



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**TEMA:**

EVALUACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD DE POTENCIA EN LAS BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO CON ADITIVOS DE CARBONO

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

**AUTOR (A):**

Cristhian Ismael Carvajal Méndez

**DIRECTOR (A):**

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

Ibarra, 2026



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA  
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Carvajal Mendez Cristhian Ismael
<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO:</b>	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD DE POTENCIA EN LAS BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO CON ADITIVOS DE CARBONO
<b>AUTOR (ES):</b>	Cristhian Ismael Carvajal Mendez
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	05/05/2026
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>	
<b>PROGRAMA:</b>	<input type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero Eléctrico
<b>DIRECTOR /ASESOR:</b>	Ing. Jhonny Javier Barzola Iza, MSc.

**2. CONSTANCIAS**

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 08 días del mes de mayo de 2026.

**EL AUTOR:**

.....

Nombre: Cristhian Ismael Carvajal Méndez



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Yo, Ing. Jhonny Javier Barzola Iza, MSc. en calidad de director del señor estudiante Cristhian Ismael Carvajal Méndez certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema:

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD DE POTENCIA EN LAS BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO CON ADITIVOS DE CARBONO”

Para la obtención del título de Ingeniero(a) Eléctrico(a), aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza, MSc.

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

DEDICATORIA .....	9
AGRADECIMIENTOS .....	10
RESUMEN .....	11
ABSTRACT.....	12
CAPÍTULO I.....	13
INTRODUCCIÓN .....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
1.3 Planteamiento del problema.....	13
1.4 Alcance.....	14
1.5 Justificación .....	15
1.6 Antecedentes .....	16
CAPÍTULO II.....	20
MARCO TEORICO .....	20
2.1 Descripción de la batería de plomo-ácido.....	20
2.1.1 Principios de funcionamiento de la batería plomo-ácido. ....	21
2.1.2 Estructura de las baterías de plomo-ácido .....	21
2.1.3 Consideraciones técnicas .....	22
2.1.4 Pruebas características y mantenimiento .....	23
2.2 Aplicaciones de la batería de plomo-ácido.....	24
2.2.1 Sistemas de arranque .....	24
2.2.2 Sistemas de almacenamiento .....	25
2.2.3 Aplicaciones en energía renovable .....	25
2.2.4 Aplicaciones en movilidad eléctrica (prototipos y limitaciones).....	26
2.2.5 Sistemas de monitoreo de baterías de plomo-ácido.....	27



2.3 Rendimiento de la batería de plomo-ácido.....	28
2.3.1 Características constructivas y evaluación de rendimiento .....	28
2.3.2 Antecedentes en mejoras de rendimiento por modificaciones en los bornes de conexión de la batería.....	29
2.3.3 Antecedentes en mejoras de rendimiento por modificaciones en las placas de la batería .....	31
2.3.4 Antecedentes en mejoras de rendimiento por modificaciones en el ácido de la batería .....	32
2.4 Aditivos para las baterías plomo-ácido .....	33
2.4.1 Antecedentes sobre el uso de aditivos en las baterías de plomo-ácido.....	33
2.4.2 Tipos de aditivos.....	34
2.4.3 Antecedentes sobre el efecto del uso de aditivos en baterías de plomo-ácido.....	35
2.4.4 Selección del grafeno como aditivo de carbono para el estudio.....	36
Capítulo III.....	38
METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	38
Introducción general de la metodología aplicada.....	38
3.1 Delimitación del lugar.....	38
3.1.1 Descripción de mejoras en baterías .....	39
3.2 Metodología .....	39
3.2.1 Diagrama de flujo .....	41
3.2.2 Descripción del funcionamiento del sistema de carga y descarga.....	43
3.3 Materiales.....	44
3.3.1 Baterías de plomo ácido.....	44
3.3.2 Dispositivos de medición.....	46
3.3.3 Placas de desarrollo .....	47



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



3.3.4 Aditivos de carbono .....	47
3.4 Descripción de resultados esperados.....	48
3.4.1 Implementación del sistema de carga y descarga .....	48
3.4.2 Pruebas de funcionamiento.....	51
3.4.3 Modificación de baterías con aditivos de carbono .....	52
3.4.4 Evaluación de baterías .....	66
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>67</b>
<b>Resultados.....</b>	<b>67</b>
4.1 Caracterización inicial de las baterías.....	67
4.1.1 Parámetros de las tres baterías antes de las pruebas .....	69
4.1.2 Descripción de la preparación de cada batería .....	71
4.1.3 Condiciones experimentales de carga y descarga.....	73
4.2 Resultados de las pruebas eléctricas.....	75
4.2.1 Curvas de carga y descarga.....	75
4.2.2 Corriente de descarga .....	88
4.2.3 Densidad de potencia obtenida.....	93
4.3 Análisis microscópico de las placas .....	101
4.3.1 Estereomicroscopio antes de las pruebas.....	101
4.3.2 Estereomicroscopio después de los ciclos.....	103
4.4 Discusión e interpretación de resultados .....	106
4.4.1 Comparación entre los tres escenarios.....	106
4.4.2 Relación entre mejoras estructurales y eléctricas .....	108
4.4.3 Impacto estructural en la vida útil de la batería.....	111
4.4.4 Implicaciones para aplicaciones prácticas .....	113
<b>Bibliografía .....</b>	<b>116</b>



## INDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1</b> Equipo de laboratorio .....	53
<b>Fig. 2</b> Primera mezcla de dióxido de 0.5 ml de silicio con 0.1 gramos de nanografeno ....	55
<b>Fig. 3</b> Mezcla final de 0,5 ml de dióxido de silicio con 0,001 gramos de nanografeno .....	56
<b>Fig. 4</b> Primera mezcla del ácido de batería con nanografeno .....	57
<b>Fig. 5</b> Mezclas finales del ácido de batería con nanografeno .....	58
<b>Fig. 6</b> MEASURY EC Meter Tester TDS Measuring Device for Osmosis Systems .....	59
<b>Fig. 7</b> Stanaway Medidor de prueba de calidad del agua PH/TDS.....	60
<b>Fig. 8</b> JENWAY 6705 UV/Vis. Spectrophotometer .....	62
<b>Fig. 9</b> UV-Vis JENWAY a 265nm mezcla del ácido y nanocarbono.....	62
<b>Fig. 10</b> UV-Vis JENWAY a 350nm mezcla del ácido y nanocarbono.....	63
<b>Fig. 11</b> UV-Vis JENWAY a 550nm mezcla del ácido y nanocarbono.....	64
<b>Fig. 12</b> UV-Vis JENWAY a 265nm mezcla del dióxido de silicio y el nanografeno .....	64
<b>Fig. 13</b> UV-Vis JENWAY a 350nm mezcla del dióxido de silicio y el nanografeno .....	65
<b>Fig. 14</b> UV-Vis JENWAY a 550nm mezcla del dióxido de silicio y el nanografeno .....	65
<b>Fig. 15</b> Voltaje de carga del ciclo 50 de las baterías .....	76
<b>Fig. 16</b> Voltaje de carga del ciclo 100 de las baterías .....	78
<b>Fig. 17</b> Voltaje de carga del ciclo 150 de las baterías .....	80
<b>Fig. 18</b> Voltaje de descarga del ciclo 50 de las baterías .....	82
<b>Fig. 19</b> Voltaje de descarga del ciclo 100 de las baterías.....	84
<b>Fig. 20</b> Voltaje de descarga del ciclo 150 de las baterías.....	86
<b>Fig. 21</b> Corriente del ciclo 50 de las baterías.....	89
<b>Fig. 22</b> Corriente del ciclo 100 de las baterías.....	90
<b>Fig. 23</b> Corriente del ciclo 150 de las baterías.....	92
<b>Fig. 24</b> Densidad de potencia del ciclo 50 de las baterías .....	95



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 25** Densidad de potencia del ciclo 100 de las baterías ..... 97

**Fig. 26** Densidad de potencia del ciclo 150 de las baterías ..... 99

**Fig. 27** Fotos del estereomicroscopio de la batería referencia..... 101

**Fig. 28** Fotos del estereomicroscopio de la batería modificada el acido ..... 102

**Fig. 29** Fotos del estereomicroscopio de la batería modificada la placa negativa..... 103

**Fig. 30** Fotos del estereomicroscopio de la batería referencia después de los 200 ciclos. 104

**Fig. 31** Fotos del estereomicroscopio de la batería modificada el electrolito después de los 200 ciclos ..... 104

**Fig. 32** Fotos del estereomicroscopio de la batería modificada la placa negativa después de los 200 ciclos ..... 105



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por haberme brindado salud, fortaleza, sabiduría y las herramientas necesarias para culminar esta importante etapa de mi vida. Gracias a su guía y bendición, he podido superar cada obstáculo y alcanzar una meta que representa esfuerzo, perseverancia y dedicación.

A mis padres, por su amor, apoyo incondicional y por estar siempre pendientes de mí. Gracias por acompañarme en cada paso, por sus consejos, sacrificios y por motivarme a seguir adelante aun en los momentos más difíciles. Su confianza en mí ha sido fundamental para lograr este objetivo.

A mi abuelita, quien ha sido uno de los pilares más importantes en mi vida. Su ejemplo, amor, enseñanzas y fortaleza han sido inspiración constante para mí. Gran parte de mis logros se los debo a ella, porque con su manera de vivir me enseñó el valor del esfuerzo, la humildad y la perseverancia.

A mis hermanos, por ser un apoyo importante durante este proceso. Gracias por su compañía, por sus palabras de ánimo, por estar presentes de una u otra manera y por recordarme siempre que no estaba solo.

