



**FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ANTEPROYECTO DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**MODALIDAD PROYECTO TÉCNICO**

**“EFICIENCIA DE CARGA Y DESCARGA DE BANCO DE BATERÍAS CON  
ENERGÍA RENOVABLE”**

**Autor:**

**QUIMIS PICO DARLIN JAHIR**

**Asesor académico:**

**ING. FERNANDO VLADIMIR JARAMILLO GARCÍA, PHD**

**Manta – Ecuador**

**Octubre -2025**



Certificado de análisis

Compilatio Magister+ | ULEAM-ECU

## Eficiencia de carga y descarga de banco de batería con energía renovable

ID : e09c8d3dacc03f879445d27cac0b42a9c6ebb15e



3%

Textos sospechosos

Nombre del fichero : tesis almacenamiento de energia.txt

Tamaño del archivo original : 1,56 MB

Número de palabras : 11.677

Depositante : Darlin Jahir Quimis Pico

Autor : Darlin Jahir Quimis Pico

Fecha de depósito : 19 de julio de 2026

Tipo de carga : url\_submission

fecha de fin de análisis : 19 de julio de 2026

### Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :



#### Similitudes

1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



#### Detección de IA

0%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.

Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



#### Idiomas no reconocidos

2%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.

Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :



#### Textos entre comillas

0%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

Fuentes de similitudes (sección 2/2)



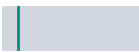
Similitudes

1%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Fuente principal detectada

| Nº | Descripciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Similitudes | Ubicaciones                                                                         |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 4  |  Banco de baterías en sistemas solares: su función y uso<br><a href="http://agriculturawiki.com/banco-de-baterias-en-sistemas-solares-su-funcion-y-u...">agriculturawiki.com/banco-de-baterias-en-sistemas-solares-su-funcion-y-u...</a>  | <1%         |  |

### **Certificación del tutor**

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:

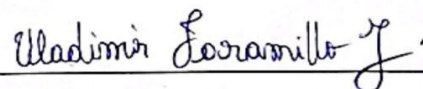
Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación bajo la modalidad de proyecto técnico, bajo la autoría del estudiante Quimis Pico Darlin Jahir legalmente matriculados en la carrera de Electricidad del periodo 2026 (1), cumpliendo el total de las horas, cuyo tema de proyecto es "Eficiencia de carga y descarga de banco de baterías con energía renovable".

El presente proyecto ha sido desarrollado de acuerdo con los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 20 de Julio de 2026.

Lo certifico,



Ing. Fernando Vladimir Jaramillo García, PhD

**Docente tutor**

### **Autoría del Proyecto Técnico**

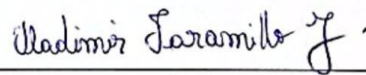
Quien suscribe Quimis Pico Darlin Jahir con cédula de identidad N° 1316280963, egresado de la facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura en la carrera de Electricidad. Declaro que nuestro proyecto de titulación "Eficiencia de carga y descarga de banco de baterías con energía renovable" la autoría del contenido, los hallazgos y las conclusiones alcanzadas son responsabilidad exclusiva de los autores. Se han utilizado las referencias bibliográficas imprescindibles para llevar a cabo el proyecto, garantizando el respeto por los derechos de autor de cada uno de los autores mencionados en la presente investigación. El patrimonio intelectual de este proyecto de titulación corresponderá a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.



---

Quimis Pico Darlin Jahir

**Autor**



---

Ing. Fernando Vladimir Jaramillo García, PhD

**ASESOR ACADEMICO**

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de titulación:

En primer lugar, a Dios, por brindarme la vida, la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesaria para superar cada desafío presentado a lo largo de mi formación académica. Su guía y bendiciones han sido fundamentales para alcanzar esta importante meta.

A mi amada mujer, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante durante este proceso. Gracias por acompañarme en cada momento, por alentarme a seguir adelante y por creer en mi incluso en los momentos más difíciles.

A mi querido hijo, quien, con su alegría, inocencia y amor, se ha convertido en mi mayor motivación para esforzarme cada día y buscar un futuro mejor. Este logro también es para ti, como ejemplo de que con dedicación y constancia los sueños pueden hacerse realidad.

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida, por sus sacrificios, enseñanzas y valores inculcados desde mi infancia. Gracias por brindarme siempre su apoyo y confianza, permitiéndome crecer tanto personal como profesionalmente.

A mis hermanas, por su cariño, compañía y palabras de aliento a lo largo de este camino. Su apoyo y confianza han sido una fuente de motivación para continuar avanzando hacia mis objetivos.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación y me acompañaron durante esta etapa tan importante de mi vida. Este logro es el reflejo del esfuerzo compartido, la fe y el amor de quienes siempre estuvieron a mi lado.

Quimis Pico Darlin Jahir

## **Agradecimiento**

En primer lugar, expreso mi gratitud con Dios, fuente de fortaleza y sabiduría, por guiarme en cada paso, darme la sabiduría para superar las adversidades y complicaciones que me encontré en el camino, gracias por permitirme culminar con éxito esta etapa.

Así mismo, manifiesto mi más sincero agradecimiento y reconocimiento al Ing. Fernando Vladimir Jaramillo García, PhD., mi tutor de tesis. Su importante guía, dirección y constante respaldo a lo largo de mi formación universitaria han sido pilares fundamentales para mi crecimiento profesional, siendo su compromiso y dedicación claves para alcanzar las metas propuestas.

A mi familia le agradezco de todo corazón por ser mi respaldo y soporte incondicional. Sus palabras de aliento, sacrificios y confianza constante nos impulsaron a perseverar y seguir adelante en el desarrollo de mi carrera académica.

Por último, extendo mi agradecimiento a mis amigos cercanos, quienes me brindaron apoyo y compañía durante este trayecto.

Quimis Pico Darlin Jahir

## **Resumen**

La eficiencia de carga y descarga de un banco de batería alimentado con energía renovable (eólica), constituye un elemento clave para asegurar el buen rendimiento y sostenibilidad de los sistemas eléctricos híbridos. Este estudio tiene como propósito evaluar dicha eficiencia, analizando el comportamiento del banco de batería bajo diferentes condiciones de generación renovable. La metodología aplicada fue de tipo cuantitativo y se basó en la ejecución de pruebas experimentales con equipos previamente implementados por estudiantes en el laboratorio de potencia de la facultad de ingeniería eléctrica, donde se dispone de sistemas de generación eólica instrumentadas para registrar el desempeño de banco de baterías durante los procesos de carga y descarga. Los resultados mostraron que la eficiencia del sistema está directamente relacionada con la estabilidad de las fuentes renovables y con el estado de carga del banco, evidenciándose además que la combinación de energía mejora la capacidad de almacenamiento y reduce las fluctuaciones del sistema. En conclusión, la evaluación realizada permitió comprender el comportamiento de almacenamiento energético en condiciones reales de operación y demuestra que la integración de fuentes renovables en sistemas híbridos favorece el desarrollo de soluciones eléctricas más limpias, eficientes y sostenibles.

**Palabra claves:** almacenamiento, baterías, rendimiento.



## **Abstract**

The charging and discharging efficiency of a battery bank powered by renewable energy (wind) is a key element in ensuring the performance and sustainability of hybrid electrical systems. This study aims to evaluate this efficiency by analyzing the battery bank's behavior under different renewable generation conditions. The methodology employed was quantitative and based on experimental tests using equipment previously implemented by students in the power laboratory of the electrical engineering faculty. This laboratory has instrumented wind power generation systems to record the battery bank's performance during charging and discharging processes. The results showed that system efficiency is directly related to the stability of the renewable sources and the battery bank's state of charge. Furthermore, the study demonstrated that combining renewable energy sources improves storage capacity and reduces system fluctuations. In conclusion, the evaluation provided an understanding of energy storage behavior under real-world operating conditions and demonstrates that integrating renewable sources into hybrid systems fosters the development of cleaner, more efficient, and more sustainable electrical solutions.

**Keywords:** Storage, batteries, performance.

## Índice de contenido

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| Resumen .....                        | 8  |
| Abstract .....                       | 9  |
| Introducción .....                   | 15 |
| Capítulo 1: El problema .....        | 17 |
| 1.1 Antecedentes .....               | 17 |
| 1.2 Justificación .....              | 18 |
| 1.3 Propuesta .....                  | 19 |
| 1.4 Problema de investigación .....  | 20 |
| 1.5 Árbol de Problema .....          | 21 |
| 1.6 Árbol de Objetivos .....         | 22 |
| 1.7 Objeto de la investigación ..... | 23 |
| 1.8 Campo de acción .....            | 23 |
| 1.9 Hipótesis .....                  | 23 |
| 1.10 Objetivos .....                 | 23 |
| 1.10.1 Objetivo General .....        | 23 |
| 1.10.2 Objetivos Específicos .....   | 24 |
| 1.11 Variables .....                 | 24 |
| Capítulo II: Marco teórico .....     | 25 |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Sistema de almacenamiento de energía con baterías .....                             | 25 |
| 2.2 Almacenamiento de energía.....                                                       | 26 |
| 2.3 Clasificación de las tecnologías de baterías para el almacenamiento de energía ..... | 27 |
| 2.3.1 baterías de flujo redox.....                                                       | 28 |
| 2.3.2 Batería de Sodio y Azufre .....                                                    | 31 |
| 2.3.3 Batería de ion litio.....                                                          | 34 |
| 2.3.4 Batería de plomo -ácido.....                                                       | 37 |
| 2.4 Ejercicios aplicativos .....                                                         | 56 |
| Capítulo III. Diseño de proyecto.....                                                    | 58 |
| 3.1 Metodología .....                                                                    | 58 |
| 3.2 Descripción del módulo de bloque de batería de plomo Lab-Volt Series 8802-12 ....    | 58 |
| 3.1 Selección de instrumentos y equipos .....                                            | 60 |
| 3.1.1 Banco de baterías de plomo – ácido 8802 – 12.....                                  | 60 |
| 3.1.2 Controles, conectores e indicadores del banco de batería.....                      | 61 |
| 3.1.3 Características .....                                                              | 61 |
| 3.1.4 Módulo Dinamómetro/fuente de alimentación de 4 cuadrante. ....                     | 63 |
| 3.1.5 Alternador/controlador de aerogenerador LabVolt Series 8216 – 02. ....             | 64 |
| 3.1.6 Módulo fuente de alimentación.....                                                 | 65 |
| 3.1.7 Equipos de medición adicionales.....                                               | 66 |
| 3.2 Procedimientos de prácticas.....                                                     | 67 |

|                                               |                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.1                                         | Práctica 1: “Proceso de carga de la batería de plomo-ácido 8802-12” .....                             | 67  |
| 3.2.2                                         | Práctica 2: “Descarga parcial del banco de batería de plomo (8802-12)” .....                          | 77  |
| 3.2.3                                         | Práctica 3: “Prueba de sulfatación” .....                                                             | 85  |
| 3.2.4                                         | Práctica 4: “Ajuste de la tensión de carga máxima del controlador del<br>aerogenerador 8216-02” ..... | 98  |
| 3.2.5                                         | Práctica 5: “Almacenamiento en baterías de la energía producida por los<br>aerogeneradores” .....     | 104 |
| Capitulo IV: Discusión de los resultados..... |                                                                                                       | 115 |
| 4.1                                           | Carga de la batería (8802-12).....                                                                    | 115 |
| 4.2                                           | Descarga parcial (8802-12).....                                                                       | 120 |
| 4.3                                           | Prueba de sulfatación (8802-12) .....                                                                 | 124 |
| 4.4                                           | Ajuste del controlador del aerogenerador (8216-02) .....                                              | 126 |
| 4.5                                           | Almacenamiento de energía eólica en baterías. ....                                                    | 129 |
| 4.6                                           | Conclusiones .....                                                                                    | 132 |
| Recursos.....                                 |                                                                                                       | 133 |
| 5.1                                           | Recursos humanos.....                                                                                 | 133 |
| 5.2                                           | Recursos Institucionales.....                                                                         | 133 |
| 5.3                                           | Recursos materiales y Económicos.....                                                                 | 134 |
| 5.4                                           | Cronograma.....                                                                                       | 135 |
| Referencias.....                              |                                                                                                       | 137 |

## Índice de contenido

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>1 Figura:</b> <i>Arquitectura de integración de una BFR completa.</i> .....                                                     | 31  |
| <b>2 Figura:</b> <i>Esquema de batería RT-Na/s y etapas de reacción durante la descarga de batería</i>                             | 34  |
| <b>3 figura:</b> <i>Estructura interna de la batería</i> .....                                                                     | 37  |
| <b>4 Figura:</b> <i>Banco de baterías de plomo – ácido Modelo 8802-1 y sus principales elementos de conexión y medición.</i> ..... | 60  |
| <b>5 figura:</b> <i>Modulo Dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes.</i> .....                                         | 64  |
| <b>6 figura:</b> <i>Modulo Alternador/controlador de aerogenerador LabVolt Series 8216 – 02</i> .....                              | 65  |
| <b>7 figura:</b> <i>Modulo de Fuente de alimentación</i> .....                                                                     | 66  |
| <b>8 Figura:</b> <i>Instrumentos de medición</i> .....                                                                             | 67  |
| <b>9 Figura:</b> <i>parte interna de la batería</i> .....                                                                          | 68  |
| <b>10 figura:</b> <i>Comportamiento del voltaje y corriente</i> .....                                                              | 75  |
| <b>11 fugura:</b> <i>Componentes principales de un aerogenerador.</i> .....                                                        | 106 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Tabla 1:</b> Principales compuestos químicos presentes en las baterías de plomo ácido .....                                                                                                      | <b>49</b>  |
| <b>Tabla 2:</b> Datos obtenidos a partir del Comportamiento de carga durante la práctica.....                                                                                                       | <b>72</b>  |
| <b>Tabla 3:</b> Descarga parcial .....                                                                                                                                                              | <b>81</b>  |
| <b>Tabla 4:</b> prueba de sulfatación batería A .....                                                                                                                                               | <b>90</b>  |
| <b>Tabla 5:</b> Prueba de sulfatación batería B.....                                                                                                                                                | <b>91</b>  |
| <b>Tabla 6:</b> Prueba de sulfatación de batería C.....                                                                                                                                             | <b>91</b>  |
| <b>Tabla 7:</b> Ajuste de tensión máxima de carga del controlador 8216-02.....                                                                                                                      | <b>102</b> |
| <b>Tabla 8:</b> Parámetros medidos en el rotor y a la salida del controlador del aerogenerador<br>(bloque de baterías) para diferentes velocidades del viento mediante el amperímetro y voltímetro. | <b>112</b> |
| <b>Tabla 9:</b> Detalle de los recursos empleados .....                                                                                                                                             | <b>133</b> |
| <b>Tabla 10:</b> Detalle de los recursos institucionales ocupados .....                                                                                                                             | <b>133</b> |
| <b>Tabla 11:</b> Detalles de los recursos materiales y económicos .....                                                                                                                             | <b>134</b> |
| <b>Tabla 12:</b> Cronograma de Actividades de la fase 1 .....                                                                                                                                       | <b>135</b> |
| <b>Tabla 13:</b> Cronograma de Actividades de la fase 2.....                                                                                                                                        | <b>136</b> |

## **Introducción**

El crecimiento acelerado del consumo energético y la necesidad de reducir las emisiones contaminantes han impulsado el desarrollo del sistema basado en energía renovables. Sin embargo, la naturaleza intermitente de fuentes como la eólica ha hecho indispensable el uso de sistemas de almacenamiento energético, siendo los bancos de batería una solución clave para garantizar estabilidad y continuidad del suministro eléctrico. Estos bancos permiten almacenar la energía excedente generada en períodos de baja demanda para utilizarla posteriormente, optimizando así el aprovechamiento de los recursos renovables. (Olade, Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe , 2025, pág. 5).

Históricamente, el almacenamiento de energía eléctrica se basó en baterías de plomo-ácido, utilizadas inicialmente en aplicaciones estacionarias y de respaldo. Con el avance tecnológico, surgieron nuevas tecnologías como las baterías de ion-litio, níquel-metal hidruro y los sistemas de flujos, que han mejorado significativamente la capacidad, la vida útil y la eficiencia de los procesos de carga y descarga. (Olade, Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe , 2025, pág. 7). No obstante, la eficiencia real del sistema depende no solo del tipo de baterías, sino también de factores como temperatura, profundidad de descarga, estrategia de control y condiciones operativas del banco de baterías. (Hioki, 2020, pág. 3).

En la actualidad, la eficiencia de carga y descarga constituye un indicador crítico para evaluar el desempeño de los bancos de baterías integrados a sistemas renovables. (Daniel, 2008, pág. 7). Una baja eficiencia implica pérdidas energéticas, incremento de costos operativos y reducción de la vida útil de los sistemas. Por el contrario, una correcta gestión del ciclo de carga y descarga constituye a la estabilidad del sistema eléctrico, proporciona mayor autonomía y un uso más racional de la energía generada ya que el almacenamiento de energía se ha convertido en un factor muy importante para

mantener la estabilidad, eficiencia y sostenibilidad del sistema eléctrico. (Olade, Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe , 2025, pág. 10).

En aplicaciones residenciales, industriales y microrredes, la baja eficiencia del ciclo carga y descarga se traduce en desperdicio energético, aumento de costos operativos y reducción de la vida útil del sistema. (ScienceDirect, 2024). En contraste, cuando se realiza una gestión adecuada del banco de baterías, se mejora la estabilidad del suministro, se reducen las interrupciones y se optimiza el uso de la energía renovable disponible. Esto resulta especialmente relevante en contexto donde el acceso a la red eléctrica es limitado o costoso. De esta manera, la eficiencia del almacenamiento se convierte en un factor determinante para la sostenibilidad técnica y económica del sistema. (Ramirez, 2020).

Finalmente, esta investigación busca contribuir al conocimiento y comprensión del comportamiento electroquímico y eléctrico de las baterías de plomo-ácido, destacando su importancia en los sistemas modernos de almacenamiento energético y su aplicación en la integración de fuentes de energías renovables, promoviendo así el uso eficiente y sostenible de los recursos energéticos.



## Capítulo 1: El problema

### 1.1 Antecedentes

El almacenamiento de energía mediante baterías de plomo ácido ha sido, durante más de un siglo, una tecnología fundamental en los sistemas eléctricos. Su bajo costo, capacidad de reciclaje y fiabilidad han mantenido su vigencia incluso frente al desarrollo de nuevas baterías químicas (DOE, 1995, pág. 8). Las baterías de plomo ácido continúan siendo la opción más práctica para aplicaciones estacionarias y sistemas de energía renovable, por su avance tecnológico y facilidad de mantenimiento (DOE, 1995, pág. 5).

El principio de funcionamiento se basa en la reacción electroquímica reversible entre el plomo (pb), el dióxido de plomo ( $\text{PbO}_2$ ) y el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), que permite la conversión entre energía química y eléctrica. Durante la descarga, el plomo y el dióxido de plomo se transforma en sulfato de plomo, liberando energía eléctrica, mientras que el proceso inverso ocurre durante la carga (HIOKI E.E. Corporation, 2020, pág. 4). No obstante, la eficiencia de este proceso no es del 100% pues parte de la energía se pierde por el calor y gases. De acuerdo con (Mtsushita, 1999), “la eficiencia de una batería de plomo ácido típica se sitúa entre el 85% t el 95% dependiendo de la corriente de carga, la temperatura y la profundidad de descarga.

El proceso de carga y descarga en estas baterías implica una conversión electroquímica reversible entre el plomo, el dióxido de plomo y el ácido sulfúrico. L eficiencia energética del sistema depende directamente de las pérdidas térmicas, la resistencia interna y el estado de carga (SOC), según (Mtsushita, 1999), la eficiencia típica de las baterías de plomo ácido oscila entre 85% y 95%, eficiencia total se ve afectada por factores como la sobrecarga, la sulfatación de la placa y la profundidad de descarga (DoD), los cuales reducen el número de ciclos útiles (Mtsushita, 1999).

En aplicaciones con energías renovables, la correcta gestión de la carga y descarga resulta fundamental para mantener la estabilidad del sistema. Los módulos fotovoltaicos y los aerogeneradores presentan una generación variable, lo que provoca fluctuaciones en la corriente de carga de banco de baterías. Por ello, se requiere un control de carga inteligente que limite la corriente y tensión de flotación, optimizando el rendimiento y la vida útil de la batería (Sovema, 2018).

## **1.2 Justificación**

Ante el déficit energético actual, se ha aptado por la diversificación de fuentes de energía para suplir esta carencia. En este contexto, la energía renovable, como la eólica, se presenta como opción viables y sostenibles para atender la demanda eléctrica.

La integración de sistema de almacenamiento mediante banco de baterías de plomo ácido permite mitigar la intermitencia de estas fuentes, asegurando un suministro continuo y confiable de energía. (Mtsushita, 1999, pág. 14).

Por lo tanto, y, dando continuidad a la planificación de la carrera de electricidad en la profundización del estudio de energía renovable y almacenamiento energético, se considera fundamental evaluar la eficiencia de carga y descarga de un banco de baterías, ya que es fundamental evaluar la eficiencia de carga y descarga de un banco de baterías de plomo ácido alimentado por fuentes renovables. Este estudio permitirá comprender cómo las variaciones en la generación de energía (debido a cambios en la velocidad del viento) afectan la eficiencia y la vida útil de la batería.

La investigación se enfocará en la medición y el control de parámetros críticos, como la corriente de carga, la profundidad de descarga, el estado de carga y la temperatura de operación. La utilización de módulos de medición y control de combinación con el banco de baterías de plomo ácido proporciona datos precisos y confiables, permitiendo evaluar la eficiencia real del sistema bajo diferentes condiciones de operación. Esta información será útil para optimizar el uso energético,

incrementar la eficiencia y prolongar la vida útil del banco de baterías, contribuyendo al diseño de sistemas renovables más sostenibles y eficientes. (Stackelberg, Williams, Sánchez-Triana, Enriquez, & Cordova, 2021, pág. 44).

### **1.3 Propuesta**

Se plantea la utilización de un banco de baterías de plomo-ácido conectado a un sistema de generación de energía eólica con el propósito de evaluar su comportamiento durante los procesos de carga y descarga, así como determinar su eficiencia energética. Para el desarrollo de este estudio se empleará el software LVDAC-EMS (Lab-Volt Festo), una herramienta que permitirá supervisar, controlar y registrar en tiempo real las variables de operación del sistema, además de simular diferentes condiciones de funcionamiento.

La investigación se centrará en el análisis de parámetros fundamentales como la corriente de carga, la profundidad de descarga y la temperatura de operación, debido a la influencia que estos tienen sobre el rendimiento y la vida útil de las baterías. Mediante el monitoreo continuo de estas variables será posible obtener información precisa sobre el desempeño del banco de baterías bajo distintos escenarios de trabajo.

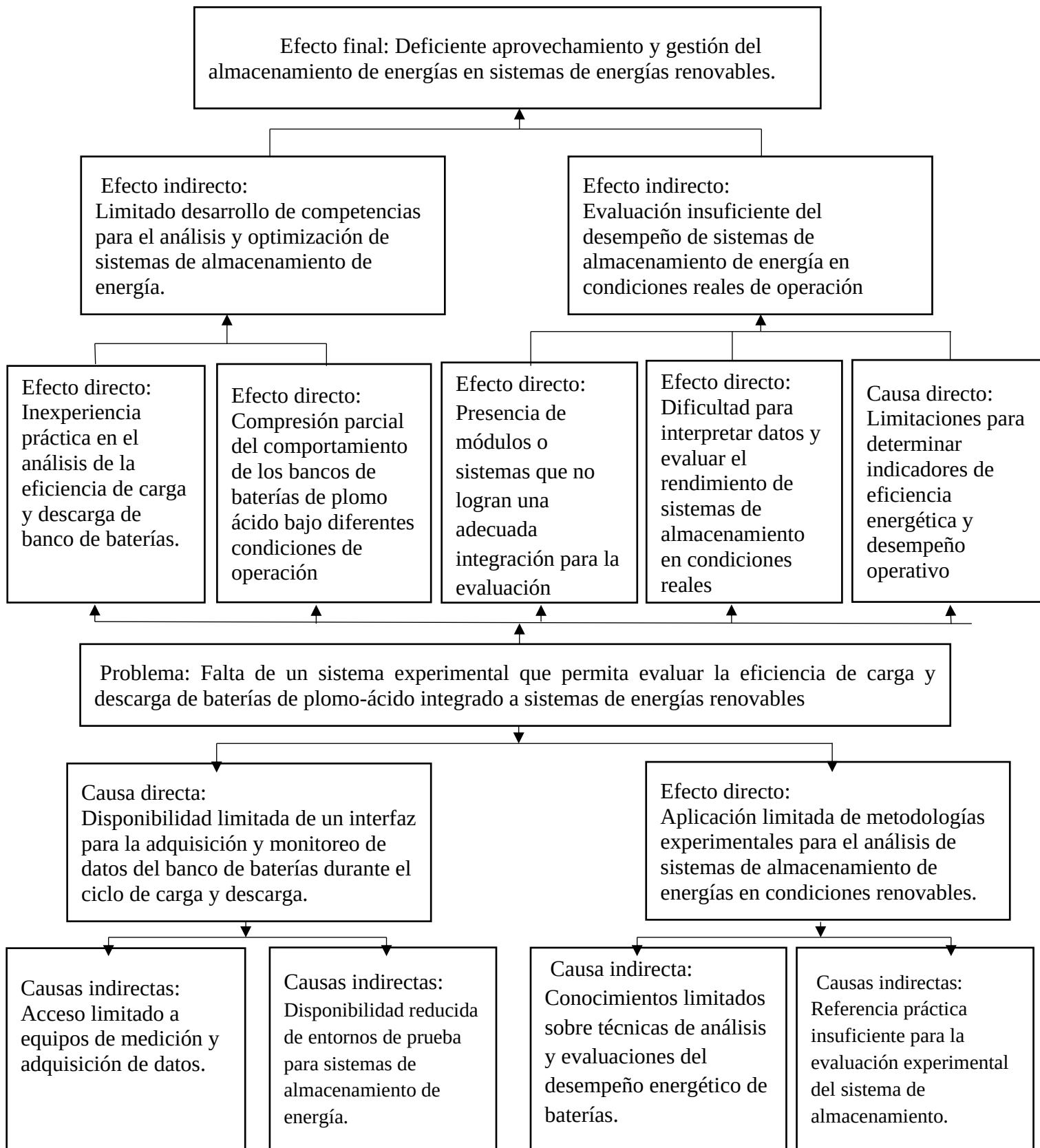
Adicionalmente, se estudiarán los procesos electroquímicos que ocurren en los electrodos positivos y negativos durante los ciclos de carga y descarga, relacionando dichas reacciones con las variaciones de las magnitudes eléctricas registradas experimentalmente. Esto permitirá comprender de manera más clara el comportamiento real de las baterías de plomo-ácido y establecer una conexión entre los fundamentos teóricos y su aplicación práctica en sistemas de almacenamiento de energía provenientes de fuentes renovables

#### **1.4 Problema de investigación**

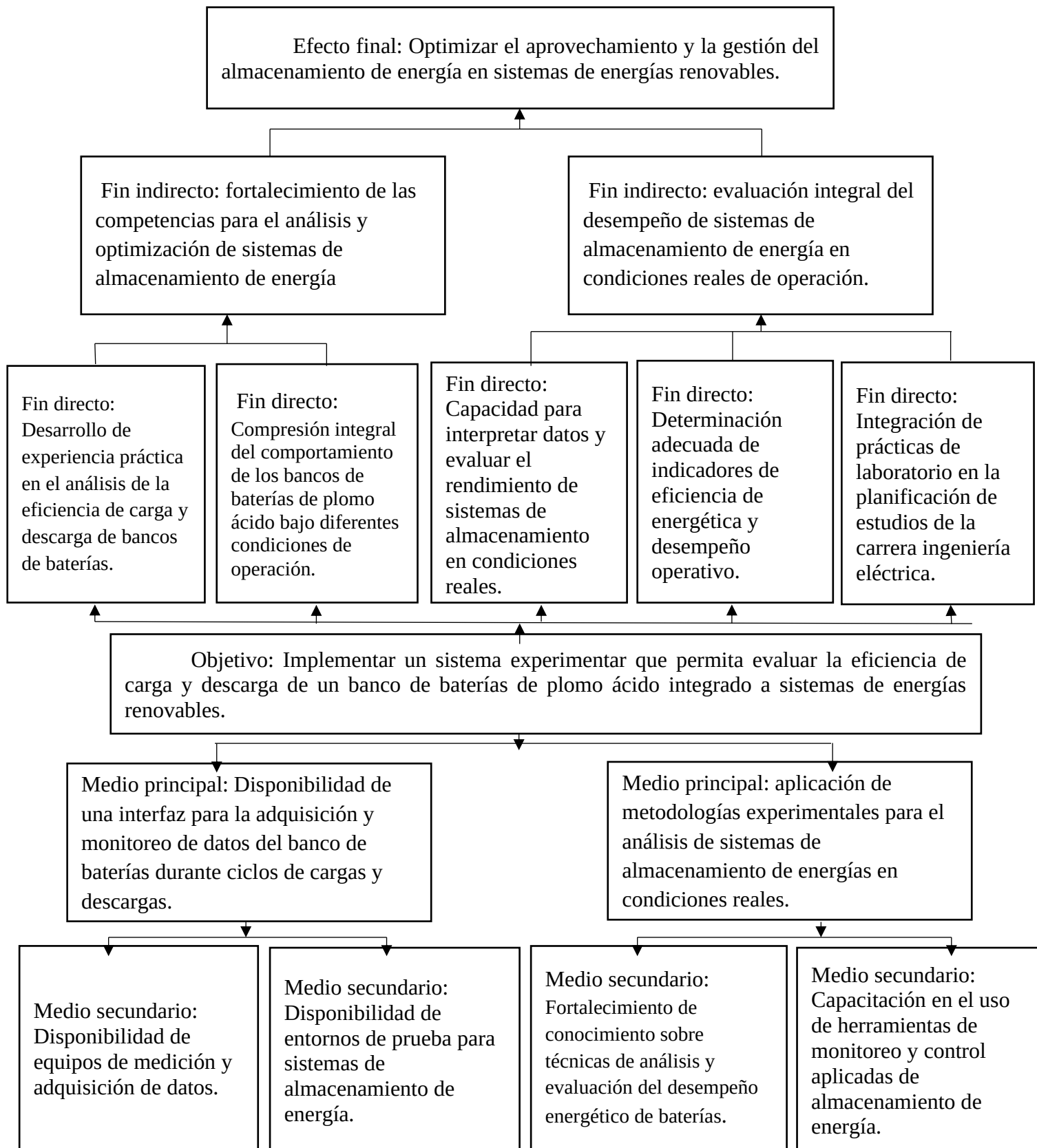
La carrera de Ingeniería en Electricidad de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí cuenta con laboratorios destinados al estudio de sistemas eléctricos y energías renovables, los cuales permiten a los estudiantes adquirir conocimientos teóricos fundamentales sobre el aprovechamiento de fuentes de energías limpias. Sin embargo, a pesar de disponer de estos recursos, no existe sistema experimental que permita evaluar de manera práctica la eficiencia de carga y descarga de bancos de baterías de plomo-ácido integrados a sistemas de energías renovables.

