 2023, rev. B. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/INA3221>
- [52] Texas Instruments, *LM324N Low Power Quad Operational Amplifiers*, 2019, sNOSC16D. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm324n.pdf>