A mi novia, por ser una de las personas que más apoyo me ha brindado durante esta etapa. Gracias por estar presente en cada momento, por tus consejos, paciencia, comprensión y por darme fuerzas cuando más las necesitaba. Tu compañía en los momentos difíciles y tu confianza en mí han sido una gran motivación para seguir adelante y culminar este logro



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por haberme concedido la salud, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida académica.

Expreso mi más sincero agradecimiento al MSc. Ing. Jhonny Barzola y a la MSc. Ing. Isabel Quinde, quienes con su orientación, conocimientos, paciencia y predisposición contribuyeron de manera significativa al desarrollo y culminación de este trabajo de titulación.

A mis padres, les agradezco de todo corazón por el esfuerzo, la confianza y el respaldo que me han brindado a lo largo de mi formación. Gracias por motivarme a seguir adelante, por enseñarme el valor de la responsabilidad y por estar presentes en cada etapa de este camino.

A mi abuelita, le agradezco por su amor, sus enseñanzas y por ser una inspiración constante en mi vida. Su ejemplo de lucha, humildad y perseverancia ha dejado en mí valores que me han acompañado durante todo este proceso y que seguirán guiando mi camino personal y profesional.

A mis hermanos, gracias por su cariño, compañía y apoyo durante esta etapa. Sus palabras de ánimo y su presencia fueron importantes para continuar avanzando, especialmente en los momentos en los que el camino se tornaba difícil.

A mi novia, le agradezco profundamente por su amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional. Gracias por estar a mi lado en cada momento, por escucharme, aconsejarme y darme fuerzas cuando más lo necesitaba. Tu compañía fue una motivación constante para no rendirme y seguir adelante hasta culminar este logro.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### RESUMEN

La presente investigación evaluó experimentalmente la densidad de potencia en baterías de plomo-ácido de 12 V y 7 Ah mediante la incorporación de nanografeno como aditivo de carbono. Para el ensayo se trabajó con tres configuraciones: una batería de referencia sin modificación, una batería con nanografeno disperso en el electrolito y una batería con nanografeno aplicado en las placas negativas. La comparación se realizó a partir de los registros de voltaje, corriente y densidad de potencia obtenidos durante ciclos repetidos de carga y descarga.

La metodología incluyó la preparación de las mezclas, la verificación inicial del electrolito mediante mediciones de pH y TDS, y la revisión de la dispersión del aditivo mediante espectrofotometría UV-Vis. Posteriormente, las baterías fueron evaluadas con un sistema automatizado basado en Arduino Mega 2560, sensores de corriente, módulo PZEM-017, relés y almacenamiento de datos en tarjeta SD. Además, se realizó una observación de las placas con estereomicroscopio antes y después de los ciclos, con el fin de relacionar el comportamiento eléctrico con los cambios visibles en el material activo.

Los resultados mostraron que la batería modificada en las placas negativas presentó una descarga más estable, con una caída de voltaje menos pronunciada y una entrega de corriente más sostenida frente a la batería de referencia. La batería con aditivo en el electrolito presentó mejoras moderadas, aunque su respuesta fue más cercana a la configuración sin modificación. El análisis microscópico permitió observar que las placas negativas modificadas conservaron una superficie más homogénea después de los ciclos, mientras que la batería de referencia presentó mayor irregularidad y signos de desgaste superficial. En conjunto, se concluye que el nanografeno puede favorecer el desempeño de las baterías de plomo-ácido, especialmente cuando se incorpora directamente en las placas negativas.

**Palabras clave:** baterías de plomo-ácido, nanografeno, densidad de potencia, placas negativas, electrolito, ciclos de carga y descarga.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### ABSTRACT

This research experimentally evaluated the power density of 12 V and 7 Ah lead-acid batteries through the incorporation of nanographene as a carbon additive. Three configurations were analyzed: an unmodified reference battery, a battery with nanographene dispersed in the electrolyte, and a battery with nanographene applied to the negative plates. The comparison was based on voltage, current, and power density records obtained during repeated charge and discharge cycles.

The methodology included mixture preparation, initial electrolyte verification through pH and TDS measurements, and additive dispersion analysis using UV-Vis spectrophotometry. The batteries were then evaluated with an automated system based on an Arduino Mega 2560, current sensors, a PZEM-017 module, relays, and SD card data storage. In addition, the plates were observed with a stereomicroscope before and after the cycles in order to relate the electrical behavior to visible changes in the active material.

The results showed that the battery modified on the negative plates had a more stable discharge behavior, with a less pronounced voltage drop and a more sustained current delivery compared to the reference battery. The battery with the additive incorporated into the electrolyte showed moderate improvements, although its response was closer to that of the unmodified configuration. The microscopic analysis showed that the modified negative plates preserved a more homogeneous surface after the cycles, while the reference battery presented greater irregularity and signs of surface wear. Overall, nanographene can improve the performance of lead-acid batteries, especially when it's incorporated directly into the negative plates.