Debido a esta limitación, los conceptos relacionados con el almacenamiento de energía, el comportamiento electroquímico de las baterías y su rendimiento energético se abordan únicamente de forma teórica, sin posibilidad de ser validados mediante prácticas de laboratorio. Esta situación dificulta la comprensión integral del funcionamiento real de los sistemas de almacenamiento energético y su desempeño bajo condiciones operativas reales. Por lo cual, el presente proyecto se desarrolla con la finalidad de determinar la eficiencia de carga y descarga de un banco de baterías de plomo-ácido mediante el uso de energías renovables.

## 1.5 Árbol de Problema



## 1.6 Árbol de Objetivos



## **1.7 Objeto de la investigación**

El comportamiento energético y la eficiencia de carga y descarga de un banco de baterías de plomo-ácido integrado a un sistema de energías renovables, evaluados mediante prácticas experimentales utilizando el dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrante Lab-Volt serie 896020.

## **1.8 Campo de acción**

Facultad de ingeniería, industria y Arquitectura de la Universidad laica Eloy Alfaro de Manabí, específicamente en los laboratorios destinados al estudio de sistemas eléctricos, energías renovables, sistemas de potencia.

## **1.9 Hipótesis**

Al implementar el dinamómetro de cuatro cuadrantes como herramienta para la simulación de un sistema energía renovable y la realización de pruebas de carga y descarga en un banco de baterías de plomo-ácido, los resultados obtenidos de corriente, voltaje y potencia y energía estarán directamente relacionados con la eficiencia del sistema de almacenamiento. Al comparar estos resultados experimentales con los valores teóricos, se podrán identificar las ventajas y limitaciones del uso del dinamómetro de cuatro cuadrantes en la medición y análisis del rendimiento energético del banco de baterías bajo distintas condiciones de operación.

## **1.10 Objetivos**

### **1.10.1 Objetivo General**

Evaluar la eficiencia de carga y descarga del banco de baterías mediante la utilización de energía eólica.

### **1.10.2 Objetivos Específicos**

1. Analizar el comportamiento del banco de baterías durante el proceso de carga, con aerogenerador.
2. Medir la capacidad de almacenamiento y la tasa, bajo condiciones controladas de operación.
3. Comparar el rendimiento del sistema en función de los parámetros eléctricos obtenidos y los ensayos experimentados.

### **1.11 Variables**

- Variable independiente: Energías renovables (eólica)
- Variable dependiente: Eficiencia de carga y descarga del banco de baterías.



## **Capítulo II: Marco teórico**

### **2.1. Sistema de almacenamiento de energía con baterías**

En grandes volúmenes, la energía no puede almacenarse de manera directa con alta eficiencia. No obstante (Mejía, 2011, pág. 13) menciona que, es posible conservarla mediante su transformación en otras formas de energía, como la electromagnética, electromecánica, cinética o potencial. Para la selección de un sistema de almacenamiento de energías (ESS), existen dos criterios fundamentales: la capacidad total de energías que se necesita almacenar y la velocidad con la que esta puede ser cargada o liberada según la demanda. Además, deben considerarse otros aspectos relevantes, entre ellos el costo, la temperatura de operación y la vida útil del sistema (Mejía, 2011, pág. 13).

Las baterías almacenan la energía en forma química y actualmente son una de las opciones más utilizadas en el mercado debido a su buena relación costo - beneficio. En sistemas con energías renovables, normalmente se utilizan varias baterías conectadas en series o paralelo, con el objetivo de alcanzar los niveles de voltaje y corriente que requiere la aplicación. (Mejía, 2011, pág. 14).

Para poder conectarse a la red eléctrica según menciona (Atlas, 2024) se emplea un convertidor, mientras que un sistema de control se encarga de gestionar su funcionamiento, especialmente el proceso de carga, el cual suele realizarse en horarios donde la demanda es menor y el costo de la energía es más bajo.

Tal como menciona (Mejía, 2011, pág. 14) que entre sus principales ventajas se encuentra su alta eficiencia, su buena capacidad de respuesta ante cambios en la demanda, y la facilidad con la que pueden integrarse a sistemas de energías renovables. Además, dependiendo de la tecnología y del uso que se les dé, pueden tener una vida útil relativamente larga.

No obstante, algunas baterías requieren sistemas de enfriamiento o condiciones especiales para su almacenamiento, pueden necesitar equipos electrónicos complejos para su control y, en muchos casos, la inversión inicial puede ser elevada (Mejía, 2011).

## **2.2 Almacenamiento de energía**

El almacenamiento de energía eléctrica mediante bancos de baterías es una parte esencial de los sistemas de energías renovables, ya que permite equilibrar la variabilidad natural de la fuente de energía eólica. En este sentido, las baterías de plomo ácido han sido tradicionalmente las más utilizadas tal como se menciona (Pavlov, 2017, pág. 23). Esto se debe a las múltiples ventajas que presentan las baterías de plomo ácido, tanto en términos de rendimiento y aspectos económicos como de tecnología de fabricación.

No solo las características técnicas influyen en la adopción masiva de un producto, sino que, con frecuencia, los factores económicos tienen un papel más relevante. Estas baterías se caracterizan por su capacidad para suministrar potencia, su fiabilidad y la facilidad de su producción. Además, los recursos necesarios para su elaboración son prácticamente ilimitados, cerca del 98% de sus materiales pueden reciclarse (Pavlov, 2017, pág. 23).

La eficiencia de carga y descarga de un banco de baterías se define como la relación entre la energía que se puede recuperar durante la descarga y la energía suministrada durante la carga. Este valor depende directamente de las reacciones electroquímicas internas, la resistencia del sistema y las condiciones de operación (Pavlov, 2017, pág. 20). En el caso de las baterías de plomo ácido, durante la descarga se produce la transformación del plomo (Pb) y del dióxido ( $\text{PbO}_2$ ) en sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ), mientras que, durante la carga, el proceso se invierte regenerando los compuestos activos (Pavlov, 2017, pág. 33).

La eficiencia coulombica entendida como la relación entre la carga extraída y la carga suministrada, constituye otro indicador relevante del rendimiento del banco (Pavlov, 2017, pág. 47). En condiciones óptimas, puede alcanzar valores cercanos al 95% sin embargo, tiende a reducirse en ciclos profundos o bajo temperaturas elevadas. Una profundidad de descarga excesiva puede generar sulfatación irreversible de las placas, afectando la capacidad útil y acortando la vida del sistema (Pavlov, 2017, pág. 56). En aplicaciones de energías renovable como la eólica, las condiciones de carga y descarga son variables debido a la intermitencia de la fuente primaria.

Este comportamiento intermitente introduce oscilaciones en el nivel de carga, lo cual puede afectar la eficiencia total de almacenamiento (Asian Development Bank, 2018, pág. 63). Por ello, los sistemas modernos incorporan controladores electrónicos que ajustan la corriente de carga en función del estado de carga (SOC) y la tensión de la batería (Pavlov, 2017, pág. 72). Estos dispositivos permiten evitar tanto la sobrecarga como la descarga profunda, preservando la eficiencia global y la durabilidad del banco. Además, en sistemas híbridos donde se integran fuentes renovables múltiples, los ciclos irregulares de carga y descarga afectan directamente la eficiencia energética total y el estado de salud (Soh) de las baterías. (Bank, 2021).

### **2.3 Clasificación de las tecnologías de baterías para el almacenamiento de energía**

Los sistemas de almacenamiento de energía de acuerdo con el autor (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005) pueden emplearse en aplicaciones como sistemas de alimentación interrumpida (UPS), apoyo a redes de transmisión y distribución, o en generación eléctrica a gran escala, dependiendo de la tecnología utilizada y de la capacidad de almacenamiento disponible. Entre las distintas opciones de almacenamiento, ya sean de tipo electroquímico, químico o físico, las tecnologías que han cobrado mayor relevancia en los últimos años se enfocan principalmente en aplicaciones de alimentación interrumpidas y soporte a sistemas de transmisión y distribución (ADB,

2018, pág. 3) . Dentro de estas destacan tecnologías como las baterías de sodio-azufre, plomo ácido y sus versiones avanzadas, supercondensadores, baterías de litio y sistemas de volante de inercia, siendo las baterías de litio la más utilizadas en la actualidad (ADB, 2018, pág. 3) .

Las tecnologías de baterías empleadas en sistemas de almacenamiento de energía se distinguen principalmente por parámetros como la densidad energética, la eficiencia en los procesos de carga y descarga, la vida útil y su impacto ambiental. Estos factores permiten evaluar el desempeño y la idoneidad de cada tecnología según su aplicación (ADB, 2018, pág. 4)

Por otro lado, la densidad energética corresponde a la cantidad de energía que un sistema puede almacenar en relación con su peso o volumen (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005). En este aspecto, las baterías recargables de ion – litio presentan un desempeño superior, con valores que oscilan entre 150 y 250 Wh/kg. Esto les permite almacenar entre 1.5 y 2 veces más energías que las baterías de sodio- azufre, entre dos y tres veces más que las baterías de plomo-ácido (ADB, 2018, pág. 3).

Según se menciona en (ADB, 2018, pág. 4), la eficiencia en los procesos de carga y descarga constituyen un indicador clave para evaluar el rendimiento de una batería. En este sentido, las baterías recargables de ion-litio presentan los valores más altos, alcanzando aproximadamente un 95% de eficiencia. Por otro lado, las baterías de plomo-ácido muestran un desempeño inferior, con rangos entre el 60% y el 70%, mientras que las baterías de flujo redox se sitúan en valores intermedios, alrededor del 70% al 75% (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005).

### **2.3.1 baterías de flujo redox**

según (Pablo, 2022, pág. 2) las baterías de flujo redox constituyen una tecnología de almacenamiento electroquímico que surgió en la década de 1980 y que actualmente está ganando interés como alternativa para el almacenamiento de energía a gran escala proveniente de fuentes renovables.

Hoy en día, ya existen proyectos piloto y sistemas demostrativos con capacidades de decenas de MW/MWh en países como Japón, China y Australia (Pablo, 2022, pág. 3).

En este tipo de sistemas, la energía se almacena en compuestos activos que se encuentran disueltos en electrolitos líquidos, los cuales se mantienen en dos tanques separados: uno para el electrolito positivo y otro para el negativo. Durante su funcionamiento, estas soluciones son impulsadas continuamente mediante bombas a través de un circuito que las conduce hacia un reactor electroquímico (Pablo, 2022, pág. 3). En este proceso tiene lugar las reacciones necesarias para la conversión de energías, tras lo cual los electrolitos regresan nuevamente respectivos depósitos. En comparación con tecnologías más consolidadas, como las baterías ion- litio o de plomo-ácido, las baterías de flujo redox presentan características particulares que permiten diferenciarlas, las cuales se resumen generalmente en tablas comparativas (Pablo, 2022, pág. 4).

#### **2.3.1.1 Características electroquímicas**

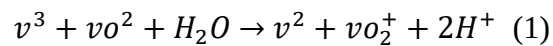
Una de sus características principales según menciona (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005) es que su unidad básica que conforma este tipo de reactor se denomina celdas electroquímicas, la cual está integrada por una semicelda de carácter positivo y otra de carácter negativo. A su vez, varias celdas pueden interconectarse para constituir un conjunto conocido como stack, que permite incrementar la capacidad del sistema (Pablo, 2022, pág. 4).

En cuanto a su estructura, una celda de batería de flujo redox está compuesta por diversos elementos fundamentales (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005). Los electrodos actúan como el medio donde tienen lugar las reacciones electroquímicas. La membrana cumple funciones de permitir el paso de iones entre ambas semiceldas, garantizando el equilibrio de carga en el sistema. Por su parte, los marcos del reactor proporcionan soporte mecánico y permiten la circulación

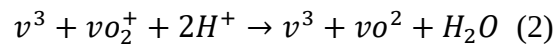
controlada de electrolitos. Finalmente, las placas bipolares establecen la conexión eléctrica entre celdas adyacentes y, en los extremos, funcionan como terminales del sistema (Mur, 2019).

Dentro de las diferentes configuraciones de baterías de flujo redox, una de las más utilizadas es la batería de flujo redox de vanadio. Esta tecnología se fundamenta en reacciones de óxido-reducción que involucran cuatro estados de oxidación del vanadio, dando lugar a los procesos electroquímicos característicos de este sistema (Pablo, 2022, pág. 3).

#### **Reacción de carga**



#### **Reacción de descarga**



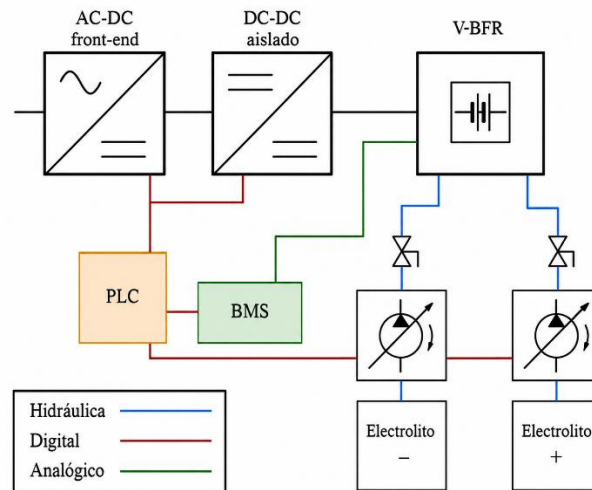
#### **2.3.1.2 Característica eléctrica**

La potencia que pueden suministrar estas baterías de flujo redox está directamente relacionada con el área de los electrodos y con la densidad de corriente que se obtiene a partir del intercambio iónico a través de la membrana (Pablo, 2022, pág. 5). En aplicaciones comerciales, es común alcanzar densidades de corriente en el rango de 80 a 100 mA/cm<sup>2</sup>.

Por otro lado, la capacidad de almacenamiento de este tipo de baterías depende principalmente del volumen de electrolito contenido en los tanques y de la concentración de las especies activas, como el vanadio. Una de las principales ventajas de esta tecnología radica en que la potencia y la capacidad son variables independientes, lo que permite dimensionarlas de manera separada según requerimientos del sistema.

Asimismo, las celdas presentan una característica de tensión en circuito abierto, cuyo valor está influenciado por la concentración del electrolito. En sistemas comerciales, este voltaje suele encontrarse dentro de un intervalo aproximado de 0,8 V a 1,8 V (Pablo, 2022, pág. 5).

**1 Figura:** *Arquitectura de integración de una BFR completa.*



**Fuente:** (Pablo, 2022)

### 2.3.2 Batería de Sodio y Azufre

Las baterías de sodio-Azufre (Na-S) son dispositivos electroquímicos recargables que almacenan energía mediante la reacción química entre el sodio y el azufre (Pablo N. , 2025). En este tipo de baterías, el sodio actúa como ánodo y el azufre como cátodo, permitiendo la generación y almacenamiento de energía eléctrica a través del movimiento de iones de sodio entre ambos electrodos (Chawla & Safa, 2019).

Tal como se menciona en (Chawla & Safa, 2019). Su funcionamiento se basa en procesos de oxidación y reducción. Durante la descarga, el sodio metálico se oxida liberando electrones y iones de sodio. Los electrones circulan por el circuito externo generando electricidad, mientras que los iones atraviesan electrolito hasta el cátodo, donde reaccionan con azufre formando polisulfuros de sodio. En el proceso de carga, estas reacciones químicas se invierten, permitiendo que la batería recupere la energía almacenada.

El azufre empleado como material presenta una elevada capacidad de descarga de aproximadamente  $1675 \text{ mAh g}^{-1}$ , valor que supera considerablemente a los sistemas convencionales de cátodos de inserción. Debido a esta alta capacidad energética, el azufre se ha convertido en una materia prometedora para el desarrollo de baterías de nueva generación. (Chawla & Safa, 2019).

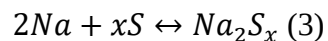
El principio de funcionamiento y la selección de materiales en las baterías Na-S son similares a los utilizados en las baterías de litio-azufre (Li-S). Generalmente, una celda Na-S está conformada por sodio metálico como ánodo, un compuesto de Azufre carbono como cátodo y un electrolito orgánico líquido (Pablo N. , 2025). Durante el proceso de descarga, el sodio metálico presente en el ánodo se oxida, generando iones de sodio y electrones. Los iones atraviesan el electrolito y el separador hasta llegar al cátodo, mientras que los electrones circulan a través del circuito externo produciendo energía eléctrica. En el cátodo, el azufre se reduce al aceptar los iones de sodio y los electrones, formando polisulfuros de sodio complejos (Chawla & Safa, 2019).

(Chawla & Safa, 2019) menciona que, durante el proceso de descarga, el sodio metálico presente en el ánodo se oxida, generando iones de sodio y electrones. Los iones atraviesan el electrolito y el separador hasta llegar al cátodo, mientras que los electrones circulares a través del circuito externo produciendo energía eléctrica. En el cátodo, el azufre se reduce al aceptar los iones de sodio y los electrones, formando polisulfuros de sodio complejos.

### **2.3.2.1 Características electroquímicas**

Las características electroquímicas de las baterías de Sodio – Azufre (Na-S) se caracterizan por presentar un comportamiento electroquímico complejo debido a la formación de diferentes especies intermedias durante los procesos de carga y descarga. Su funcionamiento se basa en reacciones redox entre el sodio metálico y el azufre, donde se generan polisulfuros de sodio como productos intermedios (Chawla & Safa, 2019).





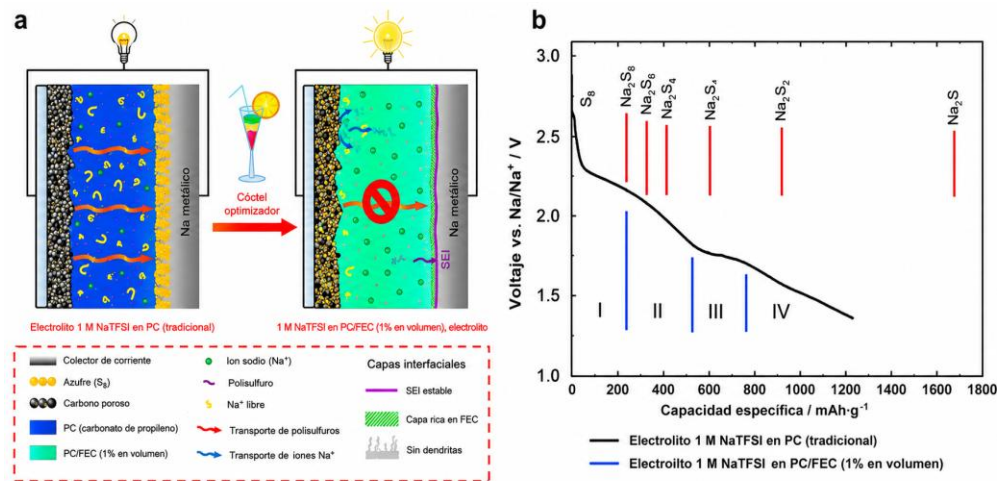
### 2.3.2.2 Características eléctricas

Las baterías de sodio – azufre (Na-S) presentan características eléctricas que determinan su comportamiento y desempeño en aplicaciones de almacenamiento de energía (Pablo N. , 2025). En cuanto al voltaje de operación, estas baterías trabajan típicamente en un rango aproximado de 1,0 V a 3,0 V, observándose durante la descarga valores característicos cercanos a 2,2 V y 1,65 V los cuales están asociados a las diferentes etapas de formación de poríferos de sodio (Chawla & Safa, 2019).

En relación con la capacidad eléctrica, estas baterías destacan por su alta capacidad específica, alcanzando valores teóricos de hasta 1675 mAh/g en el azufre, aunque en la práctica esta capacidad suele ser menor debido a pérdidas internas y limitaciones del sistema (Chawla & Safa, 2019). Así mismo, presentan una elevada densidad de energía, que generalmente se encuentra en el rango de 150 a 240 Wh/kg, lo que les hace adecuados para el almacenamiento de grandes cantidades de energía.

Por otro lado, la eficiencia eléctrica de las baterías Na-S es alta, situándose comúnmente entre 85% y el 90%, aunque puede verse afectada por fenómenos como la disolución y migración de polisulfuros (Chawla & Safa, 2019). Respecto a la potencia eléctrica, estas baterías son capaces de suministrar energía de manera eficiente durante periodos prolongados, aunque no son la más adecuadas para aplicaciones que requieren respuestas prolongados, aunque no son la más adecuadas para aplicaciones que requieren respuestas rápidas o altas demandas instantáneas de potencia (Chawla & Safa, 2019).

**2 Figura:** Esquema de batería RT-Na/s y etapas de reacción durante la descarga de batería



**Fuente:** (Chawla, 2019)

### 2.3.3 Batería de ion litio

Las baterías de litios según menciona (Benkhira, 2025) son dispositivos de almacenamiento de energía electroquímica y se clasifican en dos tipos: primarias y secundarias. Las baterías primarias son aquellas en las que la energía química se transforma en energía eléctrica de manera irreversible, lo que significa que no puede recargarse (Dorman, 2021, pág. 2). La comercialización de las baterías de litio comenzó en 1991 y, desde entonces su crecimiento en el mercado ha sido notable. Este incremento en su uso se debe, en gran medida, a la creciente demanda de vehículos híbridos y eléctricos, así como los avances tecnológicos que han favorecido su desarrollo y adopción (Auciello, 2021, pág. 18). El auge de las baterías de ion -litio se debe principalmente a sus ventajas, entre las que destacan su alta densidad de energía, su elevada eficiencia energética y larga vida útil. En cuanto a la eficiencia energética, aunque las baterías de plomo ácido, y las de ion litio presentan comportamientos similares, las baterías de litio sobresalen debido a su mejor rendimiento general y mayor adaptabilidad en distintas aplicaciones (Benkhira, 2025).

Como se menciona en (Auciello, 2021, pág. 19), esta es un dispositivo de almacenamiento de energía que funciona mediante reacciones electroquímicas en las que intervienen el litio. Su principio básico consiste en el movimiento de iones de litio entre dos electrodos (ánodo y cátodo) a través de un electrolito, lo que permite almacenar y liberar energía eléctrica. Este tipo de baterías, durante la descarga, los iones de litio se desplazan desde el ánodo hacia el cátodo, mientras que los electrones circulan por el circuito externo generando electricidad. En este proceso de carga, este flujo se invierte, permitiendo que la batería recupere energía (Auciello, 2021, pág. 19).

Las baterías están constituidas por cuatro componentes principales: el ánodo, el cátodo, el electrolito y el separador, cuyos materiales y propiedades influyen directamente en el rendimiento y comportamiento del sistema (Auciello, 2021, pág. 19). Las baterías de litio se clasifican en dos tipos: las primarias y las secundarias. En el caso de las primarias, el cátodo puede estar formado por distintos compuestos, como dióxido de azufre, cloruro de tionilo, cloruro de sulfurilo, óxido de bismuto, cloruro de cobre, óxido cúprico, dicloruro de cobre, sulfuro de cobre, dióxido de manganeso y sulfuro de níquel, entre otros. La combinación de estos materiales da lugar a diferentes tipos de baterías, tales como litio/dióxido de cobre (Li/Cuyo), litio/dióxido de manganeso, litio/dióxido de azufre y litio/cloruro de tionilo (Benkhira, 2025).

Por otra parte (González, 2024) hace mención que en las baterías de litio secundarias, el electrodo negativo generalmente está compuesto de carbono, mientras que el electrodo positivo puede estar fabricado a partir de diversos materiales, entre los que destacan el óxido de cobalto de litio, el óxido de manganeso de litio, el fosfato de hierro y litio, el óxido de litio – níquel – manganeso – cobalto, el óxido de litio – níquel – cobalto – aluminio y el titanato (titanio combinado con oxígeno) de litio (Auciello, 2021, pág. 20).

### **2.3.3.1 Características electroquímicas**

Las baterías de litio presentan un conjunto de características electroquímicas según menciona el autor (González, 2024), ya que determinan su desempeño y las hacen destacar frente a otras tecnologías de almacenamiento energético. Su funcionamiento se basa en reacciones de tipo reversible, donde los iones de litio se desplazan entre el ánodo y el cátodo a través del electrolito durante los procesos de carga y descarga. Este mecanismo permite un almacenamiento eficiente de energía y una alta estabilidad en múltiples ciclos de operación (Auciello, 2021, pág. 21).

Estas también presentan característica electroquímica en su capacidad específica, la cual depende directamente de los materiales empleados en los electrodos. En particular, los materiales catódicos como el óxido de cobalto de litio, el fosfato de hierro y litio y los óxidos mixtos de níquel, manganeso y cobalto influyen significativamente en la cantidad de carga que pueda almacenar la batería. Así mismo, presentan una elevada densidad de energía, lo que permite almacenar grandes cantidades de energía en volúmenes y masas relativamente reducidos (Auciello, 2021, pág. 22).

### **2.3.3.2 Características eléctricas**

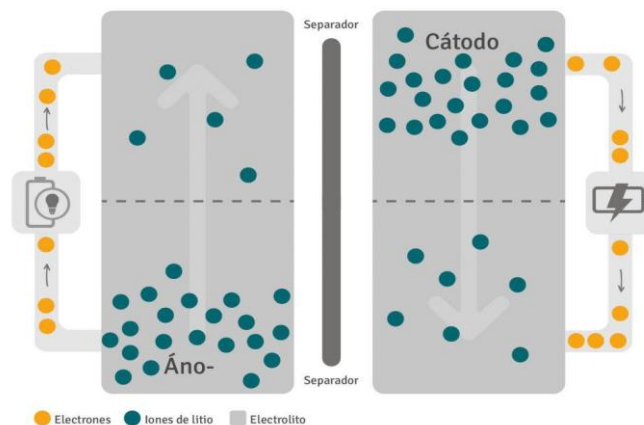
Las baterías de litio presentan características eléctricas que determinan su desempeño en distintas aplicaciones y condiciones de operación (González, 2024). En primer lugar, el voltaje de una celda depende del material del cátodo, situándose generalmente entre 3,2 V y 3,7V como valor nominal, y pudiendo alcanzar aproximadamente 4,2 V en estado de carga completa. Este nivel de voltaje relativamente alto permite reducir el número de celdas necesarias en muchas aplicaciones (Auciello, 2021, pág. 23).