**Keywords:** lead-acid batteries, nanographene, power density, negative plates, electrolyte, charge and discharge cycles.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### **Tema**

EVALUACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD DE POTENCIA EN LAS BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO CON ADITIVOS DE CARBONO

#### **1.1 Objetivo General**

Evaluar la densidad de potencia en las baterías de plomo-ácido con aditivos de carbono para aplicaciones generales

#### **1.2 Objetivos específicos**

1. Describir las características de rendimiento de las baterías de plomo-ácido y las características de los aditivos de carbono.
2. Realizar mediciones generales y modificaciones en las baterías de plomo-ácido para pruebas de rendimiento
3. Evaluar el impacto de la inclusión de aditivos de carbono en las baterías de plomo-ácido

#### **1.3 Planteamiento del problema**

La baja densidad de potencia de las baterías de plomo-ácido es un problema significativo que limita su aplicabilidad en muchas áreas. Estas baterías, a pesar de ser económicas y relativamente fiables, tienen una densidad de potencia mucho menor en comparación con otras tecnologías de almacenamiento de energía, como las baterías de ión-litio.

La densidad de potencia es un indicador importante para analizar el desempeño de una batería, ya que permite estimar qué tan rápido puede entregar energía en función de su masa o tamaño. En las baterías plomo-ácido, este suele ser menor si se lo compara con las formas de almacenamiento más recientes, como las baterías de iones de litio, donde las



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



características de los materiales activos empleados y a la velocidad con la que se desarrollan las reacciones electroquímicas durante los procesos de carga y descarga, presentan limitaciones en aplicaciones donde se necesita una entrega de alta potencia en poco tiempo, mientras que otras tecnologías pueden ser más adecuadas para este tipo de trabajo.

Durante el proceso de descarga en las baterías de plomo-ácido, el plomo metálico reacciona con el ácido sulfúrico dando como resultado sulfato de plomo, reacción que permite la liberación de energía eléctrica hacia el circuito externo [1]

Sin embargo, los materiales utilizados en estas baterías son relativamente pesados y voluminosos, lo que limita su densidad de potencia [2] para aplicaciones donde se requiere un espacio reducido y liviano como en los vehículos eléctricos que se encuentran en auge. La utilización de aditivos ayuda en la reacción química dentro de las baterías, que puede ser incorporado en los terminales, en las placas de plomo como un revestimiento o incluso en el ácido. Una opción son los aditivos con componentes de carbono activado, pero son una tecnología nueva y aún en investigación en cuanto a evaluación.

¿Qué impacto tiene el aditivo de componentes de carbono en la potencia de las baterías de plomo-ácido?

#### **1.4 Alcance**

El trabajo comienza describiendo el funcionamiento básico de la batería de plomo-ácido, revisando sus reacciones electroquímicas y la disposición interna de sus componentes (placas, separadores y electrolito), ya que de ellos depende en gran medida la conductividad y la forma en que responde durante la descarga.

A continuación, se revisa la literatura sobre el uso de aditivos carbonosos y los mecanismos mediante los cuales estos materiales podrían influir en la transferencia de carga y en los procesos de sulfatación.

En la etapa experimental se usaron y modificaron baterías de 12 V – 7 Ah. Se utilizó 4 unidades: una se abrió para identificar cuál es el estado inicial de sus componentes, dos se modificaron con distintos métodos de integrar el aditivo y una se mantuvo sin modificaciones como referencia, de forma que las diferencias observadas concuerden al tratamiento aplicado y no a diferencias propias entre baterías.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



El comportamiento en base a los resultados se valoró mediante ciclos de carga y descarga registrando voltaje, corriente y potencia con ayuda de un módulo desarrollado en base a Arduino. Con estos datos se pudo analizar la evolución de la capacidad de descarga, la potencia entregada y los cambios asociados a la resistencia interna del sistema.

Se analizará la retención de la capacidad después de 100 a 200 ciclos de carga y descarga, lo que permitirá evaluar la vida útil de las baterías modificadas a través del impacto de los aditivos mediante la visualización del estado de sus componentes internos con la ayuda de un estereomicroscopio con el objetivo de registrar los posibles daños o cambios en la estructura, formación de dendritas, microfisuras y corrosión.

### **1.5 Justificación**

Las baterías de plomo-ácido convencionales presentan una limitación significativa en su densidad de potencia, lo que restringe su aplicabilidad en áreas que requieren una alta capacidad de descarga para proporcionar la potencia necesaria. Esta restricción se manifiesta en una extensa variedad de aplicaciones, como los vehículos eléctricos hasta sistemas de respaldo de energía y dispositivos electrónicos portátiles. El uso de aditivos de carbono en baterías de plomo-ácido se plantea como una alternativa para mejorar su capacidad de entrega de potencia, al incrementar este parámetro la batería puede responder de mejor manera ante demandas energéticas más exigentes.

En aplicaciones como la movilidad se requieren descargas rápidas en determinados momentos de operación, una mayor densidad de potencia permitiría que este tipo de baterías funcione en condiciones más cercanas a las de tecnologías modernas, ampliando así sus posibles usos. Un aumento de rendimiento en este parámetro permitiría agilizar el desempeño de estas baterías en aplicaciones de transporte y suministro energético, favoreciendo indirectamente a la reducción del consumo de combustibles fósiles y poder ser una de las tecnologías de transporte más eficientes.

A su vez, las baterías de plomo-ácido mejoradas mediante la incorporación de aditivos de carbono eventualmente podrían presentarse aplicables donde el peso y el volumen representan considerables limitaciones. El aumento de la densidad de potencia posibilita suministrar niveles equivalentes de energía en configuraciones más compactas,



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



aspecto de interés tanto en el sector automotriz como en sistemas eléctricos auxiliares. Asimismo, la presencia de aditivos de carbono favorece la disminución de la sulfatación de las placas, mejora la conductividad eléctrica y optimiza la transferencia de carga, lo que se puede traducir en una mayor eficiencia operativa y una extensión del ciclo de vida de la batería, con impactos positivos desde el punto de vista económico y ambiental [10].

En este trabajo se analizó el comportamiento de las baterías utilizando un enfoque experimental reforzado con observación microscópica de sus componentes, para ello se utilizó un estereomicroscopio, el cual permitió evaluar detalladamente la superficie de los electrodos e identificar cambios no visibles sin aumento óptico, permitiendo identificar etapas iniciales de formación de dendritas, pequeñas microfisuras y otros indicios de degradación. Estos resultados sirvieron para evaluar de manera más clara el efecto de los aditivos de carbono sobre el estado físico de la batería y su posible funcionamiento en condiciones reales de operación.

Con ayuda del estereomicroscopio, es posible observar con las interfases entre diferentes materiales y las capas delgadas que componen los electrodos.

### **1.6 Antecedentes**

Las baterías de plomo-ácido han sido históricamente una de las tecnologías de almacenamiento de energía más empleadas en aplicaciones como el sector automotriz, los sistemas de respaldo energético y diversas aplicaciones estacionarias, principalmente debido a su bajo costo, fiabilidad y madurez tecnológica alcanzada a lo largo de décadas de desarrollo [3]. No obstante, a pesar de estas ventajas, diversos estudios han identificado limitaciones técnicas asociadas a su desempeño, particularmente en lo referente a su densidad de potencia, lo que restringe su uso en aplicaciones que demandan elevadas tasas de entrega de energía.

La baja densidad de potencia de las baterías de plomo-ácido se relaciona principalmente con la velocidad a la que ocurren sus reacciones electroquímicas durante la carga y descarga, además de la resistencia interna relativamente alta que presentan estos sistemas [4].



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Debido a este problema, su rendimiento tiene limitaciones en aplicaciones donde debe suministrar energía con rapidez y estabilidad, como en herramientas eléctricas portátiles o sistemas donde el espacio o peso no permitan su uso.

Para reducir estas limitaciones, se han planteado cambios en el electroquímico de la batería donde una de las investigaciones más exploradas es la inclusión de compuestos de carbono en la estructura del electrodo. Materiales como el negro de carbono, los nanotubos de carbono o el grafeno han mostrado mejoras en la conductividad eléctrica y en la transferencia de carga, lo que se traduce en un aumento de la densidad de potencia y un mejor desempeño general del sistema [5], [6].

Los aditivos de carbono pueden mejorar la conductividad eléctrica de los electrodos, lo que reduce la resistencia interna de la batería y facilita la transferencia de carga durante los procesos de carga y descarga. Además, los materiales de carbono pueden modificar la estructura y la porosidad de los electrodos, lo que puede optimizar la cinética de las reacciones electroquímicas [7].

#### Tipos de almacenamiento de energía

En el campo del almacenamiento de energía existen diversas tecnologías que desempeñan un papel fundamental en la integración de fuentes de energía renovable y en la gestión eficiente de la demanda energética. Estos sistemas permiten compensar la naturaleza intermitente de fuentes como la solar y la eólica, aportando estabilidad y confiabilidad a los sistemas eléctricos modernos [9].

Dentro de los sistemas actuales de almacenamiento de energía, las baterías electroquímicas ocupan un papel importante, siendo las más utilizadas las de ion-litio y las de plomo-ácido. Cada una presenta diferencias en aspectos como densidad energética, capacidad de entrega de potencia, eficiencia y costo, lo que hace que su uso dependa del tipo de aplicación requerida [10].

Las baterías de ion-litio son ampliamente utilizadas en aplicaciones de almacenamiento de energía debido a su alta densidad energética, elevada eficiencia de carga y descarga, y su capacidad para operar en sistemas compactos. Estas características las hacen



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



especialmente adecuadas para aplicaciones residenciales, comerciales y de movilidad eléctrica, donde el espacio y el peso constituyen factores determinantes [11].