En cuanto a la capacidad eléctrica, las baterías de litio ofrecen una elevada capacidad de almacenamiento de carga, la cual se expresa en amperio-hora (Ah) y depende directamente del tamaño de la celda y de los materiales empleados. Esta característica, junto con su alta densidad de energía,

permite almacenar grandes cantidades de energía en dispositivos compactos y ligeros (Auciello, 2021, pág. 23).

Estas baterías cuentan con una larga vida útil según menciona (Auciello, 2021, pág. 24), pudiendo soportar un alto número de ciclos de carga y descarga, siempre que se operen dentro de condiciones adecuadas de temperatura, voltaje y corriente. Estas características en conjunto hacen que las baterías de litio sean altamente eficientes y versátiles en aplicaciones modernas de almacenamiento energéticos (Auciello, 2021, pág. 23).

**3 figura:** Estructura interna de la batería



**Fuente:** (Vanesa, 2020)

#### 2.3.4 Batería de plomo -ácido

Las baterías de plomo ácido según menciona el autor (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005), son unos de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica más utilizados en el mundo. Fueron inventadas en 1859 por el físico francés Gastón Planté y constituyen la tecnología de baterías recargables más antigua que aún se emplea de forma masiva (Pavlov, 2017, pág. 4). Desde su invención en 1859, esta tecnología ha sido ampliamente empleada en aplicaciones automotrices, industriales, sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) y sistemas de generación fotovoltaica.

En los sistemas de energía renovable, las baterías de plomo ácido desempeñan una función fundamental al permitir el almacenamiento de la energía generada durante los períodos de producción para su utilización cuando la demanda energética lo requiera. Su capacidad de recarga y descarga repetitiva las convierte en una alternativa viable para aplicaciones estacionarias y de respaldo energético (Pavlov, 2017, pág. 12).

(Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005) también hace mención, que el funcionamiento de una batería puede analizarse a partir de dos modos de operación: Carga y descarga. El modo de funcionamiento depende del sentido de la corriente de la batería. Durante el proceso de carga, la corriente ingresa por el terminal positivo de la batería, provocando un incremento gradual del voltaje en sus terminales y de la energía almacenada. En cambio, en el proceso de descarga, la batería entrega energía a la carga y a la corriente sale por el terminal positivo, ocasionando una disminución progresiva del voltaje y de la carga almacenada (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005).

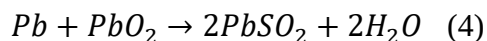
#### **2.3.4.1 Principios de funcionamiento**

El funcionamiento de una batería de plomo ácido se fundamenta en las leyes de la electroquímica establecidas por Michael Faraday, quien demostró que la cantidad de electricidad producida en una reacción electroquímica es proporcional a la cantidad de material que participa en dicha reacción. Cada celda está compuesta por una placa positiva de dióxido de plomo ( $PbO_2$ ), una placa negativa de plomo esponjoso (Pb) y un electrolito constituido por una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_2$ ) diluido en agua (Pavlov, 2017, pág. 33).

Durante el proceso de descarga, el ácido sulfúrico reacciona con ambas placas formando sulfato de plomo ( $PbSO_2$ ) y agua, liberando energía eléctrica hacia la carga conectada. Durante la carga, una

fuerza externa suministra energía eléctrica para revertir la reacción química, regenerando los materiales activos originales y restaurando la capacidad de almacenamiento de la batería (Pavlov, 2017, pág. 14).

La reacción global durante la descarga se expresa mediante la siguiente ecuación.



Una batería es un dispositivo electroquímico capaz de transformar energía química en energía eléctrica mediante reacciones que ocurren entre dos electrodos sumergidos en un electrolito. Estos electrodos poseen diferentes potenciales eléctricos, lo que genera una diferencia de potencial o voltaje entre ellos. Cuando ambos terminales se conectan a una carga externa, los electrones circulan a través del circuito, produciendo una corriente eléctrica capaz de realizar trabajo útil (Pavlov, 2017, pág. 34).

Una de las principales características de la batería de plomo ácido es la elevada diferencia de potencial existente entre sus electrodos, lo que permite obtener una tensión aproximada de 2 V por celda. Además, el dióxido de plomo posee una alta conductividad eléctrica, favoreciendo la participación efectiva del material activo en las reacciones electroquímicas y mejorando el rendimiento de la batería (Pavlov, 2017, pág. 34). Otro aspecto importante es la alta reversibilidad de las reacciones químicas que ocurren durante los ciclos de carga y descarga. Debido a que el dióxido de plomo y el sulfato de plomo presentan baja solubilidad en el electrolito, estos materiales permanecen adheridos a la superficie de las placas, conservando la estructura interna de las baterías y contribuyendo a una mayor vida útil (Pavlov, 2017, pág. 35).

Los potenciales eléctricos de los electrodos dependen de factores como la concentración del electrolito y la temperatura de operación. Estas variables influyen directamente en el voltaje disponible, la capacidad de almacenamiento y el comportamiento general de la batería durante su funcionamiento (Pavlov, 2017, pág. 35).

#### 2.3.4.2 Procesos de carga y descarga

Durante los procesos de carga y descarga de una batería de plomo ácido, en el electrodo positivo ocurre una reacción electroquímica en la que el sulfato de plomo ( $PbSO_2$ ) y el agua ( $H_2O$ ) se transforma en dióxido de plomo ( $PbO_2$ ), iones sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), protones ( $H^+$ ) y electrones ( $e^-$ ), estableciéndose un equilibrio entre las especies participantes (Pavlov, 2017, pág. 36).

El potencial de equilibrio de este electrodo puede determinarse mediante una expresión termodinámica que relaciona el potencial estándar del sistema con las actividades de los reactivos y productos involucrados (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005). Debido a que el dióxido de plomo ( $PbO_2$ ) y el sulfato de plomo ( $PbSO_2$ ) se encuentran en estado sólido, sus actividades se consideran iguales a la unidad. Por otra parte, la actividad de los iones hidrógenos puede expresarse en función del pH de la solución electrolítica (Pavlov, 2017, pág. 36).

El potencial estándar del sistema  $(PbO_2)/(PbSO_2)$  se obtiene a partir de las energías libres estándar de formación de los reactivos y productos que participan en la reacción. Para ello, se emplean los valores termodinámicos correspondientes y se aplica la relación entre la variación de energía libre de Gibbs y el potencial electroquímico estándar (Pavlov, 2017, pág. 37).

Al sustituir los valores de energía libre estándar de formación de cada especie química en la ecuación correspondiente, se obtiene un potencial estándar para el par electroquímico  $(PbO_2)/(PbSO_2)$  de aproximadamente 1.689 V (Pavlov, 2017, pág. 37). Este valor hace mención el autor (Pavlov, 2017, pág. 38) que representa la contribución del electrodo positivo al voltaje total de una batería de plomo ácido bajo condiciones estándar de operación  $\frac{(PbO_2)}{(PbSO_2)}$ .

#### 2.3.4.3 Proceso electroquímico

El autor (Pavlov, 2017, pág. 17) hace mención que Diversos estudios experimentales han demostrado que las zonas de gel presentes en las partículas de dióxido de plomo ( $PbO_2$ ) participan



activamente en el intercambio iónico en el electrolito. Durante este proceso, los iones sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) son absorbidos por dichas zonas, modificando el equilibrio existente entre las regiones de gel y las regiones cristalinas de la masa activa. La absorción de iones sulfato aumenta a medida que se incrementa la concentración del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). (Pavlov, 2017, pág. 18).

Cuando la densidad del electrolito supera aproximadamente  $1,29 \text{ g/cm}^3$ , una cantidad considerable de iones ( $SO_4^{2-}$ ) se incorpora a las zonas de gel, provocando una disminución de la conductividad electrónica y protónica de estas regiones. Como consecuencia, durante la descarga se favorece la formación inmediata de sulfato de plomo ( $PbSO_2$ ), lo que acelera la pasivación de la superficie del electrodo y limita su desempeño electroquímico (Pavlov, 2017, pág. 19).

Para conservar una elevada capacidad en las placas positivas, es necesario que la absorción de iones sulfato en las zonas de gel sea reducida. Bajo estas condiciones, la reducción electroquímica del ( $PbO_2$ ) ocurre mediante varias etapas intermedias. Inicialmente se forma hidróxido de plomo ( $Pb(OH)_2$ ) y agua; posteriormente, el hidróxido de plomo reacciona con ácido sulfúrico para producir sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ). (Pavlov, 2017, pág. 19).

Este mecanismo permite que una mayor cantidad de dióxido de plomo participe en las reacciones electroquímicas, incrementando así la capacidad del electrodo (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005). Por esta razón, se ha determinado que la densidad óptima del electrolito no debe exceder aproximadamente  $1,28 \text{ g/cm}^3$ . En estas condiciones, entre 20% y el 50% de la masa activa positiva, dependiendo de la corriente de descarga aplicada, puede contribuir efectivamente a la generación de capacidad.

Por otra parte, el dióxido de plomo obtenido mediante procesos químicos suele presentar una estructura predominante cristalina o con una cantidad muy reducida de zonas de gel. Debido a ello, su

actividad electroquímica es menor, lo que explica la baja específica observada en este tipo de electrodos (Pavlov, 2017, pág. 19).

**$PbO_2$ :** El dióxido de plomo ( $PbO_2$ ) es el material activo de la placa positiva de la batería de plomo ácido. Cuando la batería se descarga, este material reacciona con el ácido sulfúrico ( $H_2SO_2$ ) para producir energía eléctrica.

**Zonas de gel:** regiones más porosas e hidratadas.

**Zonas cristalinas:** regiones más compactas y ordenadas.

Las zonas del gel son importantes porque permiten que los iones del electrolito entren y reaccionen con mayor facilidad.

#### **2.3.4.4 Tipos de baterías de plomo-ácido**

Tras la segunda guerra mundial, la fabricación y utilización de baterías de plomo ácido experimentó un crecimiento significativo debido a la rápida expansión de sectores como la industria automotriz, el transporte y las telecomunicaciones (Pavlov, 2017, pág. 35). Asimismo, el incremento de la demanda de sistemas de respaldo energético y, posteriormente, el desarrollo de las tecnologías de la información impulsó aún más su aplicación. De acuerdo con su uso según menciona (Pavlov, 2017, pág. 36) que las baterías de plomo ácido pueden clasificarse en las siguientes categorías.

**Baterías SLI:** Diseñadas para proporcionar la energía necesaria para el arranque, la iluminación y los sistemas de encendido de vehículos automotores.

**Baterías estacionarias:** Empleadas principalmente como sistemas de alimentación de respaldo en instalaciones de telecomunicaciones, centros de distribución eléctrica, sistemas informáticos y otros equipos que requieren suministro continuo de energía.

**Baterías de tracción o fuerza motriz:** Se utilizan en aplicaciones industriales para suministrar energía a vehículos eléctricos destinados al transporte interno, como montacargas, vehículos eléctricos industriales y equipos empleados en la minería.

**Baterías de propósito especial:** Están diseñadas para aplicaciones específicas que requieren un alto grado de confiabilidad, entre las que se incluyen aeronaves, submarinos y equipos militares especializados.

**Baterías de almacenamiento de energías renovables:** Se emplean en sistemas de generación solar fotovoltaica, eólica e hidráulica, con el fin de almacenar la energía generada y utilizada posteriormente cuando las condiciones de producción no sean favorables.

En la actualidad, gran parte de la investigación y el desarrollo tecnológico se orientan hacia el diseño y optimización de baterías destinadas a vehículos híbridos y totalmente eléctricos.

Desde el punto de vista del mantenimiento, las baterías de plomo ácido se dividen en dos grupos principalmente (Pavlov, 2017, pág. 36).

**Baterías inundadas:** Contienen electrolitos líquidos y generalmente emplean aleaciones con alto contenido de antimonio (Sb) en las rejillas, por lo que requieren inspecciones y mantenimiento periódico.

**Baterías libres de mantenimiento:** fabricadas con aleaciones de plomo – calcio- estaño (Pb-Ca-Sn) o con bajo contenidos de antimonio, arsénico y estaño, reduciendo significativamente las pérdidas de agua y las necesidades de mantenimiento. Dentro de esta categoría se encuentra las baterías reguladas por válvulas (VRLA), las cuales utilizan rejillas de Pb-Sn-Ca y separadores de fibra de vidrio absorbente (AGM), ofreciendo mayor seguridad y confiabilidad operativa.

#### **2.3.4.5 Características.**

Según se menciona en (Pavlov, 2017, pág. 38), las baterías de plomo ácido han mantenido una amplia aceptación a nivel mundial debido a la combinación de sus ventajas técnicas, económicas y de fabricación. Su uso masivo no solo se debe a sus prestaciones eléctricas, sino también a su bajo costo de producción y la disponibilidad de los materiales necesarios para su fabricación.

Entre sus principales características de acuerdo con el autor (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005), se destaca que la capacidad de suministrar corrientes elevadas en cortos periodos de tiempo, lo que las convierte en una opción adecuada para aplicaciones que requieren altas demandas de potencia, como el arranque de vehículos y los sistemas de respaldo energético. Además, presentan una tecnología madura y confiable, respaldada por más de un siglo de desarrollo e implementación industrial.

Otra característica importante es la abundancia de las materias primas empleadas en su fabricación, especialmente el plomo, lo que permite una producción a gran escala (Pavlov, 2017, pág. 38). Asimismo, las baterías de plomo ácido poseen uno de los índices de reciclaje más altos entre los sistemas de almacenamiento electroquímico, ya que aproximadamente el 98% de su componente pueden recuperarse y reutilizarse. Este proceso se lleva a cabo mediante sistemas de reciclaje de circuito cerrado, donde las baterías agotadas son recolectadas, procesadas y transformadas nuevamente en materias primas para la fabricación de nuevas baterías. (Pavlov, 2017, pág. 39).

Estas baterías también presentan una baja tasa de autodescarga, permitiendo conservar la energía almacenada durante periodos prolongados cuando no están en uso. Esta característica resulta especialmente útil en aplicaciones de respaldo y almacenamiento energético.

Sin embargo, una de sus principales limitaciones es la elevada masa atómica del plomo, lo que incrementa considerablemente el peso total de la batería. Como consecuencia, la densidad energética y

la potencia específica son inferiores en comparación con otras tecnologías de almacenamiento más modernos (Pavlov, 2017, pág. 39).

A pesar de esta desventaja, las baterías de plomo ácido continúan siendo una de las tecnologías de almacenamiento de energía más utilizadas a nivel mundial, con una producción anual de cientos de millones de unidades destinadas a diversos sectores industriales, comerciales y de transporte (Pavlov, 2017, pág. 40).

#### **2.3.4.6 Compuestos químicos presentes en la estructura de la batería de plomo-ácido**

Antes de analizar las reacciones electroquímicas que ocurren en la batería de plomo ácido, es importante conocer los compuestos químicos que participan en la fabricación de las placas y en los procesos de carga y descarga. Estos materiales influyen directamente en el rendimiento, la capacidad y la vida útil de la batería (Pavlov, 2017, pág. 56).

##### **2.3.4.6.1 Óxido de plomo ( $PbO$ ).**

El óxido de plomo es una de las materias primas fundamentales utilizadas en la fabricación de las baterías de plomo ácido (Pavlov, 2017, pág. 58). Este compuesto puede presentarse en dos estructuras cristalinas diferentes: una forma tetragonal ( $\beta$ - $PbO$ ) y otra ortorrómbica ( $\alpha$ - $PbO$ ), cada una con propiedades físicas y químicas particulares. Cuando entra en contacto con agua, el óxido de plomo hidrata y forma hidróxido de plomo, un compuesto de comportamiento anfótero capaz de reaccionar tanto con ácidos como bases. Industrialmente, el  $PbO$  se obtiene mediante la oxidación parcial del plomo metálico.

El producto comercial resultante contiene generalmente entre un 73% y un 85% de  $PbO$ , mientras que el porcentaje restante corresponde a plomo sin oxidar.

Su principal aplicación en la industria de acumuladores consiste en la elaboración de las pastas que posteriormente se utilizan para fabricar las placas positivas y negativas de la batería (Pavlov, 2017, pág. 59).

#### **2.3.4.6.2 Sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ).**

El sulfato de plomo es uno de los compuestos más importantes del funcionamiento electroquímico de la batería (HIOKI E.E. Corporation, 2020, pág. 9). A temperatura ambiente presenta una estructura cristalina ortorrómbica, mientras que a temperatura elevadas adopta una estructura cúbica. Este compuesto posee una baja solubilidad en el agua y se forma naturalmente durante los procesos de descarga y autodescarga de las placas positivas y negativas. Durante la descarga, tanto el plomo esponjoso de la placa negativa como el dióxido de plomo de la placa positiva se transforman progresivamente en sulfato de plomo (HIOKI E.E. Corporation, 2020, pág. 10).

Además, el ( $PbSO_4$ ) puede reaccionar con el óxido de plomo para producir diferentes sulfatos básicos de plomo, los cuales desempeñan un papel importante en la fabricación de la masa activa de las placas.

#### **2.3.4.6.3 Sulfato de plomo monobásico (1BS)**

El sulfato de plomo monobásico, representado por la formula ( $PbO - PbSO_4$ ) es un compuesto cristalino que se caracteriza por presentar cristales alargados y delgados. Se forma principalmente durante la preparación de la pasta cuando el óxido de plomo se mezcla con ácido sulfúrico en condiciones específicas de concentración. También puede generarse durante el tratamiento previo de las placas antes del proceso de formación electroquímica (HIOKI E.E. Corporation, 2020, pág. 13).

Aunque su solubilidad en el agua es reducida, presenta una mayor capacidad de disolución en soluciones diluidas de ácido sulfúrico. Este compuesto participa en la evolución estructural de la masa activa de las placas (Pavlov, 2017, pág. 39).

#### **2.3.4.6.4 Sulfato de plomo tribásico (3BS)**

El sulfato de plomo tribásico, de acuerdo con el autor (Pavlov, 2017, pág. 56) su fórmula ( **$3PbOxPbSO_4xH_4O$** ), constituye uno de los componentes más comunes de las pastas utilizadas en la fabricación de baterías de plomo ácido. Este compuesto se forma cuando el óxido de plomo se mezcla con soluciones diluidas de ácido sulfúrico a temperaturas relativamente bajas. Su presencia influye significativamente en la estructura final del material activo y, por lo tanto, en el comportamiento electroquímico de la batería. (Pavlov, 2017, pág. 60).

Las propiedades físicas y la distribución de los cristales de 3BS afectan directamente la capacidad, la eficiencia y la durabilidad de los electrodos.

#### **2.3.4.6.5 Sulfato de plomo tetra básico (4BS)**

El sulfato de plomo tetra básico menciona el autor (HIOKI E.E. Corporation, 2020, pág. 14) que está representado por la formula ( **$4PbOxPbSO_4$** ), esta se forma durante la preparación de las pastas a temperatura elevadas o durante el proceso de curado en presencia de vapor de agua. Este compuesto se caracteriza por desarrollar cristales prismáticos de mayor tamaño que los del sulfato tribásico. Su importancia radica en que favorece la formación de una estructura más estable y resistente en la masa activa (HIOKI E.E. Corporation, 2020, pág. 15).

Las placas fabricadas a partir de materiales con alto contenido de 4BS suelen presentar una mayor resistencia mecánica y una vida útil más prolongada, especialmente en aplicaciones que requieren numerosos ciclos de carga y descarga.

#### 2.3.4.6.6 Dióxido de plomo ( $PbO_2$ )

El dióxido de plomo constituye el material activo principal de la placa positiva de la batería. Puede presentarse en dos formas cristalinas, denominadas  $\alpha$  - ( $PbO_2$  y  $\beta$  -  $PbO_2$ ).

Este compuesto posee una elevada conductividad eléctrica y actúa como un fuerte agente oxidante, características que lo convierten en un material fundamental para el almacenamiento y liberación de energía eléctrica (Pavlov, 2017, pág. 59).

Durante la descarga, el dióxido de plomo se reduce progresivamente hasta transformarse en sulfato de plomo. Debido a su participación directa en las reacciones electroquímicas, la estructura y composición del ( $PbO_2$ ) influyen considerablemente en la capacidad y el rendimiento de la batería (Pavlov, 2017, pág. 59).

#### 2.3.4.6.7 Plomo rojo o minio ( $Pb_3O_4$ )

El plomo rojo, también conocido como minio, es un óxido mixto formado por la combinación de óxido de plomo y dióxido de plomo. Este compuesto presenta una estructura cristalina similar a la de ciertos óxidos metálicos utilizados en materiales magnéticos. Su principal aplicación en la industria de las baterías consiste en mejorar las propiedades de las pastas utilizadas para la fabricación de las placas. Al reaccionar con ácido sulfúrico, el minio genera sulfato de plomo y dióxido de plomo, compuesto esenciales para la formación de la masa activa.

Debido a sus características químicas y electroquímicas, entre el 70% y el 75% de la producción mundial de plomo rojo se destina a la fabricación de baterías de plomo ácido (Pavlov, 2017, pág. 56).



**Tabla 1:** Principales compuestos químicos presentes en las baterías de plomo ácido

| Compuesto                     | Fórmula química                        | Función principal                                                                | Aplicación dentro de la batería                                                                        |
|-------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Óxido de plomo                | $PbO$                                  | Materia prima para la elaboración de las pastas de las placas.                   | Fabricación de las masas activas y positivas negativas.                                                |
| Sulfato de plomo              | $PbSO_4$                               | Producto generado durante la descarga de la batería.                             | Se forma sobre las placas positivas y negativas durante la descarga y se reconvierte durante la carga. |
| Sulfato de plomo monobásico   | $PbO \times PbSO_4 (1BS)$              | Compuesto intermedio en la preparación de las pastas.                            | Participa en la formación y desarrollo de la estructura de las placas.                                 |
| Sulfato de plomo tribásico    | $3PbO \times PbSO_4 \times H_2O (3BS)$ | Favorece la formación de una masa activa con buenas propiedades electroquímicas. | Componente principal de las pastas preparadas a temperaturas moderadas.                                |
| Sulfato de plomo tetra básico | $4PbO \times PbSO_4 (4BS)$             | Proporciona mayor estabilidad                                                    | Componente principal de las pastas preparadas                                                          |

|                           |                             |                                                                              |                                                                              |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                           |                             | estructural y durabilidad.                                                   | a temperaturas moderadas.                                                    |
| <b>Dióxido de plomo</b>   | <b><math>Pb_2</math></b>    | Material activo de la placa positiva y agente oxidante.                      | Utilizado en placas destinadas de larga vida útil y alto ciclado.            |
| <b>Plomo esponjoso</b>    | <b><math>Pb</math></b>      | Material activo de la placa negativa                                         | Participa directamente en las reacciones electroquímicas de carga y descarga |
| <b>Plomo rojo o minio</b> | <b><math>Pb_3O_4</math></b> | Mejorar las propiedades de las pastas y acelera la formación de las placas.  | Se oxida durante la descarga y se regenera durante la carga.                 |
| <b>Ácido sulfúrico</b>    | <b><math>H_2SO_4</math></b> | Electrolito encargado del transporte iónico.                                 | Fabricación de placas positivas.                                             |
| <b>Agua</b>               | <b><math>H_2O</math></b>    | Componente del electrolito y participante en las reacciones electroquímicas. | Medio conductor entre las placas positivas y negativas.                      |

*Nota: elaboración propia a partir de la literatura especializada sobre las baterías de plomo ácido*

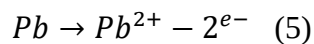
### **2.3.4.7 Fundamentos electroquímicos de los procesos de carga y descarga en las baterías de plomo – ácido.**

#### **2.3.4.7.1 Fundamentos de descarga de la batería de plomo – ácido.**

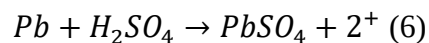
Cuando una batería de plomo-ácido opera en modo de descarga, suministra energía a la carga; durante este proceso, la corriente sale por el terminal positivo, lo que provoca una disminución del voltaje en sus terminales y de la carga almacenada (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005). Durante la descarga, ocurren simultáneamente reacciones en el electrodo negativo y en el electrodo positivo, acompañadas por el movimiento de electrones y en electrodo positivo, acompañadas por el movimiento de electrones a través del circuito externo y el transporte de iones en el interior del electrolito. (Pavlov, 2017, pág. 113).

#### **2.3.4.7.2 Proceso electroquímico en el electrodo negativo.**

Durante la descarga el autor (Pavlov, 2017, pág. 113) menciona que, el electrodo negativo, constituido principalmente por plomo esponjoso (Pb), experimentan un proceso de oxidación. En esta reacción, los átomos de plomo liberan electrones y se transforman en iones de plomo ( $Pb^{2+}$ ).

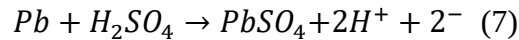


Los iones  $Pb^{2+}$  formados se desplazan hacia la capa de electrolito que rodea la superficie del electrodo y reaccionan con el ácido sulfúrico, dando lugar a la formación de sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ):



Como resultado de estas reacciones, se generan electrones y iones hidrógeno ( $H^+$ ). Los electrones se desplazan a través del circuito eléctrico externo hacia el electrodo positivo, suministrando energía a la carga conectada. Por otra parte, los iones  $H^+$  migran a través del electrolito en dirección al electrodo positivo. (Pavlov, 2017, pág. 114).

Estas expresiones pueden expresarse de la siguiente manera.



Inicialmente, el sulfato de plomo se forma como pequeños núcleos sobre la superficie de plomo; posteriormente, estos núcleos crecen hasta convertirse en cristales de mayor tamaño que cubren progresivamente la superficie activa del electrodo.

#### **2.3.4.7.3 Proceso electroquímico en el electrodo positivo**

El electrodo positivo está constituido por dióxido de plomo ( $PbO_2$ ), las partículas superficiales que se encuentran en contacto con el electrolito sufren una hidratación parcial (Pavlov, 2017, pág. 114). La estructura del dióxido de plomo está formada por regiones cristalinas y zonas hidratadas, siendo estas últimas las principales responsables del desarrollo de las reacciones electroquímicas.

El autor (Pavlov, 2017, pág. 114) hace mención que los electrones procedentes del electrodo negativo llegan al electrodo positivo a través del circuito externo y participan en la reducción del ( $PbO_2$ ).

Simultáneamente, los iones  $H^+$  que, migran por el electrolito intervienen en la reacción y finalmente se produce la formación de agua y sulfato de plomo.

De esta manera, el flujo de electrones por el circuito externo y el movimiento de los iones en el electrolito permiten cerrar el circuito eléctrico de la celda y mantener el suministro de energía hacia la carga conectada (Pavlov, 2017, pág. 116).

#### **2.3.4.7.4 Evolución de la descarga y disminución del voltaje**

A medida que avanza la descarga y los cristales de sulfato de plomo formados en ambos electrodos aumentan progresivamente de tamaño. Este crecimiento reduce la superficie activa disponible para las reacciones electroquímicas y, en consecuencia, disminuye la velocidad de las reacciones de oxidación y reducción. (Olade, Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe, 2025, pág. 40).

Las masas activas de los electrodos presentan una estructura porosa formada por macro y microporos que facilitan el transporte de ácido sulfúrico y agua. Sin embargo, la acumulación de sulfato de plomo dentro de estos poros reduce su diámetro e incluso puede obstruirlos por completo. Como consecuencias, ciertas regiones de las placas dejan de participar en las reacciones electroquímicas, reduciendo gradualmente la capacidad disponible de la batería (Olade, Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe, 2025, pág. 41).

Durante la descarga, la batería va consumiendo poco a poco el ácido sulfúrico, lo que provoca que aumente la proporción de agua dentro del electrolito. Esta reducción en la concentración de ácido sulfúrico hace que se haya menos iones disponibles para el transporte de carga eléctrica, lo que a su vez incrementa la resistencia interna del sistema (Pavlov, 2017, pág. 115).

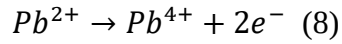
#### **2.3.4.7.5 Mecanismo electroquímico durante el proceso de carga de la batería de plomo – ácido.**

Durante el proceso de carga el autor (Pavlov, 2017, pág. 120) menciona que la batería recibe energía eléctrica desde una fuente externa, provocando que las reacciones electroquímicas ocurran en sentido inverso a las desarrolladas durante la descarga. Como resultado, el sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ), depositado sobre las placas se transforman nuevamente en plomo esponjoso (Pb) y dióxido de plomo ( $PbO_2$ ), mientras que la concentración de ácido sulfúrico en el electrolito se restablece progresivamente (Olade, Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe, 2025, pág. 38).

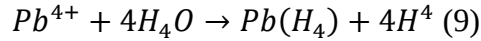
#### **2.3.4.7.6 Regeneración del material activo en la placa positiva**

En el electrodo positivo, el sulfato de plomo presente sobre la superficie de la placa se convierte gradualmente en dióxido de plomo mediante una serie de reacciones intermedias. Inicialmente, el ( $PbSO_4$ ), se disuelve parcialmente, liberando iones  $Pb^{2+}$  y sulfato al electrolito.

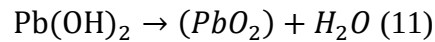
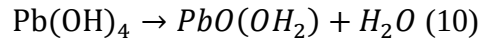
Los iones de plomo liberados experimentan posteriormente un proceso de oxidación, transformándose en especies de mayor estado de oxidación (Pavlov, 2017, pág. 117).



Debido a que los iones  $Pb^{4+}$  son inestables en soluciones acuosas, reaccionan rápidamente con el agua para producir hidróxido de plomo:

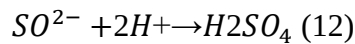


El hidróxido de plomo formado experimenta posteriormente una deshidratación parcial y luego completa, dando lugar a la formación de dióxido de plomo:



Como consecuencias de estas transformaciones, el material activo de la placa positiva se regenera progresivamente, recuperando las propiedades electroquímicas necesarias para almacenar energía (Pavlov, 2017, pág. 118).

El autor (Pavlov, 2017, pág. 118), también hace mención que los iones de sulfato que permanecen en el electrolito reaccionan con los iones hidrógeno presentes en la solución, regenerando el ácido sulfúrico:



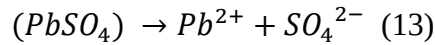
Este proceso contribuye al incremento de la concentración del electrolito y constituye una de las características más importantes de la etapa de carga.

### **Regeneración del material activo en la placa negativa.**

Durante el proceso de carga, el sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ), depositado sobre la placa negativa se transforma nuevamente en plomo metálico (Pb). Este proceso ocurre mediante las siguientes etapas (Pavlov, 2017, pág. 119).

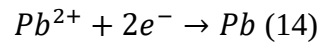
### **Disolución parcial del sulfato de plomo**

el sulfato de plomo presente en la superficie del electrodo se disuelve parcialmente en el electrolito, liberando iones plomo y sulfato:



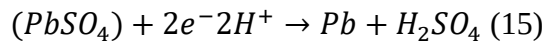
### **Reducción de los iones de plomo**

Los electrodos suministrados por la fuente de alimentación externa llegan al electrodo negativo y reduce los iones de plomo, produciendo nuevamente plomo metálico:



### **Regeneración global en la placa negativa durante la carga.**

La reacción global que describe la recuperación del material activo en la placa negativa puede expresarse como:



Esta reacción representa la conversión del sulfato de plomo nuevamente en plomo metálico y la regeneración simultanea del ácido sulfúrico, permitiendo que la placa negativa recupere su capacidad para participar en un nuevo ciclo de descarga (Pavlov, 2017, pág. 118).

### **Recuperación de la capacidad de la batería**

A medida que avanza el proceso de carga, el sulfato de plomo acumulado en ambas placas se consume progresivamente, mientras se regeneran los materiales activos originales, es decir, el plomo esponjoso en la placa negativa y el dióxido de plomo en la placa positiva. Paralelamente, la concentración de ácido sulfúrico aumenta debido a la recombinación de los iones sulfato e hidrógeno presentes en el electrolito (Olade, Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe, 2025, pág. 39).

En consecuencia, la batería recupera gradualmente su capacidad de almacenamiento de energía y retorna a un estado en el que pueda suministrar nuevamente energía eléctrica durante un siguiente ciclo de descarga (Olade, Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe, 2025, pág. 39).

## 2.4 Ejercicios aplicativos

### 1. Determinación del tiempo de descarga de una batería.

Se dispone de una batería de plomo-ácido de 12 V y 100 Ah que alimenta una carga constante de 5 A. Se desea determinar el tiempo de descarga teórico y el tiempo real considerando una eficiencia del sistema del 85%.

Tiempo teórico de descarga:  $t = \frac{C}{I}$  (16)

C corriente capacidad = 100 Ah

I corriente de la carga = 5 Ah

Resolución del problema.

$$t = \frac{100}{5} = 20h$$

El tiempo real considerando la eficiencia de la batería.

$$t_{real} = t * n = 20 * 0.85 = 17h$$

### 2. Estado de carga de la batería.

Una batería de 80 Ah ha entregado 30 Ah durante su operación. Determinar su estado de carga

SOC = carga disponible de la batería.

Resolución

$$SOC = \frac{C_{restantes}}{C_{nominal}} * 100$$



$$SOC = \frac{80-30}{80} * 100 = 62.5\%$$

### 3. Cálculo de energía entregada por la batería

Una batería de 12 V a 60 Ah opera al 50% de su capacidad.

Capacidad utilizada:

$$Ah \text{ utilizados} = 60 \times 0.5 = 30 \text{ Ah}$$

Energía entregada:

$$E = V * Ah = 12 \times 30 = 360 \text{ Wh}$$

Conversión

$$E = 0.36 \text{ Kwh}$$

### 4. Eficiencia energética de la batería

Una batería suministra 600 Wh, mientras que para su carga se requieren 750 Wh.

Desarrollo:

$$n = \frac{E \text{ salida}}{E \text{ entrada}} \times 100 \quad (17)$$

$$n = \frac{600}{750} \times 100 = 80\%$$

## **Capítulo III. Diseño de proyecto**

### **3.1 Metodología**

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en la medición y el análisis de variables relacionadas con el comportamiento electroquímico y eléctrico de las baterías de plomo ácido. Este enfoque permitió estudiar y evaluar parámetros como el voltaje, la corriente, la capacidad de almacenamiento, la densidad del electrolito, el estado de carga y la eficiencia energética de la batería mediante datos numéricos y procedimiento de análisis.

La metodología cuantitativa se basó en la recuperación, organización e interpretación de información proveniente de fuentes bibliográficas especializadas, artículos científicos y libros relacionados con las baterías de plomo ácido. Asimismo, se consideró el análisis de las reacciones electroquímicas que ocurren durante los procesos de carga y descarga, así como el estudio de los materiales y compuestos químicos que intervienen en su fabricación y funcionamiento (Cervantes, 2024).

La investigación se llevó a cabo utilizando un método descriptivo y analítico, ya que permitió identificar y describir las características constructivas y operativas de las baterías de plomo-ácido, además de analizar los procesos electroquímicos que intervienen en su funcionamiento. La información fue examinada mediante el estudio de ecuaciones, formulaciones electroquímicas, tablas comparativas y la relación entre las diferentes variables consideradas, lo que contribuyó a comprender de manera más clara el comportamiento de este sistema de almacenamiento de energía.

### **3.2 Descripción del módulo de bloque de batería de plomo Lab-Volt Series 8802-12**

El sistema de almacenamiento de energía empleado en la presente investigación corresponde a un banco de baterías de plomo ácido, modelo 8802-10, integrado en un módulo didáctico EMS de media

unidad. Este módulo está conformado por cuatro baterías de plomo ácido de 12 V conectadas en serie, proporcionando una tensión continua nominal de 48 V.

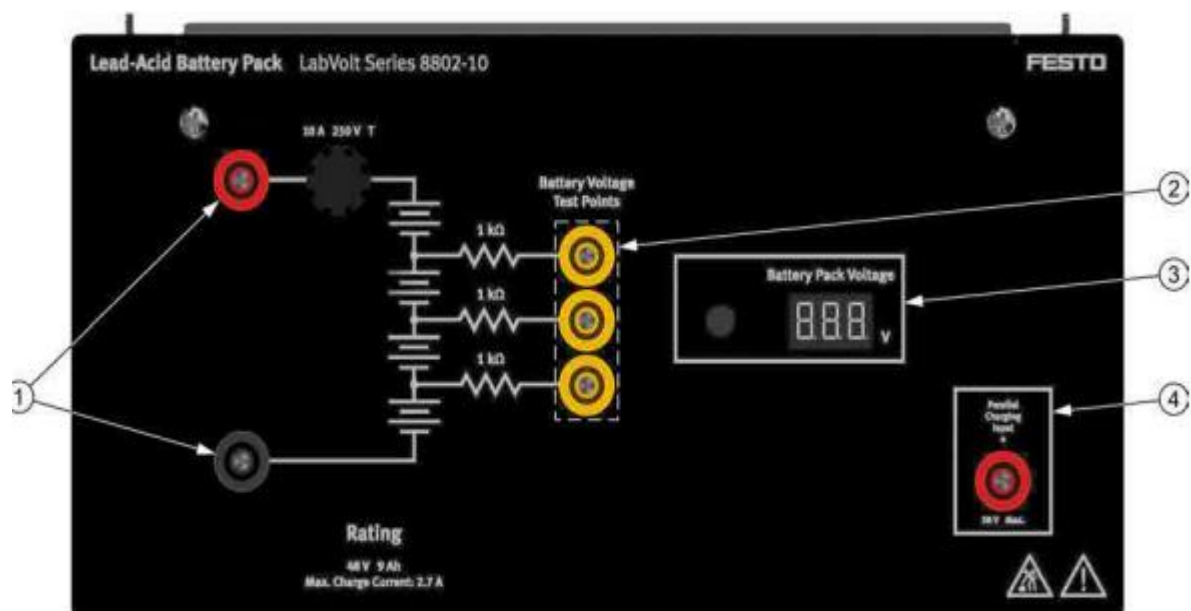
La tensión de salida del banco de baterías se encuentra disponible mediante dos terminales de seguridad codificados por colores ubicados en el panel frontal del módulo. Asimismo, el sistema dispone de tres puntos de prueba de voltaje, los cuales permiten medir individualmente la tensión suministrada por cada una de las cuatro baterías que conforman el banco (Festo, Electricity and New Energy, 2024).

Adicionalmente, el módulo incorpora un terminal de carga en paralelo, diseñado para posibilitar la recarga simultánea de varios bancos de baterías de plomo ácido conectados en paralelo. Esta característica facilita la realización de prácticas de carga y almacenamiento de energía en aplicaciones experimentales y de laboratorio (Festo, Electricity and New Energy, 2024)

El equipo cuenta también con un voltímetro integrado, encargado de medir y visualizar el voltaje total del banco de baterías. La información proporcionada por este instrumento permite realizar una estimación aproximada del estado de carga (State of Charge, SOC) del sistema de almacenamiento, considerando que una disminución del voltaje medido generalmente indica una reducción en el nivel de carga disponible.

Para garantizar la seguridad operativa, el banco de baterías dispone de un sistema de protección electrónica contra sobre corrientes y cortocircuito, mediante fusibles electrónicos con restablecimiento automático. Gracias a estas características, el módulo puede emplearse tanto como una fuente de alimentación de corriente continua de 48 V como en aplicaciones de producción, almacenamiento y gestión de energía eléctrica desarrolladas en entornos de formación e investigación (Festo, Electricity and New Energy, 2024).

**4 Figura:** Banco de baterías de plomo – ácido Modelo 8802-12 y sus principales elementos de conexión y medición.



**Fuente:** batería Plomo ácido modelo 8802-12. Tomado de <https://n9.cl/z4vl4>, por Festo 2024.

### 3.1 Selección de instrumentos y equipos

#### 3.1.1 Banco de baterías de plomo – ácido 8802 – 12.

El banco de baterías de plomo – ácido Modelo 8802 – 12 según se menciona en (Festo, Electricity and New Energy, 2024) está constituido por 4 apartados muy importante lo cual se visualizan en la figura 4. En esta sección 3.3.1 se describen sus principales características técnicas y constructivas,

así como los elementos que lo conforman y su funcionamiento dentro del sistema de almacenamiento de energía implementado en la investigación.

### **3.1.2 Controles, conectores e indicadores del banco de batería.**

#### **3.1.2.1 Terminales del banco de batería de plomo ácido.**

El módulo dispone de dos terminales de seguridad identificados por colores, los cuales permiten realizar la conexión del paquete de baterías de plomo ácido con los diferentes circuitos de trabajo y prueba.

#### **3.1.2.2 Terminales de puntos de pruebas de voltaje de la batería de plomo ácido.**

El equipo está diseñado con una incorporación de tres terminales de seguridad destinados exclusivamente a la medición del voltaje suministrado por cada una de las cuatro baterías de 12 V que conforma el paquete de batería. Estos puntos de prueba se emplean únicamente para efectuar para otros circuitos, ya que esto podría ocasionar daños a las baterías.

#### **3.1.2.3 Voltímetro**

El módulo cuenta con un voltímetro integrado que permite medir y visualizar el voltaje total del paquete de baterías de plomo ácido. El valor de tensión obtenido proporciona una estimación aproximada del estado de carga del sistema; en general, una disminución del voltaje indica un menor nivel de carga de las baterías.

#### **3.1.2.4 Terminal de entrada**

Este terminal está diseñado para realizar la carga simultánea de varios paquetes de baterías de plomo ácido conectados en paralelo. Para ello, se utiliza el Dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, modelo 8960, lo que permite efectuar procesos de carga de manera eficiente y controlada.

### **3.1.3 Características**

Como nos menciona (Festo, Electricity and New Energy, 2024), el bloque de baterías de plomo-ácido (8802-12), está diseñado para proporcionar una fuente de energía de corriente continua de 48 V, y facilitar el desarrollo de prácticas relacionadas con sistemas de almacenamiento electroquímico. En la Tabla 3 se presentan sus principales características eléctricas, de protección y físicas, las cuales permiten conocer las capacidades y limitaciones operativas del equipo.

**Tabla 2:** Especificaciones técnicas del paquete de baterías de plomo-ácido, Modelo 8802-12

| Banco de baterías                                                                  | Modelo 8802-12                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Tipo</b>                                                                        | 4 baterías de plomo-ácido reguladas por válvula (VRLA)             |
| <b>Voltaje nominal</b>                                                             | 48 V (12 V por cada batería)                                       |
| <b>Capacidad</b>                                                                   | 9 Ah                                                               |
| <b>Corriente máxima de carga</b>                                                   | 2,7 A                                                              |
| <b>Corriente máxima de descarga</b>                                                | 7 A                                                                |
| <b>Entrada de carga en paralelo</b>                                                | 58 V máxima                                                        |
| <b>Fusibles de protección con restablecimiento automático</b><br>Banco de baterías | 7 A (corriente de mantenimiento) 14 A (corriente de disparo).      |
| Punto de prueba (3)                                                                | 0,2 Ah (corriente de mantenimiento)<br>0.4 (corriente de disparo). |
| <b>Características físicas</b><br><b>Dimensiones (Al*An*P)</b>                     |                                                                    |

|             |                                                               |
|-------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Peso</b> | 154*287*410 mm (6,1*11,3*16,1 pulgadas).<br>13,8 Kg (30,4 lb) |
|-------------|---------------------------------------------------------------|

**Fuente:** *Elaborado a partir de las especificaciones técnicas del banco de baterías de plomo-ácido, modelo (8802-12).*

### **3.1.4 Módulo Dinamómetro/fuente de alimentación de 4 cuadrante.**

El dinamómetro/ fuente de alimentación de cuatro cuadrante es un equipo didáctico e instrumental que dispone de un puerto de comunicación USB y está diseñado para la realización de diversas aplicaciones y estudios relacionados con los sistemas de energía eléctrica (Festo, Electricity and New Energy, 2024). Este módulo puede operar bajo dos modalidades de funcionamiento: como dinamómetro y como fuente de alimentación, permitiendo la ejecución de ensayos y mediciones en máquinas eléctricas y sistemas de generación de energía renovable.

En el modo de operación como dinamómetro, el equipo puede configurarse para actuar como una carga mecánica, ejerciendo un efecto de frenado sobre la máquina en estudio, como un motor primario capaz de suministrar potencia mecánica de manera controlada (Festo, Electricity and New Energy, 2024). Por otra parte, cuando opera en modo fuente de alimentación, el módulo se comporta como una fuente de alimentación, el módulo se comporta como una fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, capaz de reproducir las características de diferentes fuentes de energías renovables, tales como sistemas fotovoltaicos y sistemas generación eólica, lo que facilita el análisis experimental de procesos de conversión, almacenamiento y gestión de energía (Festo, Electricity and New Energy, 2024).

En la presente investigación, el dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrante se empleó como fuente de alimentación controlada para el proceso de carga del banco de baterías de plomo – ácido, permitiendo suministrar los niveles de tensión y corriente requeridos para el desarrollo de las

pruebas experimentales y el análisis del comportamiento electroquímico del sistema de almacenamiento de energía. (Festo, Electricity and New Energy, 2024).

**5 figura:** *Modulo Dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes.*



**Fuente:** Modulo Dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes. Tomado de <https://n9.cl/z4vl4>, por Festo 2024.

### **3.1.5 Alternador/controlador de aerogenerador LabVolt Series 8216 – 02.**

El Alternador / controlador serie 8216 – 02, es un módulo didáctico diseñado para el estudio de sistemas de generación eólica a pequeña escala (Festo, Electricity and New Energy, 2024). El equipo está constituido principalmente por un generador eléctrico y con controlador electrónico, ambos basados en la configuración de una turbina eólica real y montados en un módulo de entrenamiento EMS de tamaño completo.

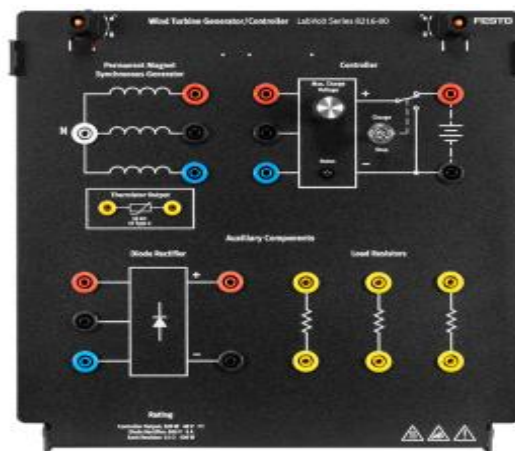
Adicionalmente, el módulo incorpora componentes auxiliares, entre los que se incluyen un rectificador trifásico de diodos y un conjunto de resistencias de potencia, los cuales permiten aplicar diferentes niveles de carga eléctrica al generador y evaluar su comportamiento bajo diversas condiciones de operación. El acceso a los distintos elementos del módulo se realiza mediante terminales



de seguridad tipo banana de 4 mm, codificados por colores y ubicados en el panel frontal, facilitando la conexión a los devanados del generador, las entradas y salidas del controlador, el rectificador y las resistencias de carga (Festo, Electricity and New Energy, 2024).

En la presente investigación, el Alternador/controlador de aerogenerador se empleó como fuente de generación renovable para suministrar energía al banco de baterías de plomo ácido, permitiendo analizar el comportamiento del sistema de almacenamiento bajo condiciones de carga provenientes de una fuente eólica emulada.

**6 figura:** *Modulo Alternador/controlador de aerogenerador LabVolt Series 8216 – 02*



**Fuente:** Alternador/controlador de aerogenerador La-Volt Series 8216–02

<https://n9.cl/z88rj9>, por Festo.

### **3.1.6 Módulo fuente de alimentación.**

El módulo de fuente de alimentación La-Volt 8821-22, es un equipo diseñado para suministrar energía eléctrica tanto en corriente alterna (AC) como en corriente continua (DC) (Festo, Electricity and New Energy, 2024). El módulo permite proporcionar un voltaje trifásico regulable o fijo dentro de un rango de 0 a 120/208 V AC, con una corriente nominal de 15 A, además de disponer de salidas en corriente continua para aplicaciones experimentales y de laboratorio.

Este módulo constituye un elemento fundamental dentro del sistema experimental implementando, ya que proporciona la energía necesaria para la alimentación de diversos equipos y módulos utilizados en las prácticas de conversión, generación y almacenamiento de energía eléctrica. Sus características de regulación y control permiten establecer las condiciones de operación requeridas para el desarrollo de ensayos relacionados con el comportamiento eléctrico y electroquímico de las baterías de plomo-ácido (Festo, Electricity and New Energy, 2024).

En la presente investigación, la fuente de alimentación variable se empleó como equipo de suministro energético para la realización de las pruebas experimentales asociadas al banco de baterías de plomo-ácido y los sistemas complementarios de generación y conversión de energía. La capacidad del módulo para entregar niveles de tensiones controlados en corriente alterna y continua permitió desarrollar las etapas de carga, monitoreo y evaluación del sistema de almacenamiento energético bajo condiciones de operación previamente establecidas.

**7 figura:** *Modulo de Fuente de alimentación*



**Fuente:** Modulo de alimentación. tomado de <https://n9.cl/z88rj9>. Por Festo 2024.

### **3.1.7 Equipos de medición adicionales.**

Durante la realización de las prácticas se utilizaron equipos de medición como:

Pinza Amperimétrica True RMS 2000 Counts

Voltímetro Truper 534528

**8 Figura:** Instrumentos de medición



### 3.2 Procedimientos de prácticas

La implementación de cada práctica debe llevarse a cabo cumpliendo las respectivas normas de seguridad. Además, no se deben realizar modificaciones en las conexiones de los módulos mientras estos se encuentren energizados. Así mismo, se deben verificar las conexiones de los equipos para evitar fallas eléctricas como cortocircuitos entre fases.

#### 3.2.1 Práctica 1: “Proceso de carga de la batería de plomo-ácido 8802-12”

|                       |                                                       |                                |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|
| NOMBRE DE LA PRÁCTICA | Proceso de carga de la batería de plomo-ácido 8802-12 | No. PRÁCTICA: PAA-03-F-003-005 |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|

| 1. DATOS INFORMATIVOS |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| CARRERA:              | Ingeniería en Electricidad |
| CICLO/NIVEL:          | 9 <sup>no</sup> Semestre   |

|                               |                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>FECHA:</b>                 | <b>22/05/2026</b>                               |
| <b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b> | <b>Quimis Pico Darlin Jahir</b>                 |
| <b>DOCENTE RESPONSABLE</b>    | <b>PhD. Fernando Vladimir Jaramillo García.</b> |

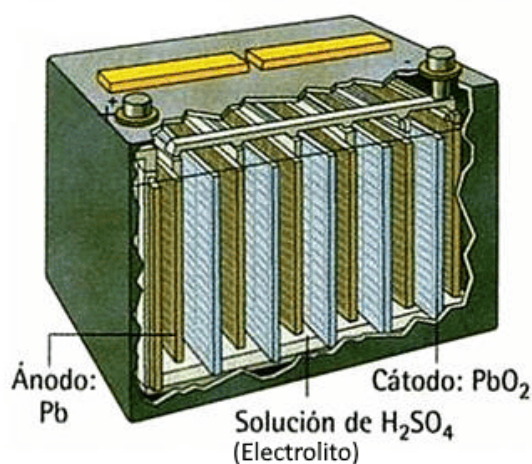
## 2. FUNDAMENTACIÓN

### Preparación de las baterías de plomo ácido

#### Baterías de plomo ácido

Las baterías de plomo-ácido son dispositivos electroquímicos recargables constituidos por electrodos de plomo metálico y dióxido de plomo inmersos en un electrolito del ácido sulfúrico. Su estructura incluye placas conductoras, separadores porosos y una carcasa resistente de la corrosión. Estos componentes permiten la ocurrencia de reacciones químicas reversibles responsables del almacenamiento y suministro de energía eléctrica, siendo una de las tecnologías más utilizadas debido a su bajo costo y confiabilidad (Fernández, Martínez I., Guzmán A., & Giménez, 2005).

**9 Figura:** *parte interna de la batería*



Estas están compuestas por.

- Fases sólidas (plomo y dióxido de plomo)
- Fase líquida (electrolito ácido)

La iteración entre estas fases permite el almacenamiento y liberación de la energía.

### 3. OBJETIVO

- El objetivo de esta práctica es realizar la correcta preparación y carga del banco de baterías de plomo (8802-12), utilizando la entrada de alimentación del dinamómetro / fuente de alimentación cuatro cuadrantes (8960 -32), garantizando condiciones seguras de operación y verificando la adecuada conexión de los componentes del sistema.

### 4. MATERIALES E INSUMOS

- Módulo de baterías de plomo ácido (8802 -12)
- Módulo de dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes (8960 – 32)
- Software LVDAC-EMS
- Multímetro de precisión
- Cable para conexionado

### 5. PROCEDIMIENTO

| Nº | ACTIVIDADES                                                                                                                                                                                                                               | OBSERVACIONES                                                                                                              |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Se determinará si la carga de la batería se realizará para una sola batería o varias baterías del módulo conectadas en paralelo, ya que dependiendo de esto se determinará qué tipo de etapa se va a realizar si la etapa 2 o la etapa 3. | Este paso permitió observar la importancia de definir correctamente la configuración del sistema, ya que la elección entre |

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                               |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | una sola batería o varias en paralelo influye directamente en la capacidad y comportamiento de la carga                                                                                                       |
| 2 | Para la carga de una sola batería, se conecta el terminal positivo (rojo) de la batería al terminal del positivo de la fuente de alimentación. De igual manera, se conecta el terminal negativo (negro) de la batería al terminal negativo de la fuente.                                          | Se debe verificar que las conexiones se realicen con polaridad correcta antes de energizar la fuente, ya que una inversión puede causar daños en la batería o en el equipo de alimentación                    |
| 3 | Para la carga de varias baterías, se conectan los módulos en configuración paralelo. Posteriormente, el terminal positivo (rojo) de la entrada de carga en paralelo de la batería se conecta al terminal positivo de la fuente de alimentación, y así mismo el terminal negativo correspondiente. | Es importante asegurar que todas las baterías tengan el mismo voltaje y estado de carga antes de conectarlas en paralelo, para evitar corrientes de desequilibrio que puedan dañarlas o reducir su vida útil. |
| 4 | Se verifica que el interruptor principal de la fuente de alimentación del módulo de cuatro cuadrantes se encuentre en posición de apagado (OFF). Luego, se procede a conectar el equipo a la red eléctrica.                                                                                       | Se debe verificar que el interruptor esté en posición off antes de la conexión, para evitar energizaciones accidentales que pueden generar riesgos eléctricos o daños en el equipo.                           |
| 5 | Se selecciona el modo de operación del dinamómetro/ fuente de alimentación cuatro cuadrantes configurándolo en modo “fuente de alimentación”.                                                                                                                                                     | Es fundamental verificar que el modo seleccionado sea el correcto antes de iniciar la operación, ya que una configuración                                                                                     |
| 6 | Se enciende la fuente de alimentación activando el interruptor principal, permitiendo así el inicio del proceso de carga de las baterías.                                                                                                                                                         | Se debe encender la fuente de forma gradual y monitorear los valores de                                                                                                                                       |

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                      |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | voltaje y corriente, para asegurar que el proceso de carga se realice dentro de los parámetros seguros y evitar sobrecargas.                                                                                         |
| 7 | En el dinamómetro/ fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, se selecciona la función de cargador flotante de batería de plomo-ácido mediante el botón correspondiente, y se ajusta la tensión de carga a aproximadamente 13,8 V utilizando la perilla.                                           | Es importante ajustar correctamente la tensión de carga de 13,8 V, ya que un valor superior puede provocar sobrecarga en la batería de plomo, mientras que un valor inferior podría resultar en una carga incompleta |
| 8 | Se activa el botón de marcha/ paro para iniciar el proceso de carga. Se verifica en la pantalla que el sistema indique que la carga se encuentra en funcionamiento.                                                                                                                                  | Se debe comprobar que los indicadores en pantalla correspondan a un funcionamiento normal en proceso de carga, asegurando que no existan alarmas o errores antes de continuar.                                       |
| 9 | Una vez finalizada la carga de las baterías, se presiona nuevamente el botón de marcha/paro para detener el proceso. Posteriormente, se apaga el dinamómetro/ fuente de alimentación de cuatro cuadrantes y se desconectan los módulos del banco de baterías, verificando el estado de las baterías. | Se debe asegurar una correcta secuencia de apagado y desconexión para evitar chispas o descargas, además de verificar el estado final de las baterías para confirmar que la carga se realizó adecuadamente.          |

## 6. CUADRO DE RESULTADOS

**Tabla 2** Datos obtenidos a partir del Comportamiento de carga durante la práctica.

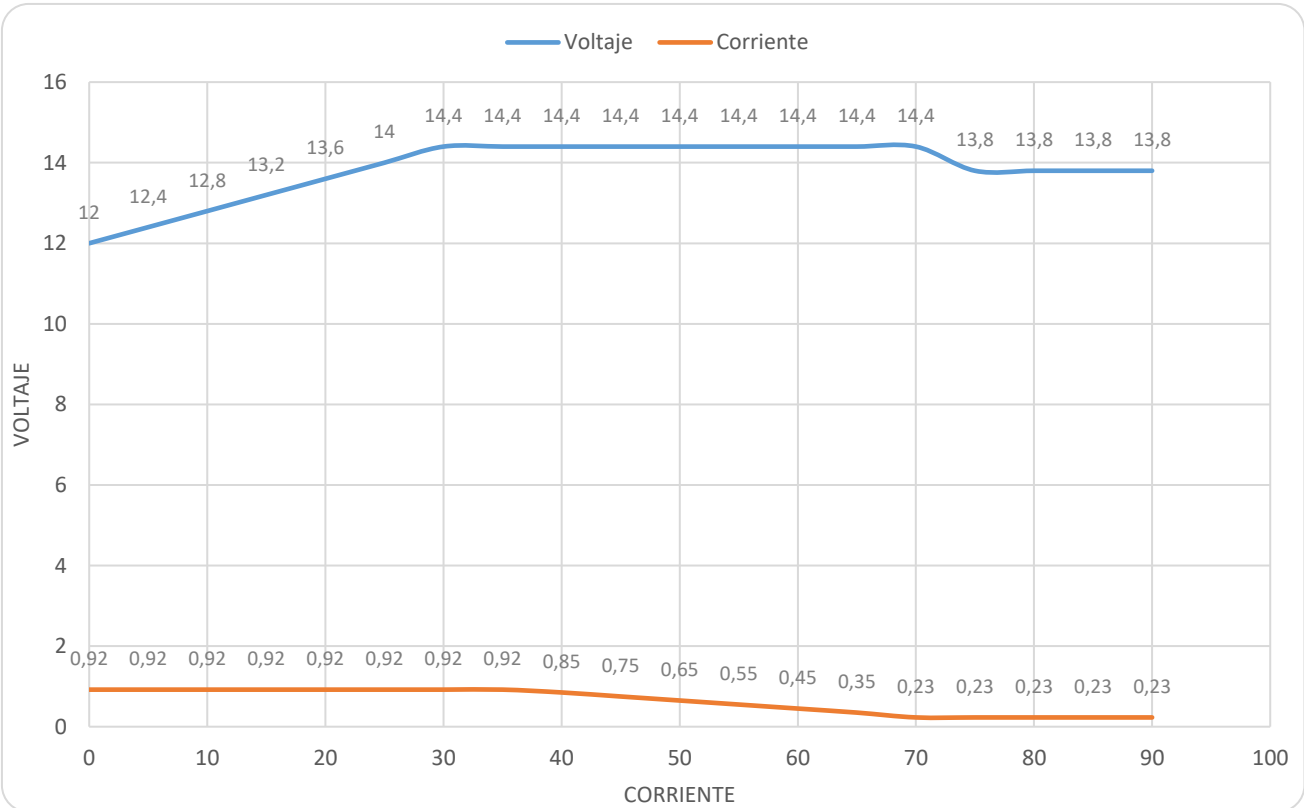
| Tiempo (min) | Voltaje (V) | Corriente (A) |
|--------------|-------------|---------------|
| 0            | 12,0        | 0,92          |
| 5            | 12,4        | 0,92          |
| 10           | 12,8        | 0,92          |
| 15           | 13,2        | 0,92          |
| 20           | 13,6        | 0,92          |
| 25           | 14,0        | 0,92          |
| 30           | 14,4        | 0,92          |
| 35           | 14,4        | 0,92          |
| 40           | 14,4        | 0,80          |
| 45           | 14,4        | 0,65          |
| 50           | 14,4        | 0,55          |
| 55           | 14,4        | 0,45          |
| 60           | 14,4        | 0,35          |
| 65           | 14,4        | 0,23          |
| 70           | 14,4        | 0,23          |
| 75           | 13,8        | 0,23          |
| 80           | 13,8        | 0,23          |
| 85           | 13,8        | 0,23          |
| 90           | 13,8        | 0,23          |



Estos datos obtenidos mediante la práctica presentan la variación del voltaje y la corriente del banco de baterías de plomo-ácido durante el proceso de carga rápida realizado mediante el dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes. Inicialmente se observa que la batería registró un voltaje de aproximadamente 12 V y una corriente de carga de 0,92 A, lo que indica que el banco de batería se encontraba en un estado de carga bajo y era capaz de admitir una elevada corriente para recuperar su capacidad energética.