No obstante, las baterías de plomo-ácido continúan siendo una alternativa relevante en aplicaciones estacionarias y de respaldo energético, principalmente por su bajo costo, madurez tecnológica y facilidad de reciclaje. La selección entre ambas tecnologías depende de las condiciones específicas de operación, los requerimientos energéticos y las restricciones económicas del sistema de almacenamiento considerado [12].

En comparación con otras tecnologías, las baterías de un litio concentran más energía en un mismo espacio, y su carga se aprovecha de mejor manera; por eso suelen ser útiles en equipos, donde el tamaño y los mantenimientos deben ser mínimos. Sin embargo, no siempre resultan la opción más conveniente, ya que el costo de partida sigue siendo muy alto, requieren mayor cuidado debido a su peligro ante altas temperaturas y existe preocupación debido que algunos materiales llegan a ser contaminantes de la naturaleza.

**Baterías de Plomo-Ácido:** a pesar de su antigüedad siguen empleándose en distintas aplicaciones, en gran parte, porque su funcionamiento es estable y predecible, con un costo menor frente a otras baterías. en la práctica suelen utilizarse como respaldo o en instalaciones fijas, al comprarlas con tecnologías más recientes son menor de densidad energética y el desgaste más rápido hacen que no sea tan conveniente en sistemas de mayor demanda.

En cuanto a su estructura, este tipo de batería está formado por placas de plomo metálico que actúan como electrodo negativo y placas de dióxido de plomo como electrodo positivo, ambas sumergidas en una solución de ácido sulfúrico que funciona como electrolito. Durante el proceso de descarga, se producen reacciones electroquímicas entre los electrodos y el electrolito que generan energía eléctrica, mientras que durante la carga estas reacciones se invierten, permitiendo la restauración parcial de la capacidad de la batería [13].

**Ventajas:**

Costo inicial bajo. Amplia disponibilidad. Robustas y fiables.

Adecuadas para aplicaciones estacionarias. **Desventajas:**

Baja densidad de energía.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Vida útil más corta que las baterías de iones de litio. Requieren mantenimiento periódico.

Mayor peso y tamaño en comparación con otras tecnologías

Las baterías de plomo-ácido, desarrolladas a mediados del siglo XIX, han desempeñado un papel clave en la consolidación de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, especialmente en aplicaciones a gran escala y en sistemas de respaldo. Su impacto histórico en el desarrollo de la infraestructura eléctrica las ha convertido en una tecnología fundamental dentro del sector energético.

Con el tiempo, estas baterías han ido adaptándose a nuevas necesidades energéticas, especialmente en aplicaciones como sistemas híbridos o almacenamiento asociado a energías renovables. A partir de estas exigencias surgieron variantes mejoradas, entre ellas las baterías de plomo-carbono la cual busca superar algunas limitaciones del diseño convencional, mostrando un mejor comportamiento electroquímico, mayor duración en operación y una respuesta más estable en sistemas de almacenamiento de mayor escala y en aplicaciones híbridas.

En los últimos años se ha trabajado en el desarrollo de electrodos negativos que incorporan materiales de carbono, lo que ha dado lugar también a la aparición de soluciones comerciales basadas en estas tecnologías. Estos avances han impulsado tanto su estudio a nivel experimental como su aplicación en nuevos campos de uso [9].

Desde el punto de vista ambiental, una ventaja importante de las baterías de plomo-ácido es su alto nivel de reciclaje, gran parte de sus componentes puede recuperarse y reutilizarse mediante procesos industriales ya establecidos.

Para entender el comportamiento observado, primero se revisó los fundamentos teóricos del uso de aditivos de carbono en las baterías plomo-ácido, se revisa el funcionamiento de la batería, la sulfatación y la densidad de potencia para poder interpretar los resultados obtenidos del módulo; se tomaron en cuenta estudios recientes e importantes donde se incorporan materiales carbonos para observar su efecto, en el comportamiento electroquímico de la batería.



## CAPÍTULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1 Descripción de la batería de plomo-ácido

El funcionamiento de la batería de plomo-ácido se basa en los principios de la electroquímica, específicamente en reacciones de oxidación y reducción que tienen lugar entre dos electrodos de distinta polaridad cuando el sistema se conecta a un circuito externo. Estas reacciones son las responsables de transformar la energía química almacenada en energía eléctrica, produciendo la corriente que luego es utilizada por los dispositivos conectados. Una batería tiene varias celdas electroquímicas conectadas en serie y están ubicadas en compartimientos separados dentro del acumulador.

En la batería de plomo-ácido, el electrodo positivo corresponde a una placa de dióxido de plomo ( $PbO_2$ ) y el electrodo negativo está compuesto por plomo metálico con estructura porosa.

Ambos electrodos se sumergen en una solución de ácido sulfúrico que actúa como electrolito, ayudando al transporte iónico necesario para el progreso de las reacciones electroquímicas. Esta configuración es característica de los sistemas de plomo-ácido y determina gran parte de su comportamiento eléctrico y electroquímico [14].