En la Tabla 4 se logra observar que, al alcanzar un voltaje de 14,4 V, identificado como el voltaje de gaseo, la corriente comenzó a disminuir gradualmente desde 0,92 A hasta valores de 0,23 A. Esta reducción de la corriente evidencia que la batería se aproxima a su estado de carga completa y que la velocidad de las reacciones electroquímicas disminuye debido a la menor cantidad de material activo disponible para seguir almacenando energía. Se observa que el voltaje se estabilizó alrededor de 13,8 V, correspondiente al voltaje de flotación, mientras que la corriente se redujo, lo que indica que la batería alcanzó un elevado estado de carga y únicamente requiere una pequeña corriente para compensar las pérdidas internas y mantener su capacidad energética sin provocar sobrecarga.

### Comportamiento de carga del bloque de batería de plomo (8802 – 12).



La gráfica obtenida durante la práctica nos muestra el comportamiento que tiene el banco de batería de plomo-ácido durante la carga. Al inicio de la carga, la corriente se mantiene constante en aproximadamente 0,92 A, mientras que el voltaje aumenta progresivamente desde su valor inicial hasta alcanzar el voltaje de gaseo de 14,4 V. Esta etapa permite que la batería recupere la mayor parte de su capacidad de almacenamiento de energía. Ya que esta práctica está compuesta por dos etapas una llamada etapa de carga principal y la etapa de flotación.

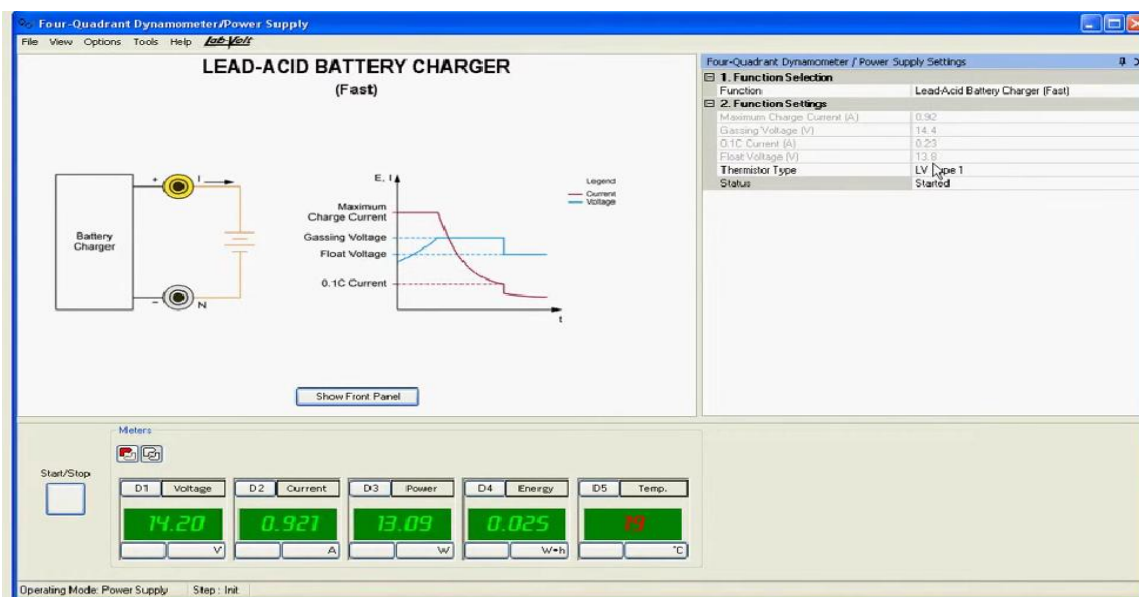
#### **Etapas de carga principal**

En esta etapa el voltaje sube desde aproximadamente 12 V y llega hasta el voltaje de gaseo (14,4 V) manteniéndose en esa etapa durante un tiempo, mientras que la corriente permanece alta.

## Etapa de flotación

En esta etapa la batería está prácticamente cargada y es donde actúa el cargador (dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes) que reduce el voltaje de 14,4 V a 13,8 V, esto lo hace con la finalidad de evitar sobrecargas, mientras que la corriente sigue disminuyendo hasta alcanzar un valor de 0,23 A (cercano a cero). Este comportamiento muestra un proceso de carga adecuado para las baterías de plomo-ácido, en el que se observan las diferentes etapas como la corriente constante, el voltaje de gaseo y el voltaje flotante, lo que nos garantiza una carga eficiente y segura prolongando la vida útil de la batería.

**10 figura:** Comportamiento del voltaje y corriente



En la siguiente grafica se muestra el comportamiento del voltaje y la corriente durante el proceso de carga de la batería de plomo ácido utilizando un sistema de carga rápida. En ella se pueden identificar claramente las diferentes etapas del proceso de carga, las cuales permiten comprender el desempeño electroquímico de la batería bajo condiciones controladas. Inicialmente, con la configuración

establecida, la batería se encuentra en una etapa de carga a corriente constante, donde se aplica una corriente elevada con el objetivo de recuperar rápidamente la capacidad almacenada.

Durante esta fase, el voltaje de la batería aumenta de manera progresiva y, conforme se incrementa, aumenta también el nivel de carga. Esta etapa es fundamental, ya que representa el mayor aporte de energía hacia la batería.

## **7. CONCLUSIONES**

A través de esta práctica experimental se logró evaluar el proceso de carga del banco de baterías de plomo-ácido utilizando un dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes. Durante el desarrollo de la prueba se pudo observar que la batería presentó un comportamiento acorde con la teoría, iniciando con una etapa de carga a corriente prácticamente constante, en la cual el voltaje se incrementó de manera progresiva, y posteriormente una etapa de voltaje constante (voltaje de gaseo), donde la corriente disminuyó gradualmente hasta alcanzar valores cercanos a cero y luego se pudo observar como de manera progresiva se fue reduciendo el voltaje (voltaje de flotación) esto con la finalidad de darle una mejor vida útil a la batería y evitar sobrecargas.

## **8. RECOMENDACIONES**

- Verificar la correcta polaridad antes de realizar la conexión.
- Asegurar que las baterías tengan el mismo voltaje inicial
- Configurar adecuadamente el modo de la fuente
- Monitorear voltaje y corriente durante la carga
- Evitar sobrecargar la batería.
- Seguir la secuencia correcta de encendido y apagado.

- Revisar el estado de las baterías al finalizar.

### 3.2.2 Práctica 2: “Descarga parcial del banco de batería de plomo (8802-12)”

|                       |                                                           |                                |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|
| NOMBRE DE LA PRÁCTICA | Descarga parcial del banco de batería de plomo (8802-12). | No. PRÁCTICA: PAA-03-F-003-006 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|

| 9. DATOS INFORMATIVOS  |                                          |
|------------------------|------------------------------------------|
| CARRERA:               | Ingeniería en Electricidad               |
| CICLO/NIVEL:           | 9 <sup>no</sup> Semestre                 |
| FECHA:                 | 29/05/2026                               |
| NOMBRE DEL ESTUDIANTE: | Quimis Pico Darlin Jahir                 |
| DOCENTE RESPONSABLE    | PhD. Fernando Vladimir Jaramillo García. |

| 10. FUNDAMENTACIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Descarga parcial del bloque de batería de plomo (8802-12).</b></p> <p>La descarga parcial de las baterías de plomo ácido consiste en la extracción controlada de energía eléctrica sin llegar a un estado de descarga completa, con el objetivo de preservar su vida útil y analizar su comportamiento bajo condiciones reales de operación. Durante este proceso, la batería convierte la energía química almacenada en energía eléctrica, produciendo una disminución progresiva del voltaje mientras se mantiene el flujo de corriente hacia la carga. (Pavlov, 2017, pág. 23).</p> <p>Este fenómeno está gobernado por reacciones electroquímicas entre el dióxido de plomo (<math>PbO_2</math>), el plomo (pb) y el ácido sulfúrico (<math>H_2SO_2</math>), generando sulfato de plomo (<math>PbSO_4</math>) y liberando energía. En una descarga parcial, estas reacciones no se completan totalmente, lo que</p> |

permite que la batería mantenga su capacidad operativa y reduzca efectos negativos como la sulfatación profunda.

Además, el análisis de variables como voltajes, corriente y potencia durante la descarga permite evaluar el rendimiento de la batería, su eficiencia y su estado de carga, siendo estos parámetros fundamentales para aplicaciones en sistemas eléctricos y energéticos. (Pavlov, 2017, pág. 24).

#### **11. OBJETIVO**

- Analizar el comportamiento eléctrico y el desempeño del banco de batería de plomo ácido modelo 8802 – 12 durante un proceso de descarga parcial, mediante la medición de variable como voltaje, corriente y potencia, con el fin de evaluar su respuesta operativa, identificar la variación del estado de carga y relacionar los resultados obtenidos con los principios teóricos de funcionamiento, contribuyendo a un uso eficiente y a la prolongación de su vida útil.

#### **12. MATERIALES E INSUMOS**

- Módulo de baterías de plomo ácido (8802 -12)
- Módulo de dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes (8960 – 32)
- Software LVDAC-EMS
- Multímetro de precisión
- Cable para conexionado

| 13. PROCEDIMIENTO |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                           |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| N°                | ACTIVIDADES                                                                                                                                                                                                                                                                        | OBSERVACIONES                                                                             |
| 1                 | Se verifica que el interruptor principal del dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes (8960 – 32) se encuentre en posición de apagado (OFF) antes de realizar cualquier conexión.                                                                                      | Verificar que el equipo esté apagado evita riesgos eléctricos y daños en los componentes  |
| 2                 | Se conecta el dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes a la red eléctrica, asegurando condiciones seguras de operación.                                                                                                                                             | La correcta conexión a la red garantiza un funcionamiento estable del sistema.            |
| 3                 | Se realiza el conexionado del banco de baterías de plomo (8802 – 12).<br>Se conecta el terminal positivo del banco de baterías al terminal positivo de la fuente de cuatro cuadrantes.<br>Se conecta el terminal negativo del banco de baterías al terminal negativo de la fuente. | Es fundamental respetar la polaridad para evitar cortocircuitos o daños en la batería.    |
| 4                 | Se enciende la fuente de alimentación de cuatro cuadrantes y se mide el voltaje inicial del banco de baterías, verificando que se encuentre aproximadamente en 50,8 V.                                                                                                             | La medición inicial permite conocer el estado de carga del banco de baterías.             |
| 5                 | Mediante el software del equipo, se verifica que la frecuencia de operación este configurado en 60 Hz                                                                                                                                                                              | La correcta configuración de la frecuencia asegura el funcionamiento adecuado del equipo. |
| 6                 | Se configura la fuente de cuatro cuadrantes en modo de operación como fuente de tensión en corriente continua (CC)                                                                                                                                                                 | Seleccionar el modo correcto de operación evita errores en el proceso de descarga.        |
| 7                 | Posteriormente, se ajusta el equipo para que funciones en modo de carga electrónica (descarga), permitiendo que la fuente de cuatro cuadrante absorba energía del banco de baterías.                                                                                               | El modo de carga electrónica permite simular condiciones reales de descarga controlada.   |

|    |                                                                                                                                                                                                       |                                                                                        |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 8  | Se establece la corriente de descarga en aproximadamente 4 A                                                                                                                                          | Ajustar la corriente de descarga es clave para evitar sobre esfuerzos en la batería.   |
| 9  | Se configura el tiempo de descarga en 60 minutos mediante el temporizador del sistema.                                                                                                                | El control del tiempo de descarga permite realizar ensayos reproducibles               |
| 10 | Se fija un voltaje mínimo de descarga del banco de baterías en aproximadamente 36,5 V como condición de parada.                                                                                       | Establecer un voltaje mínimo previene descargas profundas que dañen la batería.        |
| 11 | Se inicia el proceso de descarga mediante el botón de marcha/parada del equipo.                                                                                                                       | La activación del sistema debe realizarse de forma controlada para evitar fallas.      |
| 12 | Durante el proceso, la fuente de cuatro cuadrantes opera como una carga, absorbiendo la energía suministrada por la batería, mientras se monitorean continuamente los valores de voltaje y corriente. | El monitoreo constante permite detectar anomalías durante descarga.                    |
| 13 | Una vez alcanzado el tiempo establecido o el voltaje mínimo (36,5 V), se detiene el proceso de descarga.                                                                                              | Detener el proceso en condiciones establecidas garantiza la seguridad del sistema.     |
| 14 | Finalmente, se apaga la fuente de alimentación de cuatro cuadrantes y se procede a desconectar el banco de baterías, verificando su estado final.                                                     | La correcta desconexión evita riesgos y permite evaluar el estado final de la batería. |



#### 14. CUADRO DE RESULTADOS

**Tabla 3** *Descarga parcial*

| Tiempo (min) | Voltaje (V) | Corriente (A) | Potencia (W) | Energía W.H |
|--------------|-------------|---------------|--------------|-------------|
| 1            | 48          | 3,998         | 191,904      | 0           |
| 5            | 47,13       | 3,998         | 188,42       | 12,68       |
| 10           | 46,54       | 3,998         | 186,06       | 28,28       |
| 15           | 46,09       | 4             | 184,30       | 43,71       |
| 20           | 45,85       | 3,998         | 183,30       | 59,03       |
| 25           | 45,47       | 3,998         | 181,78       | 74,24       |
| 30           | 44,7        | 3,998         | 178,71       | 89,26       |
| 35           | 44,1        | 4             | 176,4        | 104,06      |
| 40           | 43,6        | 4             | 174,4        | 118,67      |
| 45           | 42,9        | 3,998         | 171,51       | 133,09      |
| 50           | 41,8        | 4             | 167,2        | 147,20      |
| 55           | 40,2        | 3,998         | 160,71       | 160,86      |
| 58           | 38,5        | 3,998         | 153,92       | 168,73      |
| 60           | 36,5        | 4             | 146          | 173,73      |

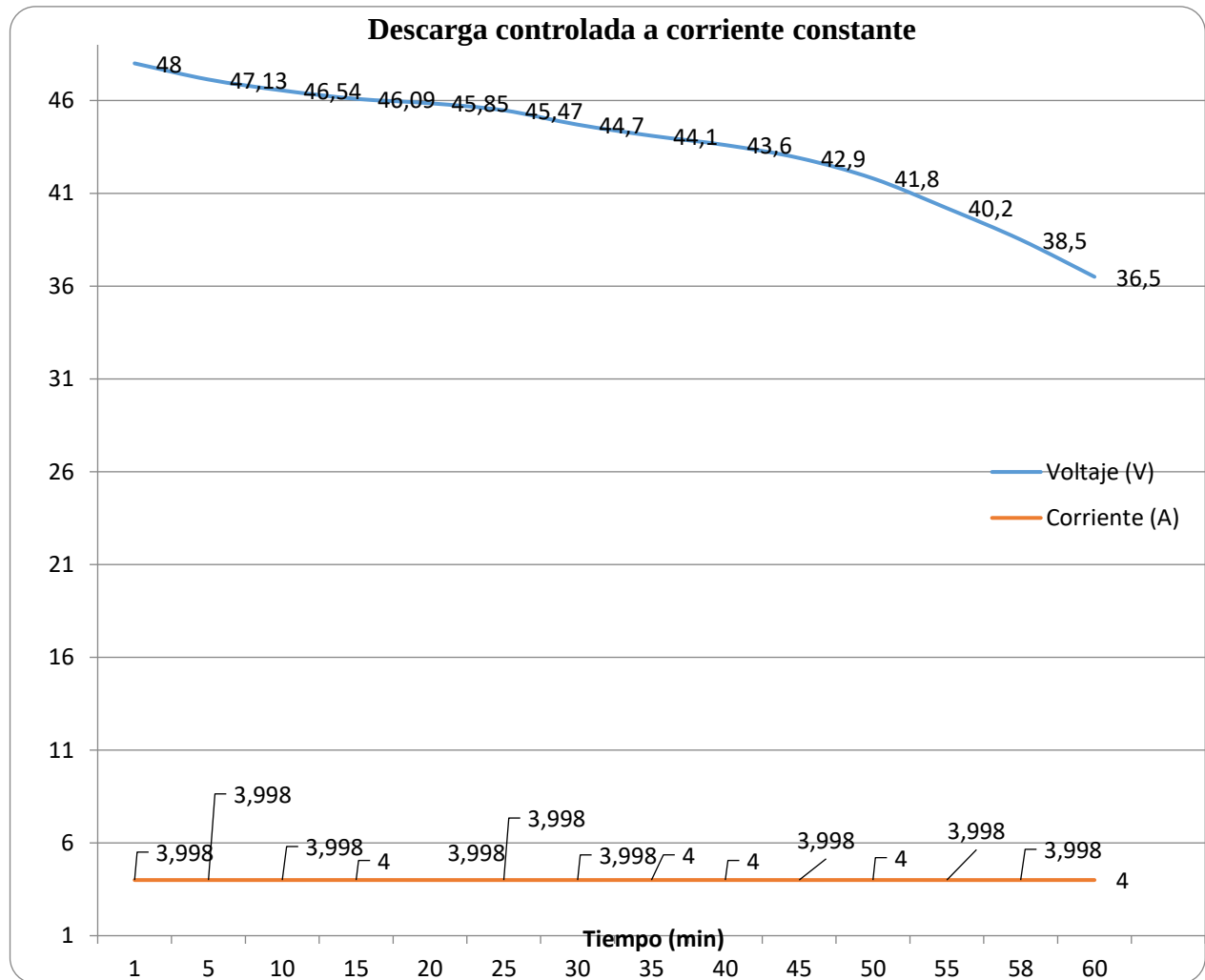
Como podemos observar los valores que se obtuvieron en la Tabla 3 nos presenta valores de voltaje y corriente registrados durante la práctica de descarga controlada del banco de batería de plomo-ácido (8802-12) mediante el dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes. Durante la prueba se mantuvo una corriente de descarga prácticamente constante de aproximadamente

4 A, condición que permitió evaluar el comportamiento de la batería bajo una condición de descarga uniforme.

Al inicio de la práctica, el banco de baterías presentó un voltaje de 48 V, valor que corresponde a un estado de carga elevado. Conforme transcurrió el tiempo de descarga, el voltaje disminuyó gradualmente hasta alcanzar 36,5 V al finalizar las mediciones experimentales. Esta reducción progresiva se debe a la transformación de los materiales activos de las placas en sulfato de plomo y a la disminución de la concentración de ácido sulfúrico en el electrolito, fenómenos que incrementan la resistencia interna de la batería y reducen su capacidad para mantener el potencial eléctrico en sus terminales.

Por otra parte, podemos observar que la corriente permaneció prácticamente constante durante toda la práctica, con pequeñas variaciones como se observa en la Tabla 3, lo que nos demuestra que el sistema de descarga operó de manera estable y controlada.

### Descarga parcial del bloque de batería de plomo (8802 – 12)



Como podemos observar la siguiente gráfica, es el resultado del comportamiento que tiene la corriente y el voltaje después de haber descargado la batería en un tiempo de 60 minutos. La curva de descarga controlada de la batería la podemos interpretar dividiéndola en tres zonas principales, las cuales describen su comportamiento a lo largo del proceso de descarga.

En la primera región, se observa una caída inicial del voltaje al comenzar la descarga. Este comportamiento es normal y se debe principalmente a la resistencia interna de la batería, así como al

ajuste del sistema cuando empieza a suministrar corriente. En esta etapa la disminución de tensión es breve pero evidente.

La segunda etapa tenemos una corriente prácticamente constante, alrededor de 4 A, mientras que el voltaje disminuye de manera lenta y progresiva. Esta etapa representa el funcionamiento más eficiente de la batería, ya que es donde entrega la mayor parte de su energía útil de forma sostenida. En la tercera etapa el voltaje comienza a caer de forma más pronunciada.

Esto ocurre debido al consumo de los reactivos electroquímicos y al aumento de la resistencia interna. Cuando el voltaje alcanza el valor de bloqueo en este caso es de 36,5 V, la descarga debe interrumpirse para evitar daños en la batería y preservar su vida útil.

## 15. CONCLUSIONES

La práctica permitió analizar el comportamiento de un banco de baterías de plomo ácido sometido a un proceso de descarga controlada a corriente constante. A partir de los resultados obtenidos, se comprobó que el voltaje de la batería disminuye gradualmente conforme entrega energía, mientras que la corriente permanece prácticamente constante durante toda la práctica. Este comportamiento coincide con las características teóricas de las baterías de plomo-ácido y demuestra la importancia de controlar parámetros como la tensión, la corriente y la potencia para evaluar su desempeño.

## 16. RECOMENDACIONES

- Verificar el estado inicial de carga de la batería antes de realizar cualquier ensayo, con el fin de garantizar que las condiciones de operación sean las adecuadas y los resultados obtenidos sean confiables.
- Mantener correctamente configurados los parámetros de descarga, especialmente la corriente de descarga y la tensión mínima de desconexión, para evitar daños ocasionados por una sobre descarga de la batería.
- Realizar un monitoreo continuo de las variables eléctricas, como voltaje, corriente y potencia, durante todo el proceso de descarga para detectar posibles anomalías en el funcionamiento del sistema.
- Asegurar que las conexiones eléctricas estén firmes y en buen estado antes de iniciar la práctica, evitando pérdidas de energía, mediciones incorrectas o riesgos en el equipo.
- Respetar los límites de operación recomendados por el fabricante de la batería, especialmente en cuanto a corriente máxima de descarga y tensión mínima permitida, con el propósito de preservar su vida útil.

### 3.2.3 Práctica 3: “Prueba de sulfatación”

|                       |                                                               |                                |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| NOMBRE DE LA PRÁCTICA | Prueba de sulfatación de la batería de plomo ácido (8802-12). | No. PRÁCTICA: PAA-03-F-003-007 |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|

## 17. DATOS INFORMATIVOS

|                        |                                          |
|------------------------|------------------------------------------|
| CARRERA:               | Ingeniería en Electricidad               |
| CICLO/NIVEL:           | 9 <sup>no</sup> Semestre                 |
| FECHA:                 | 5/06/2026                                |
| NOMBRE DEL ESTUDIANTE: | Quimis Pico Darlin Jahir                 |
| DOCENTE RESPONSABLE    | PhD. Fernando Vladimir Jaramillo García. |

## 18. FUNDAMENTACIÓN

### **Prueba de sulfatación batería de plomo (8802-12).**

La sulfatación es uno de los principales mecanismos de degradación de las baterías de plomo-ácido y se produce cuando los cristales de sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ) formados durante la descarga no se reconvierten completamente en plomo (Pb) y dióxido de plomo ( $PbO_2$ ) durante el proceso de carga. Con el tiempo, estos cristales aumentan de tamaño y se vuelven más estables, reduciendo la superficie activa de las placas y limitando la capacidad de la batería para almacenar y suministrar energía.

La prueba de sulfatación se fundamenta en la aplicación de una corriente controlada y la observación del comportamiento del voltaje de la batería durante un intervalo de tiempo determinado. Una batería en buen estado debe ser capaz de mantener un nivel de tensión adecuado bajo las condiciones de ensayo. Por el contrario, una caída rápida del voltaje por debajo del valor de referencia indica una disminución de la capacidad de almacenamiento y la posible presencia de sulfatación en las placas (Festo, Electricity and New Energy, 2024).

En esta investigación, el criterio de evaluación consistió en verificar si la batería era capaz de mantener un voltaje superior a 12 V durante un período de un minuto al aplicarle una corriente de 1 A. si el voltaje descendía por debajo de este valor antes de finalizar el tiempo de prueba, se consideró que la batería presentaba indicios de sulfatación.

### 19. OBJETIVO

- Evaluar el estado de sulfatación de la batería de plomo ácido modelo 8802 – 12 mediante aplicación de una corriente controlada y el monitoreo de su comportamiento de voltaje, con el fin de determinar su capacidad de mantener condiciones normales de operación.