Durante el proceso de descarga, el plomo metálico del electrodo negativo se oxida y reacciona con el electrolito, mientras que el dióxido de plomo del electrodo positivo se reduce, formándose sulfato de plomo en ambos electrodos. Este conjunto de reacciones genera el flujo de electrones a través del circuito externo, produciendo la corriente eléctrica. En el proceso de carga, dichas reacciones se invierten parcialmente, permitiendo la recuperación de la capacidad del acumulador dentro de los límites propios de esta tecnología [15].

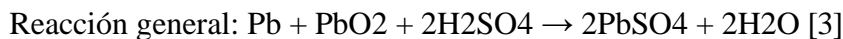
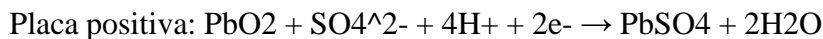


**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### 2.1.1 Principios de funcionamiento de la batería plomo-ácido.

Las baterías de plomo-ácido utilizan una combinación de placas o rejillas de plomo y un electrolito que consiste en ácido sulfúrico diluido para convertir la energía eléctrica en energía química potencial y viceversa. La siguiente reacción química tiene lugar durante la descarga:



Durante el proceso de carga, se revierte el proceso químico. El mecanismo básico de operación de los acumuladores plomo-ácido involucra una transformación química entre el plomo (Pb) y el dióxido de plomo (PbO<sub>2</sub>), sumergidos en una solución diluida de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Durante la descarga, el material activo en la placa negativa (Pb) se oxida a sulfato de plomo (PbSO<sub>4</sub>), mientras que el material activo en la placa positiva (PbO<sub>2</sub>) se reduce a sulfato de plomo. Las reacciones inversas ocurren durante la carga. El voltaje nominal de una celda de plomo-ácido es de aproximadamente 2,0 V, pero varía dependiendo del estado de carga (SOC) y la gravedad específica del electrolito [4].

Durante la carga, el proceso se invierte, y el sulfato de plomo se convierte nuevamente en plomo metálico en el ánodo y óxido de plomo en el cátodo. Este ciclo de carga y descarga puede repetirse numerosas veces, convirtiéndolas en baterías recargables [5]

### 2.1.2 Estructura de las baterías de plomo-ácido

La estructura básica de una batería de plomo-ácido está conformada por múltiples celdas electroquímicas conectadas en serie, con el objetivo de alcanzar el nivel de voltaje requerido por la aplicación. Cada celda incluye un conjunto de placas positivas y negativas dispuestas de manera alternada y sumergidas en un electrolito de ácido sulfúrico diluido, el cual permite el transporte iónico durante los procesos de carga y descarga.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Las placas positivas están constituidas por dióxido de plomo ( $PbO_2$ ), mientras que las placas negativas están formadas por plomo metálico de estructura porosa. Entre ambas se intercalan separadores porosos que cumplen la función de impedir el contacto directo entre las placas, evitando cortocircuitos internos, al tiempo que permiten el paso de iones a través del electrolito. Esta configuración estructural es determinante para el desempeño eléctrico y la estabilidad operativa de las baterías de plomo-ácido [16].

La placa positiva utiliza una rejilla de aleación de plomo recubierta con el óxido de plomo, mientras que la placa negativa tiene una estructura similar pero con plomo poroso; para evitar el contacto directo, entre ambas, se colocan separadores, porosos, que al mismo tiempo estos permiten el paso de iones sin tocarse directamente

Las placas de separadores están dentro de un contenedor resistente, usualmente de polipropileno que aísla eléctricamente el sistema, este contenedor tiene los orificios de ventilación por donde se liberan los gases formados durante la carga y descarga.

En las Baterías selladas se emplean válvulas de alivio de presión para controlar el interior del sistema, donde la configuración (VRLA) permitiendo recombinar los gases generados, reduciendo la pérdida de electrolito y realizando el mantenimiento requerido [16].

El electrolito de ácido sulfúrico diluido ocupa el espacio entre las placas y el recipiente. La concentración de ácido variará según el diseño de la batería, pero suele oscilar entre el 30 % y el 40 % en peso. El nivel del electrolito debe mantenerse por encima de las placas para garantizar un funcionamiento adecuado.

### **2.1.3 Consideraciones técnicas**

Al diseñar y operar baterías de plomo-ácido, se deben considerar una serie de factores técnicos importantes para garantizar un rendimiento óptimo y una larga vida útil.

La densidad del electrolito sirve como indicador del estado de carga al depender de la concentración del ácido sulfúrico, éste se suele medir con hidrómetro y varía durante el funcionamiento, ya que al descargarse la batería disminuye su eficiencia y los valores anormales suelen ser por sulfatación, descargas profundas o desgaste de placas.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



La batería tiende a perder carga, incluso sin usarla, este fenómeno es conocido como Autodescarga; a través de reacciones químicas internas minuciosamente va perdiendo su carga pero si la temperatura ambiental aumenta se descarga más rápido.