### 20. MATERIALES E INSUMOS

- Módulo de baterías de plomo ácido (8802 -12)
- Módulo de dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes (8960 – 32)
- Software LVDAC-EMS
- Multímetro de precisión
- Cable para conexión

### 21. PROCEDIMIENTO

| Nº | ACTIVIDADES                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | OBSERVACIONES                                                                                                                                                                                      |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Se seleccionó de manera individual una de las baterías que conforman el banco de baterías de plomo-ácido para la realización de la prueba de sulfatación.                                                                                                                                                                | La batería debe encontrarse en buen estado físico, sin deformaciones, fugas de electrolito ni daños visibles en los terminales, ya que estas condiciones pueden alterar los resultados del ensayo. |
| 2  | Se conectó el terminal positivo de la batería al terminal de salida positivo de la fuente de alimentación del Dinamómetro/ fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, y el terminal negativo de la batería al terminal de salida negativo del equipo, verificando previamente la correcta polaridad de las conexiones. | Se verificó la correcta polaridad de la conexión para evitar posibles daños en la batería o en el equipo de medición.                                                                              |
| 3  | Se comprobó que el dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes se encontrara                                                                                                                                                                                                                                 | Las conexiones se realizaron de manera firme                                                                                                                                                       |

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                        |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | en estado apagado antes de conectarlo a la red de alimentación de corriente alterna.                                                                                                                                                                                                                         | y segura para minimizar errores de medición ocasionados por falsos contactos.                                                                                                          |
| 4 | Una vez energizado el equipo, se configuró el dinamómetro para operar en el modo de fuentes de corriente negativa, de acuerdo con las condiciones establecidas para la prueba.                                                                                                                               | La verificación previa del estado del equipo constituye una medida de seguridad que evita variaciones repentinas de corriente o tensión al iniciar la prueba.                          |
| 5 | Se estableció un valor de corriente de 1 A, el cual se utilizó como parámetro de evaluación del comportamiento de la batería durante el ensayo.                                                                                                                                                              | La selección correcta del modo de funcionamiento es indispensable para garantizar que las condiciones de la prueba sean las establecidas en el procedimiento experimental.             |
| 6 | Se activó la fuente de corriente negativa y se inició el monitoreo del voltaje de la batería durante un intervalo de un minuto, registrando la variación de la tensión en función del tiempo.                                                                                                                | El valor de corriente seleccionado permite evaluar la respuesta de la batería sin someterla a esfuerzos que incrementen su temperatura de operación.                                   |
| 7 | Se verificó la capacidad de la batería para mantener una tensión superior a 12 V durante el período de ensayo. En caso de que el voltaje descendiera por debajo de dicho valor antes de finalizar el minuto de observación, la batería fue considerada como una unidad con posibles indicios de sulfatación. | Durante esta etapa se prestó especial atención al comportamiento de la tensión, ya que una disminución rápida puede ser un inicio de pérdida de capacidad o sulfatación de las placas. |
| 8 | Concluido el tiempo de prueba, se desactivó la fuente de corriente negativa y se procedió a desconectar la batería del sistema de ensayo.                                                                                                                                                                    | La capacidad de mantener el voltaje dentro del rango establecido constituye un indicador del estado de conservación de las placas                                                      |



|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                    | y de la capacidad de almacenamiento de la batería.                                                                                                                                                  |
| 9 | El procedimiento descrito anteriormente se repitió de forma individual para las demás baterías que conforman el banco de baterías de plomo ácido, con el propósito de determinar el estado de cada una de ellas y establecer un diagnóstico general del sistema de almacenamiento. | La evaluación individual de cada batería permite identificar posibles diferencias en su estado de carga y nivel de sulfatación, facilitando un diagnóstico más preciso del banco de almacenamiento. |

## 22. CUADRO DE RESULTADOS

**Tabla 4** prueba de sulfatación batería A

| Tiempo (s) | Voltaje (V) |
|------------|-------------|
| 0          | 12,99       |
| 5          | 12,98       |
| 10         | 12,96       |
| 15         | 12,95       |
| 20         | 12,94       |
| 25         | 12,93       |
| 30         | 12,91       |
| 35         | 12,9        |
| 40         | 12,88       |
| 45         | 12,86       |
| 50         | 12,85       |
| 55         | 12,84       |
| 60         | 12,82       |

**Tabla 5 Prueba de sulfatación batería B**

| <b>Tiempo (s)</b> | <b>Voltaje (V)</b> |
|-------------------|--------------------|
| 0                 | 12,93              |
| 5                 | 12,91              |
| 10                | 12,87              |
| 15                | 12,84              |
| 20                | 12,82              |
| 25                | 12,78              |
| 30                | 12,74              |
| 35                | 12,72              |
| 40                | 12,68              |
| 45                | 12,64              |
| 50                | 12,62              |
| 55                | 12,61              |
| 60                | 12,60              |

**Tabla 6** *Prueba de sulfatación de batería C*

| <b>Tiempo (s)</b> | <b>Voltaje (V)</b> |
|-------------------|--------------------|
| 0                 | 12,75              |
| 5                 | 12,68              |
| 10                | 12,65              |
| 15                | 12,6               |
| 20                | 12,57              |
| 25                | 12,53              |
| 30                | 12,49              |
| 35                | 12,45              |
| 40                | 12,41              |
| 45                | 12,38              |
| 50                | 12,34              |
| 55                | 12,30              |
| 60                | 12,28              |

Como se puede observar en la Tabla 4, presenta los resultados correspondientes a una batería en buen estado, la cual durante la prueba de sulfatación fue sometida a una descarga de corriente constante de 1 Ah durante 1 minuto, tomándose los datos fueron tomados en cada segundo. Se observa que el voltaje disminuye de manera lenta y progresiva, pasando de 12,99 V a 12,82 V al finalizar la

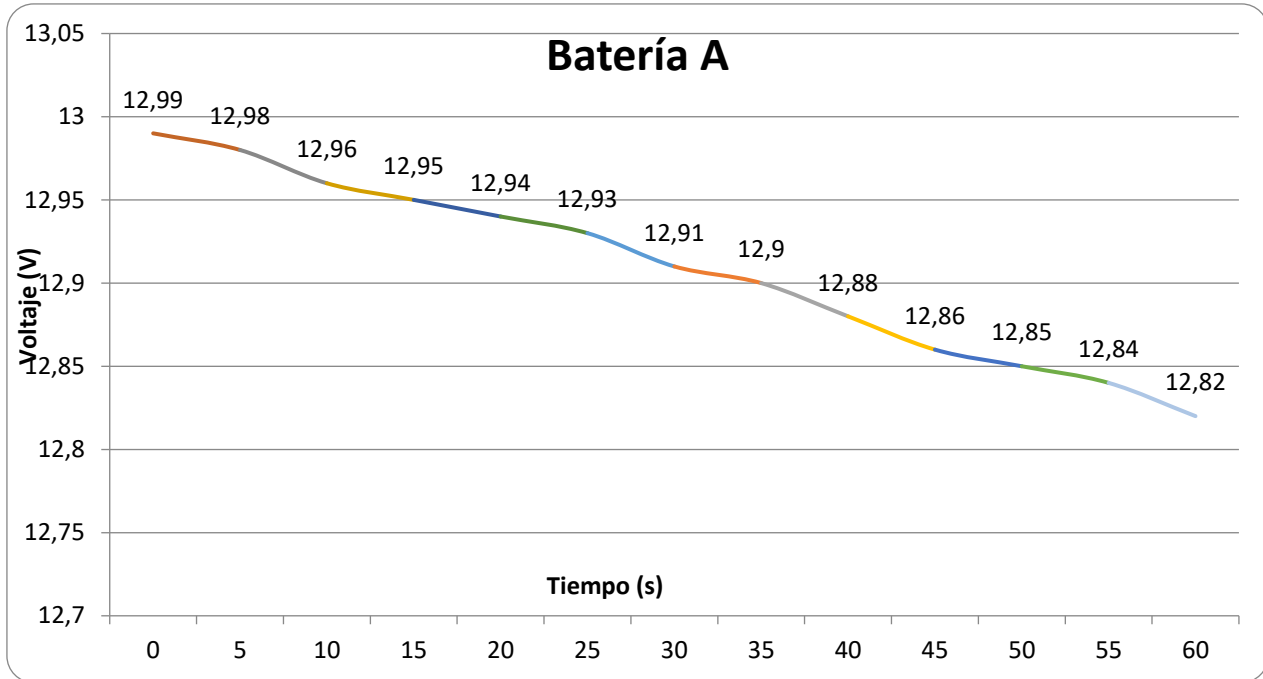
prueba. Durante toda la prueba la tensión permaneció por encima de 12,8 V, cumpliendo el criterio establecido por FESTO para una batería en condiciones normales de funcionamiento.

Observamos que en la Tabla 5 el comportamiento de la batería es diferente, puesto que el voltaje presenta una caída más pronunciada que en la batería A, disminuyendo de 12,93 V a 12,60 V durante el 1 minuto de prueba. La tensión baja de manera considerable a partir del segundo 35, evidenciando una batería moderadamente sulfatada.

En la Tabla 6, tenemos un caso muy diferente a la batería A y B puesto que corresponde a una batería con sulfatación severa, según se logra observar en los resultados después de la prueba de sulfatación. Se logra observar una caída rápida de tensión, pasando de 12,75 V a valores inferiores a 12,6 V antes de los 30 segundos. Al finalizar esta práctica se logra observar que la tensión cayó a un voltaje de 12,28 V. De acuerdo con el procedimiento de FESTO, este comportamiento es característico de una batería gravemente deteriorada, cuya capacidad de almacenamiento y entrega de energía se encuentra significativamente reducida.

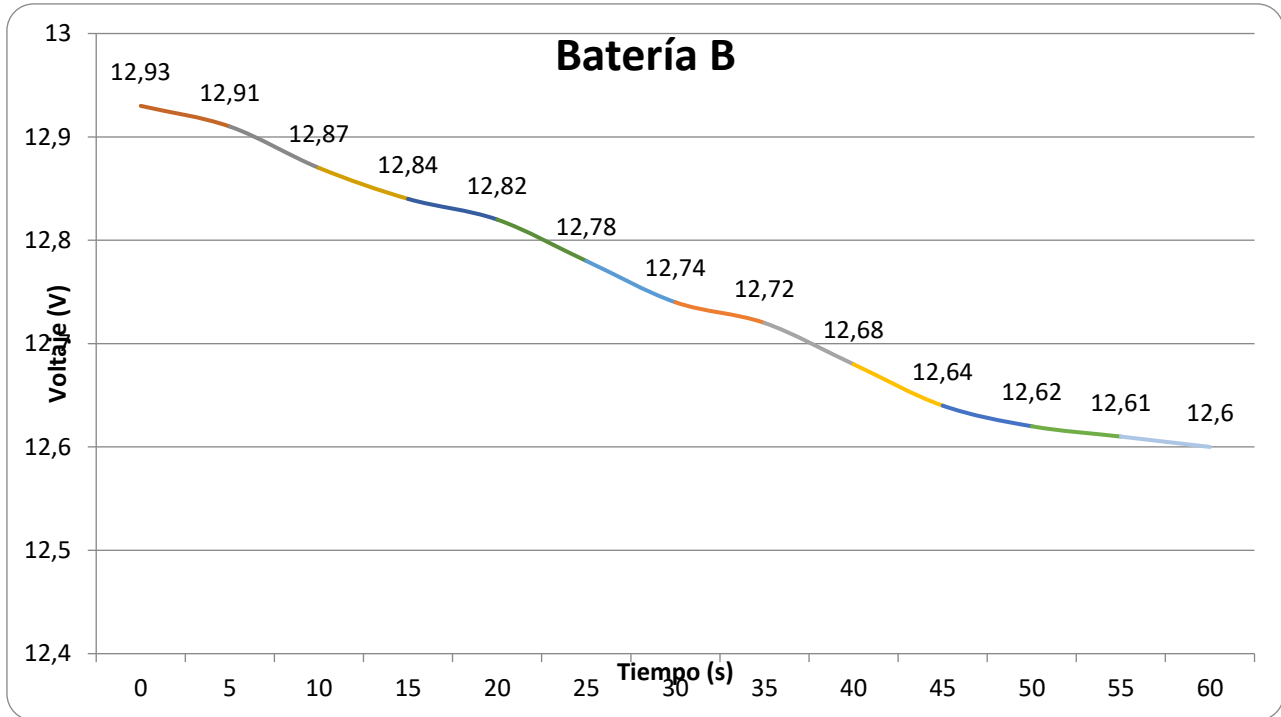
El análisis de los resultados obtenidos durante la prueba de sulfatación permitió determinar el porcentaje de disminución de tensión presentado por cada batería durante los 60 segundos de descarga a una corriente constante de 1 A. Para ello, se consideró la diferencia entre el voltaje inicial y el voltaje registrado al finalizar la prueba, relacionándola con el voltaje inicial. Los resultados obtenidos muestran que la batería A presentó una disminución de **1,31 %**, al pasar de 12,99 V a 12,82 V; la batería B presentó una disminución de **2,55 %**, pasando de 12,93 V a 12,60 V; mientras que la batería C registró la mayor disminución, correspondiente al **3,69 %**, al reducir su tensión de 12,75 V a 12,28 V. Estos resultados evidencian que la batería A presentó la menor variación de tensión y mantuvo un comportamiento estable durante el ensayo, mientras que las baterías B y C mostraron una mayor caída de tensión, asociada con los niveles de sulfatación moderada y severa identificados durante la prueba.

### Prueba de sulfatación en la batería A



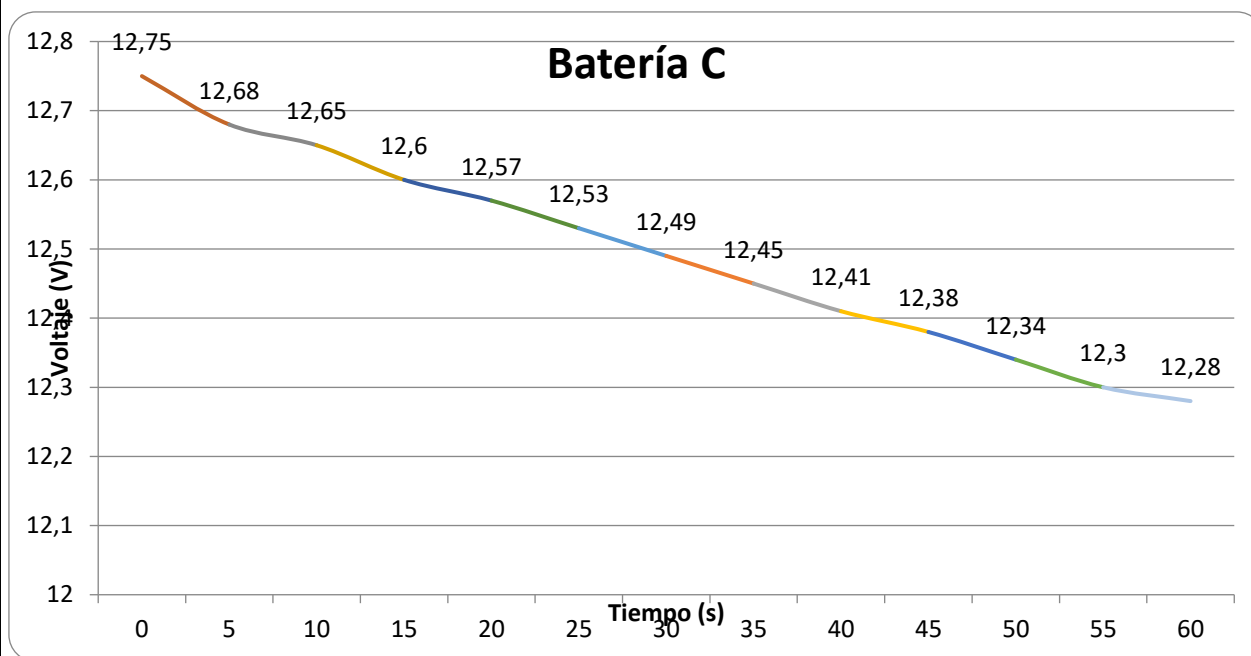
En la gráfica (A), se presenta el comportamiento del voltaje en la batería A luego de la prueba de sulfatación, puesto que como se observa la tensión se mantiene por encima de los 12,8 V durante los 60 segundos de descarga a una corriente constante de 1 A. la disminución del voltaje es gradual y estable, lo que indica un buen estado de conservación.

### Prueba de sulfatación en la batería B



En la gráfica (B), se observa algo distinto respecto a la gráfica (A) y es que durante la prueba de sulfatación en la batería B, se observa una caída progresiva del voltaje durante la prueba, alcanzando valores inferiores a 12,8 V antes de finalizar la prueba de sulfatación. Este comportamiento evidencia un nivel moderado de sulfatación, que afecta la capacidad de la batería para mantener su tensión bajo carga.

### Prueba de sulfatación de la batería C



En la grafica (C), se observa una gran diferencia con respecto a las otras baterias (A) y (B) , ya que en este caso la curva decayo mas con respecto a las otras, indicando una rapida caída de tensión durante los primeros segundos y descendiendo por debajo de los 12,6 V en poco tiempo. Este comportamiento es lo mas normal cuando una bateria tiene una sulfatación severa, donde la capacidad de almacenamiento y entrega de energía se encuentra considerablemente reducida.

Si comparamos las tres curvas obtenidas durante la prueba de descarga a corriente constante de 1 Ah, se observa una clara diferencia en el comportamiento eléctrico de cada batería. La bateria (A), mantiene una tensión superior a 12,8 V durante toda la práctica, evidenciando un correcto estado de funcionamiento.

La batería (B) presenta una sulfatación moderada ya que presenta una disminución progresiva más acelerada, cruzando el límite de 12,6 V antes de finalizar la prueba. Por su parte, la batería (C) severamente sulfatada muestra la caída de voltaje rápida, descendiendo por debajo de 12,6 V en un tiempo mucho menor. Estos resultados permiten concluir que existe una relación directa entre el grado



de sulfatación y la velocidad de caída de voltaje durante la descarga. A medida que aumenta la sulfatación, la capacidad de la batería para mantener su tensión disminuye, provocando una reducción de su rendimiento y de su capacidad de almacenamiento de energía.

### 23. CONCLUSIONES

La prueba de sulfatación realizada permitió evaluar el estado electroquímico de las baterías de plomo-ácido mediante el análisis de su comportamiento de tensión ante la aplicación de una corriente controlada. Los resultados obtenidos evidenciaron que las baterías que lograron mantener un voltaje superior a 12 V conservaron un desempeño adecuado, mientras que aquellas que presentaron una caída de tensión por debajo de este valor mostraron indicios de sulfatación y una disminución en su capacidad de almacenamiento de energía. En consecuencia, se demuestra que esta prueba constituye una herramienta eficaz para diagnosticar de manera preliminar el estado de las baterías, permitiendo identificar oportunamente procesos de deterioro que pueden afectar la confiabilidad, eficiencia y vida útil de los sistemas de almacenamiento energético basados en baterías de plomo-ácido.

### 24. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas de sulfatación de manera periódica en las baterías de plomo-ácido con el fin de identificar oportunamente posibles procesos de deterioro y prevenir fallas prematuras en el sistema de almacenamiento de energía.
- Es recomendable verificar el estado de carga de las baterías antes de efectuar la prueba, así como asegurar la correcta conexión de los terminales y la configuración

adecuada del equipo de prueba, para garantizar la confiabilidad de las mediciones obtenidas.

- Se recomienda evitar la descarga profunda y el almacenamiento prolongado de las baterías en condiciones de baja carga, ya que estas situaciones favorecen la formación y el crecimiento de cristales de sulfato de plomo sobre las placas, acelerando su degradación.

### 3.2.4 Práctica 4: “Ajuste de la tensión de carga máxima del controlador del aerogenerador 8216-02”

|                       |                                                                                       |                                |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| NOMBRE DE LA PRÁCTICA | <b>Ajuste de la tensión de carga máxima del controlador del aerogenerador 8216-02</b> | No. PRÁCTICA: PAA-03-F-003-008 |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|

| 25. DATOS INFORMATIVOS        |                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>CARRERA:</b>               | <b>Ingeniería en Electricidad</b>               |
| <b>CICLO/NIVEL:</b>           | <b>9<sup>no</sup> Semestre</b>                  |
| <b>FECHA:</b>                 | <b>12/06/2026</b>                               |
| <b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b> | <b>Quimis Pico Darlin Jahir</b>                 |
| <b>DOCENTE RESPONSABLE</b>    | <b>PhD. Fernando Vladimir Jaramillo García.</b> |

| 26. FUNDAMENTACIÓN                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Alternador/controlador de aerogenerador (8216-02).</b></p> <p>El controlador de carga del aerogenerador es un dispositivo encargado de regular la energía generada por el aerogenerador antes de que llegue al banco de batería. Su función principal es evitar</p> |

la sobrecarga y la descarga excesiva de las baterías, prologando su vida útil y mejorando la eficiencia del sistema (Festo, Electricity and New Energy, 2024).

La tensión máxima de carga corresponde al valor límite de voltaje que el controlador permite alcanzar a la batería durante el proceso de carga. Cuando se alcanza este valor, el controlador reduce o limita la corriente suministrada para evitar daños por sobrecarga.

En sistemas de corriente continua (CC), la correcta configuración de este parámetro garantiza:

- Protección del banco de baterías
- Mayor vida útil de las baterías
- Operación segura del aerogenerador
- Mejor aprovechamiento de la energía generada

## **27. OBJETIVO**

- Configurar y verificar el valor máximo de tensión de carga del controlador del aerogenerador, garantizando un funcionamiento adecuado del sistema de regulación y protección de la batería.

## **28. MATERIALES E INSUMOS**

- Módulo Alternador/controlador aerogenerador (8216-02)
- Módulo de dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes (8960 – 32)
- Software LVDAC-EMS

- Multímetro de precisión
- Cable para conexionado

| 29. PROCEDIMIENTO |                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                              |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| N°                | ACTIVIDADES                                                                                                                                                                              | OBSERVACIONES                                                                                                                |
| 1                 | Comprobar que el Alternador/controlador de aerogenerador (8216-02), se encuentre correctamente conectado y en condiciones de operación.                                                  | Se verificó que el Alternador/controlador de aerogenerador (8216-02), se encontrara energizado y sin indicaciones de alarma. |
| 2                 | Conectar las bobinas del aerogenerador y realizar las conexiones entre el controlador, el aerogenerador y el instrumento de monitoreo siguiendo el diagrama de conexiones de fabricante. | Se comprobó la continuidad de las conexiones y la correcta polaridad de los terminales.                                      |
| 3                 | Abrir el software de monitoreo e ingresar al menú correspondiente a la fuente de alimentación en corriente continua.                                                                     | El programa reconoció correctamente el controlador y permitió acceder a la configuración de parámetros.                      |
| 4                 | Configurar el dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes en modo fuente de alimentación y establecer el nivel de tensión requerido para la prueba.                             | La fuente entregó un voltaje estable durante toda la práctica.                                                               |
| 5                 | Verificar que el modo de programación se encuentre activado y fijar el parámetro de tensión máxima de carga en un valor aproximado de 56,5 V.                                            | El controlador aceptó el valor programado y lo almacenó en la memoria de la configuración.                                   |
| 6                 | Incrementar gradualmente la tensión de entrada y observar el comportamiento del controlador hasta alcanzar el valor configurado.                                                         | Al aproximar a la tensión de 56,5 V, el controlador limitó la carga, indicando que el parámetro fue                          |

|   |                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                                                                                                                                        | configurado correctamente.                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 7 | En el Alternador/controlador de aerogenerador (8216-02), girar el control en sentido contrario hasta que el LED comience a parpadear, esto fija la potencia del controlador en 56,6 V. | Después de realizar la maniobra se llegó a el objetivo.                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 8 | Todo esto se lo hace con la finalidad de preparar las bobinas del Alternador/controlador de aerogenerador (8216-02).                                                                   | Todas las actividades de conexión, configuración y verificación realizadas durante la práctica tienen como finalidad preparar adecuadamente las bobinas del aerogenerador, asegurando su correcta disposición y funcionamiento antes de efectuar el ajuste de la tensión máxima de carga del controlador |

### 30. CUADRO DE RESULTADOS

**Tabla 7:** *Ajuste de tensión máxima de carga del controlador 8216-02*

| Medición | Tensión en la entrada (V) | Estado de LED del controlador |
|----------|---------------------------|-------------------------------|
| 1        | 50                        | Apagado                       |
| 2        | 52                        | Apagado                       |
| 3        | 53,5                      | Apagado                       |
| 4        | 54,5                      | Apagado                       |
| 5        | 55,5                      | Encendido fijo                |
| 6        | 55,8                      | Encendido Fijo                |
| 7        | 56                        | Encendido Fijo                |
| 8        | 56,3                      | Parpadeo                      |
| 9        | 56,6                      | Parpadeo continuo             |

En la Tabla 7 se muestra el proceso de calibración del controlador del aerogenerador 8216-02, en el cual se fue aumentando gradualmente la tensión de entrada suministrada por el dinamómetro/fuente De alimentación cuatro cuadrantes. Se observó que al aproximarse a los 56,3 V el controlador comenzó A actuar sobre el sistema de regulación, evidenciado por el cambio en el estado LED indicador. Finalmente, al ajustar el controlador hasta obtener un parpadeo continuo del LED, se fijó una tensión máxima de carga de aproximadamente 56,6 V, verificando el correcto funcionamiento del sistema de control y protección. Este procedimiento permite preparar adecuadamente las bobinas del alternador y asegurar una operación segura del sistema eólico.

### 31. CONCLUSIONES

Se realizó el ajuste de la tensión máxima de carga del controlador mediante el software de configuración y una fuente de alimentación de corriente continua. Se verificó que el controlador limitó el proceso de carga al alcanzar el valor programado de aproximadamente 56,5 V, demostrando el correcto funcionamiento del sistema de regulación y protección del banco de baterías.

Asimismo, se comprobó que una correcta preparación de las bobinas y la adecuada configuración de los parámetros del controlador son aspectos fundamentales para asegurar una regulación eficiente de la energía generada por el aerogenerador. El controlador respondió satisfactoriamente al alcanzar el valor de tensión programado, limitando el proceso de carga y evitando posibles condiciones de sobrecarga en el banco de baterías.

Finalmente, la práctica permitió comprender la importancia de la etapa de configuración y ajuste de los sistemas de control en las instalaciones eólicas, ya que estos procedimientos contribuyen a mejorar la estabilidad operativa del sistema y prolongar la vida útil de los equipos de almacenamiento.

### 32. RECOMENDACIONES

- Verificar previamente todas las conexiones eléctricas de alternador/controlador del aerogenerador (8216-02), y de la fuente de alimentación antes de energizar el sistema, con el fin de evitar errores de configuración o posibles daños en los equipos.
- Preparar y revisar adecuadamente las bobinas antes de realizar el ajuste de la tensión máxima de carga, asegurando que se encuentre correctamente conectadas y en buenas condiciones de funcionamiento.

- Configurar el dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrante en fuente de alimentación, evitando aplicar variaciones bruscas de tensión que pueden afectar la operación del controlador o generar mediciones incorrectas.
- Utilizar instrumentos de medición calibrados, como multímetros y equipos de monitoreo, para garantizar la confiabilidad de los valores de tensión y corriente registrados durante la práctica.

### 3.2.5 Práctica 5: “Almacenamiento en baterías de la energía producida por los aerogeneradores”

|                       |                                                                             |                                |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| NOMBRE DE LA PRÁCTICA | Almacenamiento en baterías de la energía producida por los aerogeneradores. | No. PRÁCTICA: PAA-03-F-003-009 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|

| 33. DATOS INFORMATIVOS        |                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>CARRERA:</b>               | <b>Ingeniería en Electricidad</b>               |
| <b>CICLO/NIVEL:</b>           | <b>9<sup>no</sup> Semestre</b>                  |
| <b>FECHA:</b>                 | <b>12/06/2026</b>                               |
| <b>NOMBRE DEL ESTUDIANTE:</b> | <b>Quimis Pico Darlin Jahir</b>                 |
| <b>DOCENTE RESPONSABLE</b>    | <b>PhD. Fernando Vladimir Jaramillo García.</b> |

| 34. FUNDAMENTACIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Un aerogenerador es una máquina electromecánica diseñada para transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica (Leal, 2020, pág. 19). Su funcionamiento se basa en el aprovechamiento de la fuerza del viento, la cual hace girar las aspas o palas del rotor. Este</p> |



movimiento de rotación se transmite a un generador eléctrico que convierte la energía mecánica en electricidad.

Desde el punto de vista físico, el viento posee una determinada energía cinética debido al movimiento de las partículas de aire. Cuando esta corriente de aire incide sobre las palas del aerogenerador, se genera una fuerza aerodinámica que produce el giro del roto. La energía mecánica obtenida se transmite al generador eléctrico, donde, mediante el fenómeno de la inducción electromagnética, se produce una diferencia de potencial y se genera corriente eléctrica (Leal, 2020, pág. 21).

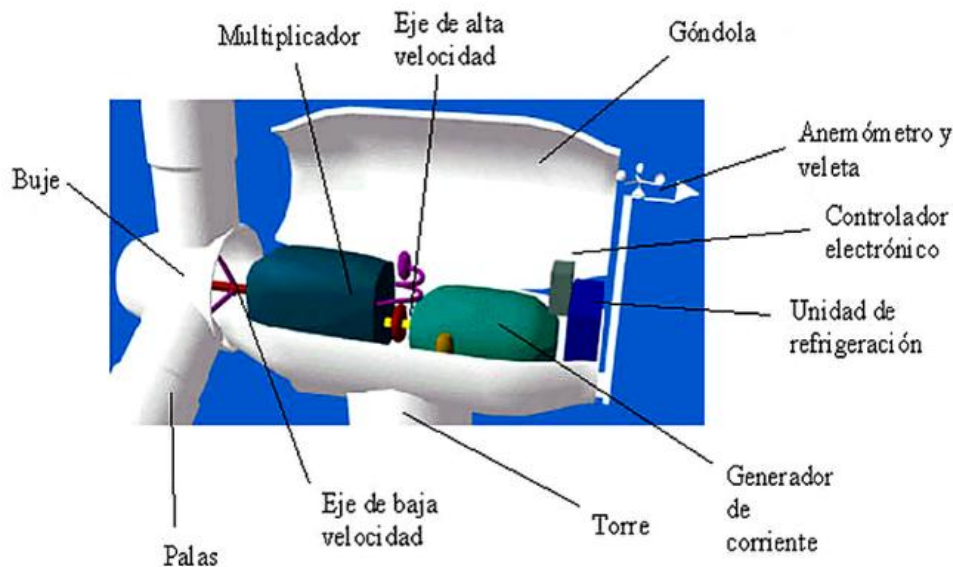
La potencia disponible en el viento depende principalmente de la densidad del aire, del área barrida por las palas y, especialmente, de la velocidad del viento, pudiendo expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$P_v = \frac{1}{2} \delta A V^3$$

- $P_v$  = potencia contenida en el viento (W)
- $\delta$  = densidad del aire ( $1,225 \text{ Kg}/\text{m}^3$ )
- $A$  = área barrida por las palas del rotor
- $V$  = velocidad del viento

La ecuación anterior muestra que la potencia del viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento, razón por la cual pequeñas variaciones en la velocidad producen cambios significativos en la energía disponible para la generación eléctrica.

**11 figura: Componentes principales de un aerogenerador.**



fuelle: Componentes principales del aerogenerador (Leal, 2020, pág. 24)

En los sistemas de generación, la producción de energía presenta un carácter intermitente debido a las variaciones naturales de la velocidad del viento. Por esta razón, es común incorporar sistemas de almacenamiento basados en baterías, los cuales permiten acumular la energía generada durante los períodos de mayor producción y suminístrala posteriormente cuando la generación disminuye o la demanda energética lo requiera. (Leal, 2020, pág. 24).

Los sistemas de generación eólica presentan una producción de energía variable, ya que la potencia entregada por el aerogenerador depende directamente de la velocidad del viento. Debido a esta variabilidad, es necesario incorporar sistemas de almacenamiento que permitan acumular la energía producida y disponer de ella cuando la generación disminuya o la demanda aumente.

Las baterías de plomo-ácido constituye una de las tecnologías de almacenamiento más utilizadas en sistemas eólicos de pequeñas y medianas potencia debido a su bajo costo, confiabilidad

y capacidad de suministrar energía de manera continua. Durante el proceso de carga, la energía eléctrica producida por el aerogenerador se transforma en energía química dentro de la batería mediante reacciones electroquímica reversible. (Leal, 2020, pág. 28).

El sistema incorpora un controlador de carga cuya función principal es supervisar el voltaje del banco de batería y evitar condiciones de sobrecarga. Cuando la tensión de las baterías alcanza el valor máximo establecido (aproximadamente 56,5 V), el controlador interrumpe temporalmente el proceso de carga para impedir el deterioro de las placas y la pérdida excesiva de electrolito. Posteriormente, cuando la tensión desciende hasta un valor cercano a 54,5 V, el controlador restablece automáticamente la carga, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente del sistema de almacenamiento energético.

### 35. OBJETIVO

- El objetivo de esta práctica es analizar el proceso de almacenamiento de la energía eléctrica generada por aerogenerador en un banco de baterías de plomo-ácido, verificando el comportamiento del sistema de carga y el funcionamiento del mecanismo de protección contra sobrecargas implementando por el controlador de carga.

### 36. MATERIALES E INSUMOS

- Módulo de baterías de plomo ácido (8802 -12)
- Módulo de dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes (8960 – 32)
- Banco de batería plomo-ácido.
- Software LVDAC-EMS

- Multímetro de precisión
- Cable para conexionado

| 37. PROCEDIMIENTO |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                    |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| N°                | ACTIVIDADES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | OBSERVACIONES                                                                                                                                                      |
| 1                 | Inicialmente se verificó la correcta conexión de todos los elementos que conforman el sistema de generación eólica, incluyendo el aerogenerador, el controlador de carga, el banco de baterías y los equipos de medición. Posteriormente, se energizo el sistema y se inició el software de supervisión y adquisición de datos LVDAQ-EMS para el monitoreo de las variables eléctricas. | Se verificó que todas las conexiones eléctricas entre el aerogenerador y el banco de baterías se encontraran correctamente instaladas                              |
| 2                 | Mediante la interfaz del dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes, se ajustó la velocidad del viento simulada a un valor de 5 m/s. Una vez establecida esta condición, se puso en marcha el alternador/controlador de aerogenerador (8216-02).                                                                                                                           | Al establecer una velocidad de viento simulada de 5 m/s y poner en marcha el motor de impulsión, el rotor del aerogenerador inicio su movimiento de forma estable. |
| 3                 | Con el sistema operando de manera estable, se procedió a incrementar gradualmente la velocidad del viento en intervalos de 1 m/s durante este proceso se monitoreó continuamente la corriente suministrada al banco de baterías. El incremento se mantuvo                                                                                                                               | A medida que se incrementó la velocidad del viento, se observó un aumento gradual de la corriente suministrada al banco de baterías. La                            |

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p>hasta alcanzar una corriente de carga cercana a 2,2 A condición obtenida aproximadamente para velocidades entre 8 y 9 m/s.</p>                                                                                                                                                                                  | <p>corriente de carga alcanzó aproximadamente 2,2 A cuando la velocidad del viento se situó entre 8 y 9 m/s, evidenciando una relación directa entre la velocidad del rotor y la potencia generada.</p>                                                                                             |
| 4 | <p>A medida que aumentaba la energía transferida al banco de baterías, se registraron los valores de tensión en los terminales del banco de baterías como consecuencia directa del almacenamiento de energía generada por el aerogenerador.</p>                                                                    | <p>Durante la carga, la tensión del banco de baterías presentó un incremento progresivo y estable. El LED indicador del controlador permaneció encendido de manera continua, confirmando que la transferencia de energía desde el aerogenerador hacia las baterías se desarrollaba normalmente.</p> |
| 5 | <p>Cuando la tensión del banco de baterías alcanzó aproximadamente 56,5 V, valor correspondiente al límite superior configurado en el controlador, se observó que el indicador luminoso de estado comenzó a parpadear. Este comportamiento indicó la activación del mecanismo de protección contra sobrecarga.</p> | <p>Al alcanzar una tensión cercana a 56,5 V, el controlador activó automáticamente el mecanismo de protección contra sobrecarga. Este evento fue identificado por parpadeo del LED de estado y la interrupción</p>                                                                                  |

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | inmediata del proceso de carga, evitando que las baterías recibieran energía adicional.                                                                                                                                                                                   |
| 6 | Tras la activación de la protección, se observó una disminución significativa de la velocidad de rotación del rotor del aerogenerador, alcanzando aproximadamente 200 rpm.                                                                                                                                                    | Tras la activación de la protección, se registró una disminución considerable de la velocidad de rotación del rotor, alcanzado aproximadamente de 200 rpm.                                                                                                                |
| 7 | Posteriormente, se continuó monitoreando la tensión del banco de baterías hasta que ésta descendió a un valor cercano a 54,5 V. Al alcanzarse este nivel, el controlador restableció automáticamente la conexión de carga.                                                                                                    | Cuando la tensión del banco de batería descendió hasta aproximadamente 54,5 V, el controlador restableció automáticamente el proceso de carga. Se observó un incremento de la velocidad del rotor y la recuperación de las condiciones normales de operación del sistema. |
| 8 | Durante el ensayo se verificó la existencia de una banda de histéresis aproximada de 2 V entre los puntos de desconexión y reconexión del controlador. Este margen operativo evitó ciclos repetitivos de conexión y desconexión, garantizando una operación más estable y eficiente del sistema de almacenamiento energético. | Se comprobó la existencia de una banda de histéresis cercana a 2 V entre los puntos de desconexión y reconexión del controlador. Este margen permitió evitar ciclos repetitivos de conexión y                                                                             |

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                     |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | desconexión, mejorando la estabilidad operativa del sistema.                                                                                                                                        |
| 9 | Finalmente, se registraron los valores de tensión, corriente, velocidad del rotor y estado operativo del controlador durante cada etapa de la práctica. Los datos obtenidos fueron utilizados para analizar el comportamiento dinámico del sistema y verificar la efectividad de las estrategias de protección implementadas para preservar la vida útil del banco de baterías. | Los valores de tensión, corriente y velocidad registrados durante la práctica mostraron un comportamiento coherente con el funcionamiento esperado del sistema de almacenamiento de energía eólica. |

### 38. CUADRO DE RESULTADOS

**Tabla 8:** *Parámetros medidos en el rotor y a la salida del controlador del aerogenerador (bloque de baterías) para diferentes velocidades del viento mediante el amperímetro y voltímetro*

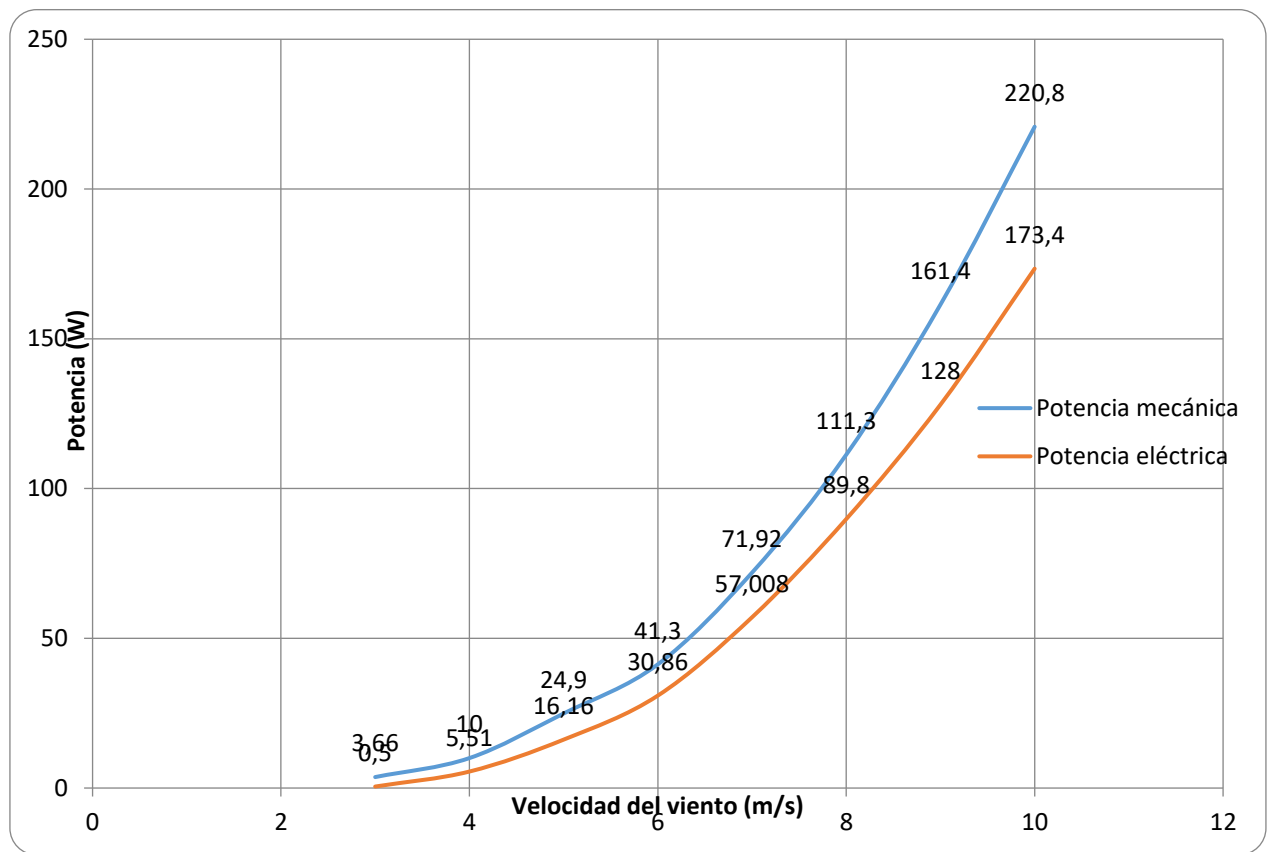
| Velocidad del viento | Velocidad de rotación en el rotor del aerogenerador (r/min) | Par en el rotor del aerogenerador (N.m o lbf.pulg.) | Potencia mecánica en el rotor del aerogenerador (W) | Tensión de carga de bloque de baterías (V) | Corriente de carga del bloque de baterías (A) | Potencia eléctrica del bloque de baterías (W) |
|----------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 3 m/s                | 469                                                         | 0,08 N.m                                            | 3,66                                                | 49,81                                      | 0,01                                          | 0,5                                           |
| 4 m/s                | 556                                                         | 0,17 N.m                                            | 10                                                  | 50,1                                       | 0,11                                          | 5,51                                          |
| 5 m/s                | 680                                                         | 0,35 N.m                                            | 24,9                                                | 50,5                                       | 0,32                                          | 16,16                                         |
| 6 m/s                | 820                                                         | 0,532 N.m                                           | 41,30                                               | 50,6                                       | 0,61                                          | 30,86                                         |
| 7 m/s                | 866                                                         | 0,834 N.m                                           | 71,92                                               | 50,9                                       | 1,12                                          | 57,008                                        |
| 8 m/s                | 902                                                         | 1,22 N.m                                            | 111,3                                               | 51,3                                       | 1,75                                          | 89,8                                          |
| 9 m/s                | 951                                                         | 1,658 N.m                                           | 161,4                                               | 52,09                                      | 2,45                                          | 128                                           |
| 10 m/s               | 1010                                                        | 2,252 N.m                                           | 220,8                                               | 54,2                                       | 3,20                                          | 173,4                                         |

En la Tabla 8 podemos observar que la potencia eléctrica es menor que la potencia mecánica esto ocurre debido a las pérdidas energéticas presentes durante la conversión de energía mecánica en energía eléctrica dentro del generador y del controlador de carga.

También se observa que el aumento de la velocidad del viento produce un incremento de la velocidad de rotación, par mecánico y de la potencia generada por el aerogenerador. Asimismo, la potencia eléctrica entregada al bloque de baterías de plomo-ácido aumenta de forma proporcional, aunque siempre presenta valores inferiores a la potencia mecánica debido a las pérdidas de conversión del sistema.



### Potencia mecánica y eléctrica en función de la velocidad del viento



En la siguiente tabla se puede observar la relación entre la velocidad del viento y las potencias mecánicas y eléctrica obtenidas en el sistema de generación eólica durante el proceso de carga del banco de baterías. Se observa que ambas variables presentan una tendencia creciente conforme aumenta la velocidad del viento, evidenciando la dependencia directa de la energía generada respecto al recurso eólico disponible.

A velocidades bajas, comprendidas entre 3 m/s y 5 m/s, las potencias registradas son relativamente reducidas, alcanzando valores de potencia mecánica de 3,66 W, 10 W y 24,9 W, respectivamente. De igual manera, la potencia eléctrica entregada al banco de baterías presenta valores de 0,5 W, 5,51 W y 16,16 W.

Este comportamiento se debe a que la energía cinética disponible en el viento es limitada para velocidades reducidas.

### 39. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales muestran que existe una relación directamente proporcional entre la velocidad del viento y la potencia generada por el aerogenerador. Además, se comprobó que la potencia eléctrica entregada al banco de baterías es ligeramente inferior a la potencia mecánica desarrollada por el rotor debido a las pérdidas inherentes al proceso de conversión y almacenamiento de energía. No obstante, el sistema presentó un comportamiento estable y eficiente en todo el rango de velocidades evaluado, evidenciando la adecuada operación del controlador de carga y del sistema de almacenamiento energético.

### 40. RECOMENDACIONES

- Verificar el estado de las conexiones eléctricas antes de iniciar la práctica.
- Realiza las debidas prácticas con un rango más amplio de velocidades de viento
- Incrementar el número de mediciones para cada condición de operación
- Verificar periódicamente el estado y la calibración de los instrumentos de medición.
- Mantener en óptimas condiciones el sistema de almacenamiento y el controlador de carga.
- Analizar las pérdidas energéticas presentes en el sistema.
- Monitorear continuamente la tensión y corriente del banco de baterías.

## Capítulo IV: Discusión de los resultados

### 4.1 Carga de la batería (8802-12)

- **Relación entre incremento de voltaje y disminución de corriente durante la carga:**

Durante la práctica se observó una relación inversa entre el voltaje y la corriente de carga del banco de baterías de plomo-ácido. En la etapa inicial de carga, el dinamómetro/fuente de alimentación suministró una corriente constante de aproximadamente 0,92 A, mientras el voltaje de la batería aumentó progresivamente desde su valor inicial hasta alcanzar el voltaje de gaseo (14,4 V).

Una vez alcanzado este nivel de tensión, el cargador mantuvo el voltaje prácticamente constante y la corriente comenzó a disminuir gradualmente hasta aproximadamente 0,23 A, debido a que la batería se encontraba cada vez más cercana a su estado de carga completa y requería una menor corriente para continuar el proceso de carga.

Finalmente, el sistema pasó a la etapa de flotación (13,8 V), donde el voltaje se estabilizó y la corriente permaneció en un valor reducido, suficiente para compensar las pérdidas internas y mantener la batería completamente cargada sin provocar sobrecarga.

En consecuencia, la práctica demuestra que, a medida que el voltaje de la batería aumenta y alcanza el nivel de carga establecido por la fuente de alimentación, la corriente de carga disminuye progresivamente.

Esta relación inversa es característica del método de carga de voltaje constante empleado para baterías de plomo-ácido y garantiza una carga eficiente y segura.

- **Identificación de las etapas: carga inicial, voltaje de gaseo (14,4 V) y voltaje flotación (13,8):** El proceso de carga se puede dividir en tres etapas claramente diferenciadas.

**Etapas de carga inicial o de corriente constante:** En esta etapa la batería se encuentra descargada (12 V) y admite la máxima corriente de carga programada (0,92 A) lo que hace que la mayor parte de la energía suministrada se utilice para restaurar la capacidad de la batería.

**Etapas de voltaje de gaseo (14,4 V):** Al alcanzar aproximadamente 14,4 V, la batería entra en la región de gaseo. En este punto el cargador mantiene el voltaje constante y la corriente comienza a disminuir progresivamente. Este comportamiento evita una sobrecarga excesiva y limita la producción de gases generados por la electrólisis del agua del electrolito.

**Etapas de voltaje de flotación (13,8 V):** Una vez que la corriente disminuye hasta valores bajos, el cargador reduce automáticamente el voltaje a aproximadamente 13,8 V, conocido como voltaje de flotación. Esta condición únicamente circula una pequeña corriente destinada a compensar las pérdidas internas de las baterías, permitiendo mantenerla completamente cargada sin acelerar su deterioro.

- **Eficiencia del proceso de carga y estabilidad del sistema:** Los resultados muestran que el sistema de carga operó de manera estable y eficiente durante toda la práctica. El dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes controló adecuadamente la corriente y el voltaje, realizando la transición automática entre las diferentes etapas de carga.

La potencia eléctrica suministrada durante la carga puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$P = V * I$$

Donde:

P = Potencia eléctrica suministrada a la batería (W).

V = Voltaje de carga (V).

$I$  = corriente de carga (A).

Asimismo, la energía trasferida al banco de baterías durante todo el proceso de carga se expresa mediante:

$$E = \int P dt$$

$E$  = Energía suministrada a la batería (Wh)

$P$  = potencia eléctrica instantánea (W).

$dt$  = intervalo diferencial de tiempo del proceso de carga.

Esta ecuación muestra que la energía almacenada depende de la potencia suministrada durante todo el proceso de carga. Por esta razón, el controlador aumenta o disminuye la potencia de acuerdo con las necesidades de la batería, permitiendo que la energía sea aprovechada de forma adecuada durante cada etapa de carga.

La estabilidad del sistema se evidenció por que el controlador mantuvo un funcionamiento continuo y realizó automáticamente la transición entre la etapa de corriente constante, el voltaje de gaseo y el voltaje de flotación, manteniendo el proceso de carga bajo condiciones controladas. En conjunto, este comportamiento demuestra que el sistema administró correctamente la energía suministrada al banco de baterías, garantizando una carga eficiente, estable y segura.

- **Aumento de resistencia interna conforme avanza la carga:** Durante el proceso de carga se evidencia un incremento progresivo de la resistencia interna del banco de baterías de plomo-ácido. Cuando la batería se encuentra descargada, su resistencia interna es relativamente baja, lo que permite admitir una corriente de carga elevada. Sin embargo, conforme aumenta el estado de carga y disminuye la cantidad de sulfato de plomo presente en las placas debido a la reversión de las reacciones electroquímicas, la batería ofrece una

mayor oposición al paso de la corriente. Como consecuencia, el cargador reduce automáticamente la corriente suministrada mientras mantiene prácticamente el voltaje constante.

El comportamiento eléctrico de una batería describirse mediante la siguiente ecuación,

$$V = E - I * R$$

Donde

**V** = Voltaje en los terminales de la batería (V).

**E** = Fuerza electromotriz (FEM) o voltaje interno generado por las reacciones electroquímicas de la batería (A).

**I** = Corriente de carga que circula por la batería (A).

**R** = Resistencia interna de la batería (Ohm).

Esta ecuación indica que el voltaje disponible en los terminales de la batería está influenciado por la caída de tensión producida por su resistencia interna. A medida que la resistencia interna aumenta, también lo hace la caída de tensión interna, lo que reduce la corriente que la batería puede admitir durante el proceso de carga.

La resistencia también puede analizarse mediante la expresión:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

Donde:

**R** = Resistencia equivalente (Ohm).

**$\Delta V$**  = Variación del voltaje entre dos estados de operación (V).

**$\Delta I$**  = Variación de la corriente entre esos mismos estados de operación (A).

En la presente práctica, esta expresión se emplea como un modelo teórico para describir el comportamiento eléctrico del banco de baterías durante el proceso de carga. La

determinación cuantitativa de la resistencia interna requiere la aplicación de procedimientos específicos de caracterización electroquímica, por lo que el análisis realizado se centra en la interpretación del comportamiento experimental observado.

En este sentido, los resultados obtenidos son consistentes con un incremento progresivo de la resistencia interna, evidenciando el voltaje aumentó hasta alcanzar el voltaje de gaseo (14,4 V).

Este comportamiento se evidencia por la disminución de la corriente de carga desde 0,92 A hasta 0,23 A, mientras el voltaje aumentó hasta alcanzar el voltaje de gaseo (14,4 V) y posteriormente se estabilizó en el voltaje de flotación (13,8 V). Conforme la batería incrementa su estado de carga, las reacciones electroquímicas reducen la cantidad de sulfato de plomo presentes en las placas y aumenta la oposición interna al paso de la corriente.

- **Tasa de carga:** Los resultados obtenidos muestran que el banco de baterías presentó un comportamiento de carga acorde con el método de carga rápida empleado durante la práctica. En la etapa inicial (0-30 minutos), el voltaje aumentó desde 12,0 V hasta 14,4 V, mientras la corriente de carga se mantuvo constante en 0,92 A, lo que corresponde a una tasa de carga de aproximadamente 0,102 C ( $\frac{0,92\text{ A}}{9\text{ Ah}} = 0,102\text{ C}$ ).

Esta condición permitió que la batería almacenara energía a una velocidad relativamente alta, característica de la etapa de corriente constante. Una vez alcanzado el voltaje de gaseo (14,4 V), el cargador mantuvo constante la tensión y redujo progresivamente la corriente de carga desde 0,92 A hasta 0,23 A entre los 35 y 65 minutos.

En consecuencia, la tasa de carga disminuyó de 0,102 C a 0,026 C ( $\frac{0,23\text{ A}}{9\text{ Ah}} = 0,026\text{ C}$ ), reflejando que la batería requería cada vez menos corriente a medida que aumentaba su estado de carga.

Finalmente, durante la etapa de flotación (75-90 minutos), el sistema estabilizó el voltaje en 13,8 V y mantuvo una corriente aproximada a 0,23 A (0,026 C), suficiente para compensar las pérdidas internas y conservar la batería completamente cargada sin producir sobrecargas. Estos resultados muestran que la tasa de carga es mayor cuando la batería presenta un bajo estado de carga y disminuye progresivamente conforme la batería se va cargando, hasta llegar a su máxima capacidad.

#### **4.2 Descarga parcial (8802-12)**

- **Comportamiento del voltaje con corriente constante (~4 A):** Durante la práctica de descarga parcial del banco de baterías de plomo-ácido (8802-12), el dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes mantuvo una corriente de descarga prácticamente constante de 4 A, con valores comprendidos entre 3,998 A y 4 A, lo que representa una variación inferior al 0,05 %.

Esta estabilidad permitió evaluar exclusivamente el comportamiento del voltaje durante la descarga, sin que existieran variaciones significativas en la corriente que alteraran los resultados.

Bajo esta condición, el voltaje disminuyó progresivamente desde 48 V al inicio de la práctica hasta 36,5 V al finalizar los 60 minutos de descarga, lo que representa una reducción de 11,5 V, equivalente a un 23,96 % respecto al voltaje inicial. Esta disminución evidencia la reducción progresiva del estado de carga (SOC) del banco de baterías como consecuencia de las reacciones electroquímicas que ocurren durante la descarga. A medida



que el estado de carga (SOC) disminuye, aumenta la profundidad de descarga (DoD), lo que indica que una mayor fracción de la capacidad nominal ( $C = 9\text{Ah}$ ) ha sido utilizada durante el proceso de descarga.

- **Caída progresiva del voltaje por consumo de material activo:** Los resultados muestran que durante los primeros 30 minutos el voltaje disminuyó de 48 V a 44,7 V, equivalente a una reducción del 6,88 %, mientras que en los últimos 30 minutos descendió desde 44,7 V hasta 36,5 V, correspondiente a una disminución adicional del 18,34 %.

Este comportamiento indica que la velocidad de caída del voltaje aumenta conforme el banco de baterías se aproxima a un estado de descarga más profundo, debido a la transformación progresiva del material activo en sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ) y al incremento de la resistencia interna.

Durante este proceso, el plomo (Pb) y el dióxido de plomo ( $\text{PbO}_2$ ) reaccionan con el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), formando sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ), lo que reduce progresivamente la concentración del electrolito y limita la capacidad de la batería para mantener su diferencia de potencial.

Además, la disminución de la concentración del electrolito y la formación de sulfato de plomo sobre las placas incrementan la resistencia interna del banco de baterías, favoreciendo una mayor caída de tensión durante la descarga.

Esto quiere decir que la reducción continua del voltaje durante la descarga está directamente relacionada con el consumo del material activo presente en las placas de la batería.

- **Relación entre energía entregada y tiempo de descarga:** A partir de los resultados obtenidos durante la descarga parcial del banco de baterías de plomo-ácido, muestran que

la energía entregada aumentó progresivamente desde 12,68 Wh a los 5 minutos hasta 173,73 Wh a los 60 minutos, lo que confirma que el banco de baterías mantuvo el suministro de energía durante toda la práctica bajo una corriente prácticamente constante de 4 A.

Esto quiere decir que la energía entregada por el banco de baterías presenta una relación directamente proporcional con el tiempo de descarga. Esto significa que conforme transcurre el tiempo, la batería continúa suministrando energía a la carga, por lo que la energía acumulada aumenta progresivamente.

Sin embargo, aunque la energía acumulada aumenta con el tiempo, la potencia suministrada a la carga disminuye progresivamente debido a la reducción del voltaje. Por lo tanto, existe una relación directa entre la energía entregada y el tiempo de descarga, ya que a mayor tiempo de funcionamiento mayor es la energía acumulada entregada por la batería.

Nos obstante, debido a la disminución progresiva del voltaje ocasionada por el consumo del material activo y el aumento de la resistencia interna, la velocidad con la que se entrega esa energía es cada vez menor hacia el final del proceso de descarga.

- **Efecto de la resistencia interna en la reducción de potencia:** Durante la descarga parcial del banco de baterías de plomo-ácido se observó una disminución progresiva de la potencia entregada a la carga, pasando de 191,90 W al inicio de la prueba a 146 W al finalizar la práctica. Esta variación representa una reducción de 45,90 W equivalente al 23,92 % respecto a la potencia inicial.

Dado que la corriente de descarga se mantuvo prácticamente constante en 4 A, la disminución de la potencia se debe principalmente a la reducción del voltaje del banco de

baterías, el cual descendió de 48 V a 36,5 V (una disminución del 23,96 %). Este comportamiento se explica por el incremento de la resistencia interna de las baterías conforme avanza la descarga.

Al aumentar la resistencia, se produce una mayor caída de tensión dentro de la batería, por lo que una parte de la energía generada por las reacciones electroquímicas se disipa en forma de calor y no está disponible en los terminales de salida.

En consecuencia, el voltaje suministrado a la carga disminuye y, debido a que la potencia eléctrica depende del producto entre el voltaje y la corriente ( $P = V \times I$ ), la potencia entregada también se reduce, aun cuando la corriente permanezca prácticamente constante.

- **Tasa de descarga:** Durante la práctica, la descarga del banco de baterías se realizó bajo una corriente constante prácticamente constante de 4 A, lo que corresponde a una tasa de descarga de aproximadamente 0,44 C, considerando la capacidad nominal del banco de baterías de ( $C = 9 \text{ Ah}$ ).

La corriente únicamente presentó una variación entre 3,998 A y 4 A, equivalente a menos del 0,05% lo que confirma la estabilidad del sistema de descarga controlado mediante el dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes.

Aunque la tasa de descarga permaneció constante durante el ensayo, el comportamiento eléctrico del banco de baterías evidenció una disminución progresiva de su capacidad para suministrar energía.

Esto se reflejó en la reducción del voltaje, que descendió de 48 V a 36,5 V (23,96 %), y en la disminución de la potencia entregada a la carga, que pasó de 191,90 W a 146 W (23,92%). Aunque la tasa de descarga permaneció constante durante todo el ensayo (0,44 C), el banco de baterías presentó una disminución progresiva del voltaje y de la potencia

suministrada, como consecuencia de la reducción del estado de carga y del incremento de la resistencia interna.

#### **4.3 Prueba de sulfatación (8802-12)**

- **Diferencias en la velocidad de caída del voltaje entre baterías A, B Y C:** los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas en la velocidad de caída del voltaje durante la prueba de sulfatación. La batería A presentó el comportamiento más estable, registrando una disminución de 0,17 V durante los 60 segundos de prueba, equivalente a una velocidad promedio de 0,0028 V/s. En comparación, la batería B experimentó una caída de 0,33 V, correspondiente a una velocidad de 0,0055 V/s, aproximadamente el doble de la observada en la batería A. Finalmente, la batería C presentó la mayor disminución de tensión, con una caída de 0,47 V, equivalente a 0,0078 V/s, lo que representa una velocidad de degradación aproximadamente 2,8 veces superior a la batería A. Estos resultados demuestran que, a medida que aumenta el grado de sulfatación, la batería pierde la capacidad de mantener estable su voltaje cuando es sometida a una carga de descarga constante.
- **Relación entre la caída de tensión y el grado de sulfatación:** Los resultados obtenidos en la práctica muestran una relación directa entre la caída de tensión y el grado de sulfatación del banco de baterías. La batería A presentó la menor disminución de voltaje (1,31 %), manteniendo la tensión por encima de 12,8 V durante toda la prueba, lo que indica un bajo grado de sulfatación y un adecuado funcionamiento electroquímico. Por el contrario, la batería B registró una disminución de 0,33 V, equivalente al 2,55 %, alcanzando un voltaje final de 12,60 V, lo que evidencia una sulfatación moderada que limita parcialmente su capacidad para mantener el potencial eléctrico bajo carga. En el caso de la batería C, la caída de tensión fue de 0,47 V, correspondiente al 3,69 %, lo que indica un alto grado de sulfatación y un funcionamiento deficiente.

descendiendo hasta 12,28 V al finalizar la práctica. Este comportamiento indica una sulfatación severa, caracterizada por una rápida disminución del voltaje debido al deterioro del material activo de las placas y el incremento de la resistencia interna.

- **Identificación del estado de salud (buena, moderada y severa):** De acuerdo con el procedimiento establecido por FESTO y los resultados obtenidos, fue posible identificar claramente el estado de salud de cada batería. La batería A puede clasificarse como una batería en buen estado, ya que durante toda la prueba mantuvo un voltaje superior a 12,8 V, finalizando en 12,82 V, condición que indica una adecuada capacidad para sostener la tensión durante la descarga. La batería B corresponde a una batería con sulfatación moderada, debido a que presentó una caída de tensión más pronunciada y finalizó con voltaje de 12,60 V, reflejando una disminución parcial de su capacidad electroquímica. Finalmente, la batería C se identifica con sulfatación severa, puesto que el voltaje descendió por debajo de 12,6 V antes de los 30 segundos y terminó en 12,28 V, comportamiento característico de una batería con un elevado nivel de deterioro y una importante pérdida de capacidad de almacenamiento.
- **Pérdida de capacidad de almacenamiento por degradación:** La degradación provocada por la sulfatación afecta directamente la capacidad de almacenamiento de energía del banco de baterías. A medida que aumenta la formación de cristales de sulfato de plomo sobre las placas, disminuye la cantidad de material activo disponible para participar en las reacciones electroquímicas, reduciendo la capacidad de almacenar y suministrar energía. Los resultados experimentales muestran que la batería A conservó una mayor estabilidad de voltaje, presentado únicamente una disminución del 1,31 %, lo que indica una baja pérdida de capacidad de almacenamiento. En la batería B, la reducción fue del 2,55 %,

evidenciando una pérdida moderada de capacidad. Por su degradación considerable y una menor capacidad de voltaje (3,69 %), reflejando una almacenada bajo condiciones de descarga

- **Tasa de degradación del voltaje por efecto de la sulfatación:** Para evaluar la velocidad con la que disminuye el voltaje durante la prueba de sulfatación, se calculó la tasa de degradación mediante la relación entre la variación del voltaje y el tiempo de ensayo, expresada por la ecuación:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T}$$

$\Delta V$  = variación de voltaje (V)

$\Delta T$  = tiempo transcurrido durante la prueba (S).

Teniendo en cuenta que el tiempo total de la práctica fue de 60 s, la batería A presentó una variación de voltaje de 0,17 V, obteniendo una tasa de degradación de 0,0028 V/s. La batería B registró una variación de 0,33 V, correspondiente a una tasa de 0,0055 V/s, mientras que la batería C presentó la mayor variación de voltaje, con 47 V, equivalente a una tasa de 0,0078 V/s.

Estos resultados muestran que la batería C presentó la mayor velocidad de degradación del voltaje, seguida por la batería B, mientras que la batería A registró la menor tasa de degradación durante el ensayo. Esto quiere decir que, conforme aumenta el grado de sulfatación, el voltaje disminuye más rápidamente cuando la batería es sometida a una misma condición de descarga.

#### **4.4 Ajuste del controlador del aerogenerador (8216-02)**

- **Activación del límite de tensión (~56,5 V) como protección:** Los resultados obtenidos durante la calibración muestran que el controlador del aerogenerador activó su sistema de protección cuando la tensión de entrada alcanzó aproximadamente 56,5 V. La activación de este límite de tensión constituye un mecanismo de protección del sistema, ya que impide que el banco de baterías continúe recibiendo energía una vez alcanzado de voltaje máximo establecido. De esta manera, se evita la sobrecarga de las baterías, reduciendo el riesgo de calentamiento excesivo, generación de gases y deterioro prematuro de sus componentes internos. Los resultados obtenidos demuestran que el controlador respondió correctamente al valor de tensión programando, garantizando una operación segura del sistema de almacenamiento.
- **Funcionamiento del sistema de regulación de carga:** Durante la práctica se comprobó el correcto funcionamiento del sistema de regulación de carga del controlador del aerogenerador. A medida que aumentó la tensión suministrada por la fuente de alimentación, el controlador supervisó continuamente el voltaje del banco de baterías hasta alcanzar el valor máximo programado de aproximadamente 56,5 V. Una vez alcanzado este valor, el controlador intervino automáticamente limitando el proceso de carga, comportamiento que fue identificado mediante el cambio en el estado de LED indicador. Esta respuesta confirma que el sistema regula de manera automática la energía generada por el aerogenerador, evitando que el banco de baterías reciba una tensión superior a la establecida. En consecuencia, el controlador garantiza que la carga se realice dentro de condiciones seguras y constituye a mantener la estabilidad operativa del sistema eólico.

- **Efecto de histéresis (~2 V) en la estabilidad del sistema:** La histéresis programada en el controlador, con un valor aproximado de 2 V, desempeña un papel fundamental en la estabilidad del sistema de regulación. Su función consiste en establecer una diferencia entre el voltaje de desconexión y el voltaje de reconexión durante el proceso de carga. Para verificar experimentalmente este comportamiento, la histéresis se determinó mediante la siguiente expresión:

$$H = V_{des} - V_{conex}$$

H = histéresis (V).

V<sub>des</sub> = voltaje de desconexión (56,5).

V<sub>conex</sub> = voltaje de reconexión (54,5).

Los valores obtenidos durante la práctica:

$$H = 56.5 - 54.5 = 2.0 \text{ V}$$

El resultado obtenido coincide con la histéresis programada en el controlador. Este resultado indica que la histéresis medida durante la práctica coincide con el valor programado por el fabricante, evidenciando un correcto funcionamiento del controlador. En consecuencia, el margen de 2 V evita que el sistema conecte y desconecte continuamente el proceso de carga ante pequeñas variaciones del voltaje, reduciendo las oscilaciones del controlador y proporcionando una regulación más estable y eficiente del banco de baterías.

- **Protección del banco de baterías contra sobrecarga:** la principal función del controlador calibrado durante la práctica consiste en proteger el banco de baterías frente a condiciones de sobrecarga. Los resultados experimentales evidenciaron que el controlador limitó automáticamente el proceso de carga al alcanzar una tensión



aproximada de 56,5 V, impidiendo que el voltaje continuara incrementándose por encima del valor establecida.

#### 4.5 Almacenamiento de energía eólica en baterías.

- **Relación directa entre velocidad del viento y corriente de carga:** De acuerdo con los resultados de la práctica, se observa una relación directamente proporcional entre la velocidad del viento y la corriente de carga del banco de baterías. A medida que la velocidad del viento aumenta de 3 m/s a 10 m/s, la corriente de carga se incrementa de 0,01 a 3,20 A. este comportamiento se debe a que un mayor viento hace girar el rotor a una velocidad más elevada (de 469 r/min a 1010 r/min), aumentando el par y la potencia mecánica disponible en el aerogenerador (de 3,66 W a 220,8 W). En respuesta, el controlador incrementa la corriente suministrada a la batería para aprovechar la mayor energía generada y mantener el funcionamiento del sistema cercano al punto de Máxima potencia. Como consecuencia, también aumenta la potencia eléctrica entregada al banco de baterías, pasando de 0,5 W a 173,4 W, mientras que la tensión de carga solo presenta un incremento gradual de 49,81 V a 54,2 V. Eso quiere decir que los datos experimentales demuestran que, a mayor velocidad del viento, mayor es la corriente de carga de la batería, debido al incremento de la potencia mecánica generada por el aerogenerador y a la acción del controlador, que ajusta la carga para extraer la máxima energía disponible del viento.
- **Integración aerogenerador-controlador-banco de baterías:** Los resultados de la práctica muestran que el aerogenerador, el controlador y el banco de baterías trabajan de forma integrada para convertir y almacenar en la energía eólica de manera eficiente. A medida que aumenta la velocidad del viento, el aerogenerador incrementa su

velocidad de rotación, el par y la potencia mecánica generada. Esta energía es convertida por el alternador en energía eléctrica y enviada al controlador, el cual regula la tensión y la corriente suministradas al banco de baterías. Gracias a esta integración, la corriente de carga aumenta de 0,01 A a 3,20 A, 173,4 W, permitiendo un proceso de carga seguro y estable.

- **Limitación de carga por el controlador al alcanzar el umbral de tensión:** Durante la práctica se observó que la tensión del banco de baterías aumentó progresivamente desde 49, 81 V hasta 54,2 V conforme se incrementó la velocidad del viento. El controlador permite aumentar la corriente de carga mientras la tensión de la batería permanece por debajo del valor máximo establecido. Cuando la batería alcanza el umbral de tensión de carga, el controlador limita o reduce la corriente suministrada para evitar la sobrecarga, el sobrecalentamiento y el deterioro de las baterías. Aunque en esta práctica la tensión máxima registrada fue 54,2, todavía no se alcanzó el punto de regulación total del controlador, por lo que el sistema continuó aumentando la corriente de carga.
- **Eficiencia del sistema de conversión y almacenamiento de energía eólica:** Los datos obtenidos muestran que, al aumentar la velocidad del viento, también aumenta la potencia mecánica disponible y la potencia eléctrica almacenada en las baterías. Por ejemplo, para una velocidad del viento de 10 m/s, el aerogenerador desarrolló una potencia mecánica de 220,8 W, mientras que el banco de baterías recibió 173,4 W de potencia eléctrica.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} * 100$$

$\eta$  = Eficiencia del sistema (%).

$P_{\text{salida}}$  = Potencia eléctrica almacenada en las baterías (W).

$P_{\text{entrada}}$  = Potencia mecánica desarrollada por el aerogenerador (W).

Sustituye los valores obtenidos durante práctica:

$$\eta = \frac{173,4}{220,8} * 100 = 78,53 \%$$

Este resultado indica que el sistema aprovechó aproximadamente el 78,5 % de la potencia mecánica disponible para almacenarla en el banco de baterías. El porcentaje restante (21,47 %) corresponde a pérdidas producidas durante las etapas de conversión mecánica-eléctrica y en el proceso de carga, asociadas principalmente al generador, el rectificador, el controlador de carga, los conductores y las pérdidas internas de las baterías.

- **Tasa de carga:** La tasa de carga del banco de baterías se determinó a partir de la relación entre la corriente de carga medida durante la práctica y la capacidad nominal del banco de batería (9 Ah). Los resultados obtenidos muestran que la tasa de carga aumenta progresivamente conforme se incrementa la velocidad del viento, debido a que el aerogenerador genera una mayor potencia mecánica y, en consecuencia, el controlador suministra una mayor corriente de carga al banco de baterías. Durante la práctica, para una velocidad del viento de 3 m/s se registró una corriente de carga de 0,01 A, equivalente a una tasa de 0,001 C (0,11 %), lo que representa una carga muy baja. A medida que la velocidad del viento aumentó hasta 10 m/s, la corriente de carga alcanzó 3,20 A, correspondiente a una tasa de 0,356 (35,56 %). Este comportamiento confirma que existe una relación directa entre la velocidad del viento y la tasa de carga, ya que una mayor disponibilidad de energía eólica permite incrementar la rapidez con la que el banco de baterías almacena energía. Asimismo, se observa que a velocidades de viento

elevadas la tasa de carga aumenta considerablemente, por lo que el controlador desempeña un papel fundamental al regular la corriente suministrada al banco de baterías, garantizando un proceso de carga seguro y evitando condiciones que puedan comprometer la vida útil del sistema de almacenamiento.

#### **4.6 Conclusiones**

- Las prácticas experimentales permitieron evaluar la eficiencia de carga y descarga del banco de baterías de plomo-ácido alimentando con energía eólica. Durante las pruebas se monitorearon parámetros eléctricos como la tensión, la corriente y el estado de carga, lo que permitió analizar el comportamiento de las baterías y comprender los procesos electroquímicos que ocurren durante el almacenamiento y la entrega de energía.
- El estudio de los procesos de carga y descarga demostró que el funcionamiento de las baterías de plomo-ácido depende directamente de las reacciones electroquímicas que ocurren en los electrodos de plomo y dióxido de plomo, así como de la como de la concentración del electrolito. Asimismo, se evidencio que la formación de sulfato de plomo constituye un fenómeno natural de la descarga, pero su acumulación excesiva puede reducir la capacidad de almacenamiento, la tasa de carga y descarga, y disminuir la vida útil del sistema de baterías.
- Las pruebas realizadas de sulfatación, carga, descarga y protección contra sobrecargas permitieron comparar el rendimiento del sistema a partir de los parámetros eléctricos registrados y de los ensayos experimentales. Los resultados obtenidos demostraron que la regulación adecuada de la tensión de carga y supervisión continua de los parámetros eléctricos contribuyen significativamente a preservar la capacidad de las baterías, evitar

condiciones de operación críticas y mejorar la confiabilidad del sistema de almacenamiento energético.

- La práctica de almacenamiento de la energía generada por el aerogenerador permitió verificar que las baterías de plomo-ácido son una alternativa viable para su utilización en sistemas de energía renovable. Asimismo, se observó que la energía producida por el sistema eólico puede almacenarse y utilizarse de manera estable, resaltando el papel que desempeña las baterías para asegurar la continuidad del suministro eléctrico cuando la generación de energía no es constante.

## **Recursos**

### **5.1 Recursos humanos**

**Tabla 9** *Detalle de los recursos empleados*

| <b>Nombre</b>                         | <b>Función o cargo</b> | <b>Aporte al proyecto</b> |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| <b>Vladimir Jaramillo García, PhD</b> | Docente                | Tutor del proyecto        |
| <b>Darlin Quimis Pico</b>             | Estudiante             | Autor                     |

Nota: Recursos humanos y su aporte empleado en el desarrollo de la tesis. Fuente: propia.

### **5.2 Recursos Institucionales**

**Tabla 10** *Detalle de los recursos institucionales ocupados*

| <b>Equipos/laboratorio/software<br/>(otros).</b> | <b>Área</b> | <b>Facultad</b> |
|--------------------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                                  |             |                 |

|                                                      |                         |                      |
|------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| Fuente de alimentación                               | Laboratorio potencia    | Ingeniería eléctrica |
| Dinamómetro/fuente de alimentación cuatro cuadrantes | Laboratorio potencial   | Ingeniería eléctrica |
| Conectores                                           | Laboratorio de potencia | Ingeniería eléctrica |
| Amperímetro                                          | Laboratorio de potencia | Ingeniería eléctrica |
| Alternador/controlador de aerogenerador              | Laboratorio de potencia | Ingeniería eléctrica |

### 5.3 Recursos materiales y Económicos

**Tabla 11** *Detalles de los recursos materiales y económicos*

| N° | Descripción                               | Cantidad | Valor   | Valor total \$ |
|----|-------------------------------------------|----------|---------|----------------|
| 1  | Banco de batería de plomo-ácido (8802-12) | 1        | 1898,04 | 1898,04        |
| 2  |                                           |          | total   | 1898,04        |

## 5.4 Cronograma

Tabla 12 *Cronograma de Actividades de la fase 1*

| M<br>Actividades                                                                         | Año 2025   |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--|--|--|---------|--|--|--|-----------|--|--|--|-----------|--|--|--|-------|--|--|--|---------|--|--|--|
|                                                                                          | Septiembre |  |  |  | Octubre |  |  |  | Noviembre |  |  |  | Diciembre |  |  |  | Enero |  |  |  | Febrero |  |  |  |
|                                                                                          |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Socialización taller de Anteproyecto.                                                    |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Aprobación del tema en general y designación de tutor.                                   |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Determinación de tema y horarios por parte del tutor                                     |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Elaboración de tema tentativo y variables dependiente e independiente de Anteproyecto.   |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Elaboración de tema Anteproyecto.                                                        |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Elaboración de matriz                                                                    |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Elaboración de Resumen y revisión por parte del tutor                                    |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Elaboración de Introducción                                                              |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Elaboración de Antecedentes, Justificación, Marco teórico y revisión por parte del tutor |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Revisión y corrección del Anteproyecto por parte del tutor                               |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Entrega del anteproyecto a la comisión académica                                         |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |
| Entrega del proyecto final, petición de tribunal y fecha de sustentación                 |            |  |  |  |         |  |  |  |           |  |  |  |           |  |  |  |       |  |  |  |         |  |  |  |

Tabla 13 Cronograma de Actividades de la fase 2

| <div> <div>Meses</div> <div>M</div> <div>Actividades</div> </div> | Año 2026 |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------------------------------------------------|----------|--|--|--|------|--|--|--|-------|--|--|--|-------|--|--|--|--------|--|--|--|------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                                                                   | Abril    |  |  |  | Mayo |  |  |  | Junio |  |  |  | Julio |  |  |  | Agosto |  |  |  | Septiembre |  |  |  |  |  |  |  |
|                                                                   |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Desarrollo del Capítulo I: El problema                            |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Adquisición del Dinamómetro de cuatro cuadrantes                  |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Desarrollo del Capítulo II: Marco Teórico                         |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Desarrollo del Capítulo III: Diseño del Proyecto                  |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Seguimiento del Tutor en el formato de tesis                      |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Desarrollo de Prácticas                                           |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Desarrollo del Capítulo IV: Discusión de los resultados           |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Revisión y corrección del Proyecto                                |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Conclusiones y Anexos                                             |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Entrega del proyecto al tutor y correcciones                      |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Entrega del proyecto final con la documentación                   |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |
| Designación de fecha de sustentación                              |          |  |  |  |      |  |  |  |       |  |  |  |       |  |  |  |        |  |  |  |            |  |  |  |  |  |  |  |



## Referencias

- ADB. (2018). Handbook on Battery Energy Storage System. In ADB, *Handbook on Battery Energy Storage System* (p. 94). <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/479891/handbook-battery-energy-storage-system.pdf>.
- Asian Development Bank. (2018). Handbook on Battery Energy Storage System. In A. D. Bank, *Handbook on Battery Energy Storage System*. Asian Development Bank.
- Atlas. (2024). *Atlas Caspo*. Retrieved from Altas Caspo: <https://www.atlascopco.com/es-ec/construction-equipment/resources/generators-guide/what-is-battery-energy-storage-system>
- Auciello, O. (2021). Baterías de ion litio: características y aplicaciones. In O. Auciello, *Baterías de ion litio: características y aplicaciones* (p. 18). <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2907/3616>.
- Bank, w. (2021). Recycling of used lead-acid batteries. In williams, *Recycling of used lead-acid batteries*. world bank.
- Benkhira, S. (2025). *Universidad Zaragoza*. Retrieved from Universidad Zaragoza: <https://zaguan.unizar.es/record/164745/files/TAZ-TFG-2025-3076.pdf>
- Cervantes. (2024). Metodología cuantitativa . In Cervantes, *Metodología cuantitativa* . [https://cvc.cervantes.es/ensenanza/biblioteca\\_ele/diccio\\_ele/diccionario/metodologiacuantitativa.htm](https://cvc.cervantes.es/ensenanza/biblioteca_ele/diccio_ele/diccionario/metodologiacuantitativa.htm).
- Chawla, N., & Safa, M. (2019). Sodium Batteries: A Review on Sodium-Sulfur and Sodium-Air Batteries. *Electronics*. Retrieved from MDPI: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/10/1201>
- Daniel, P. E. (2008). Cargador de baterias de plomo acido. *escuela de ingenieria electrica y electronica* , p. 7.

DOE. (1995). Introducción a las baterías de almacenamiento de plomo ácido. In DOE, *Introducción a las baterías de almacenamiento de plomo ácido* (p. 5).

<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc665693/m1/3/>.

Dorman, L. (2021). Compendium li-ion batteries . In L. Dorman, *Lydian Dorman* (p. 2).

<https://www.dke.de/resource/blob/2098130/009695f3ee56b87c2860bcca3a978659/kompendium-li-io-batterien-2022-en-data.pdf>.

Fernández, H., Martínez I., A., Guzmán A., V., & Giménez, M. I. (2005). Modelaje y simulación de una batería de plomo ácido mediante fuentes dependientes de voltaje–corriente y bloques de funciones aritméticas. *UCT*. Retrieved from Scielo:

[https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212005000100005&script=sci\\_arttext](https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212005000100005&script=sci_arttext)

Festo. (2024). *Electricity and New Energy*. Retrieved from Electricity and New Energy:

[https://media.festo.com/assets/attachment-files/1aa888f62a1bc6fcc88424baac753767d8be12b3077275bbcbcbce855b83710942407c7f018cf17977d2fbbce809807302529f0cf7a35e4f314e8d8755f1936fe/EPT\\_EMS%20Classic\\_584778g1.pdf?sv=2024-08-04&se=2026-06-17T03%3A41%3A35Z&sr=b&](https://media.festo.com/assets/attachment-files/1aa888f62a1bc6fcc88424baac753767d8be12b3077275bbcbcbce855b83710942407c7f018cf17977d2fbbce809807302529f0cf7a35e4f314e8d8755f1936fe/EPT_EMS%20Classic_584778g1.pdf?sv=2024-08-04&se=2026-06-17T03%3A41%3A35Z&sr=b&)

Festo. (2024). *Electricity and New Energy*. Retrieved from Electricity and New Energy:

[https://media.festo.com/assets/attachment-files/1aa888f62a1bc6fcc88424baac753767d8be12b3077275bbcbcbce855b83710942407c7f018cf17977d2fbbce809807302529f0cf7a35e4f314e8d8755f1936fe/EPT\\_EMS%20Classic\\_584778g1.pdf?sv=2024-08-04&se=2026-06-17T03%3A41%3A35Z&sr=b&](https://media.festo.com/assets/attachment-files/1aa888f62a1bc6fcc88424baac753767d8be12b3077275bbcbcbce855b83710942407c7f018cf17977d2fbbce809807302529f0cf7a35e4f314e8d8755f1936fe/EPT_EMS%20Classic_584778g1.pdf?sv=2024-08-04&se=2026-06-17T03%3A41%3A35Z&sr=b&)

González, Á. (2024). *Universidad Politecnica de Madrid*. Retrieved from Universidad Politecnica de Madrid: <https://zagan.unizar.es/record/164745/files/TAZ-TFG-2025-3076.pdf>

- Hioki. (2020). Lead-acid battery handbook. In Hioki, *Lead-acid battery handbook* (p. 3). <https://idm-instrumentos.es/wp-content/uploads/2020/04/Bater%C3%ADas-de-plomo-%C3%A1cido-lead-acid-batteries.pdf>.
- HIOKI E.E. Corporation. (2020). lead-acid battery handbook. In HIOKI, *lead-acid battery handbook* (p. 4). <https://share.google/QemRTvdwj75RodIR3>.
- Leal, M. (2020). Diseño de Aerogeneradores . In M. Leal, *Diseño de Aerogeneradores* (p. 21). <https://www.kimerius.com/app/download/5780377015/Dise%C3%B1o+de+Aerogeneradores.pdf>.
- Mejía, A. E. (2011). Sistemas de almacenamiento de energías y su aplicación en energías renovables . *Sistemas de almacenamiento de energías y su aplicación en energías renovables* , 13.
- Mtsushita. (1999). sealed leadacid batteries. In *sealed leadacid batteries*. [https://www.master-instruments.com.au/files/data\\_sheets/SLA/Panasonic%20SLA%20handbook.pdf](https://www.master-instruments.com.au/files/data_sheets/SLA/Panasonic%20SLA%20handbook.pdf)
- Mur, C. (2019). *Universidad Academia Humanismo Cristiano* . Retrieved from Universidad Academia Humanismo Cristiano : <https://bibliotecadigital.academia.cl/server/api/core/bitstreams/5e635fae-7316-421d-a362-752a291527e9/content>
- Olade. (2025). Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe. In Olade, *Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe* (p. 40). [https://www.olade.org/wp-content/uploads/2025/10/LIBRO\\_ESPANOL\\_FINAL.pdf](https://www.olade.org/wp-content/uploads/2025/10/LIBRO_ESPANOL_FINAL.pdf).
- Olade. (2025). Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe . In Olade, *Libro blanco del almacenamiento de energía en américa latina del caribe* (p. 5). Quito: [https://www.olade.org/wp-content/uploads/2025/10/LIBRO\\_ESPANOL\\_FINAL.pdf](https://www.olade.org/wp-content/uploads/2025/10/LIBRO_ESPANOL_FINAL.pdf).
- Pablo. (2022). introduccion de las baterias de flujo redox. *universidad zaragoza*, 3.

- Pablo, N. (2025). *Sedeci*. Retrieved from Sedeci: <https://sedeci.unlp.edu.ar/handle/10915/187071>
- Pavlov, D. (2017). Lead-Acid Batteries. In E. B.V, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology: A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and Its Influence on the Product* (p. 23). Elsevier.
- Ramirez, G. (2020). opportunités and challenges to integrate electrochemical storage in central american power grids . *scielo* , 4.
- ScienceDirect. (2024). *Almacenamiento de energia* . Retrieved from Almacenamiento de energia : [https://www-sciencedirect-com.translate.goog/topics/engineering/energy-storage?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-sciencedirect-com.translate.goog/topics/engineering/energy-storage?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)
- Sovema. (2018). batteries step by step. In sovema. <https://download.sovemagroup.com/sovema/batteries-step-by-step-the-lead-acid-battery?>
- Stackelberg, K. V., Williams, P. R., Sánchez-Triana, E., Enriquez, S., & Cordova, C. S. (2021). Recycling of Used Lead-Acid Batteries: Guidelines for Appraisal of Environmental Health Impacts. In K. V. Stackelberg, P. R. Williams, E. Sánchez-Triana, & S. Enriquez, *Recycling of Used Lead-Acid Batteries: Guidelines for Appraisal of Environmental Health Impacts*. World Bank Group.