La temperatura afecta directamente el funcionamiento del sistema por lo que a temperaturas altas las reacciones internas se aceleran, lo que puede mejorar temporalmente la respuesta; también incrementa la autodescarga, la corrosión interna y a bajas temperaturas disminuye la capacidad de descarga, ya que los procesos electroquímicos se vuelven más lentos y la eficiencia del sistema se reduce.

En las baterías de plomo-ácido húmedas se debe garantizar una ventilación adecuada durante el proceso de carga, ya que se forman gases como hidrógeno y oxígeno. La acumulación de estos gases sin una correcta evacuación puede representar un riesgo de seguridad, por lo que la ventilación y el control de gases constituyen un aspecto clave en el diseño y operación de este tipo de baterías [17].

Para solucionar este problema, las baterías selladas utilizan válvulas de seguridad y recombinación de gases.

#### **2.1.4 Pruebas características y mantenimiento**

Se realizan varias pruebas características para evaluar el rendimiento y el estado de las baterías de plomo-ácido, estas pruebas sirven para conocer la capacidad útil de la batería y determinar si necesita mantenimiento o ya no sirve, para esto se descarga de forma controlada hasta alcanzar el voltaje de 10,5.

Así se determina la capacidad de amperios hora (Ah) y se comprueba si la batería cubre la demanda de energía requerida; se observa la resistencia interna que normalmente aumenta cuando existe sulfatación, problemas de conexión o desgaste por uso continuo.

Para realizar la prueba, se aplica una corriente conocida y se observa la caída de voltaje, lo que permite calcular la resistencia interna y determinar si existen posibles fallas en el sistema [18].



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



## 2.2 Aplicaciones de la batería de plomo-ácido

Si bien su uso más conocido es en los sistemas de arranque de vehículos, estas baterías desempeñan un papel crucial en diversos campos, como sistemas de almacenamiento, energía renovable y movilidad eléctrica. A lo largo de esta sección, se detallan las principales aplicaciones y las ventajas y limitaciones de las baterías de plomo-ácido en cada una de ellas

### 2.2.1 Sistemas de arranque

Las baterías de plomo-ácido se utilizan principalmente para el arranque de motores de combustión interna, ya que proporcionan la corriente necesaria para activar el motor de arranque y los sistemas eléctricos iniciales; al activar el encendido se cierra el circuito mediante el solenoide y la batería entrega una corriente alta por un instante, lo que permite al motor de arranque girar el cigüeñal hasta que el motor se mantiene funcionando por sí solo [9].

Una vez que el motor ha arrancado, el alternador asume la función de suministrar energía eléctrica al sistema y de recargar la batería durante el funcionamiento del vehículo. Este proceso asegura que el acumulador recupere el nivel de carga necesario para enfrentar futuros ciclos de arranque, manteniendo la continuidad operativa del sistema eléctrico del automóvil [10].

Las baterías de plomo-ácido se utilizan con frecuencia en sistemas de arranque porque pueden entregar corrientes altas durante intervalos cortos, lo que facilita el encendido del motor. En esos momentos la batería trabaja con una potencia elevada, suficiente para vencer la inercia inicial del sistema mecánico.

Sin embargo, en el uso real del vehículo la batería no opera siempre en condiciones ideales, ya que experimenta ciclos parciales de carga y descarga de forma continua. Por ello se requiere un diseño resistente y materiales adecuados que permitan mantener su desempeño durante el uso prolongado [11].



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### **2.2.2 Sistemas de almacenamiento**

Las baterías plomo ácido también se usan para almacenamiento energético, cargándose cuando la demanda de energía es baja y descargándose cuando el sistema lo necesita, por ejemplo, en los sistemas UPS actúan como fuente de respaldo frente a cortes o fluctuaciones de Red donde estas baterías alimentan temporalmente cargas críticas como equipos informáticos o sistemas médicos, debido a su rápida respuesta permiten continuar la operación hasta que vuelva la energía o se active un generador.

El tiempo durante el cual pueden suministrar energía depende de la importancia de la carga conectada y del tamaño del banco de baterías, pudiendo extenderse desde algunos minutos hasta varias horas. [18].

Las baterías de plomo-ácido también pueden trabajar junto con fuentes de energía renovable intermitentes, como la solar o la eólica. Debido a que la generación de estas fuentes no es constante, pueden producirse diferencias entre la energía disponible y la requerida. Para compensar esto, la batería almacena el excedente durante los periodos de mayor producción y lo entrega cuando la generación disminuye. Con ello se atenúan las variaciones propias de este tipo de sistemas.

Estas baterías también se utilizan para nivelar la carga eléctrica donde se cargan cuando la demanda es baja y se descargan en los momentos de mayor consumo, este método es conocido como recorte de picos, ayuda a reducir las exigencias máximas sobre las plantas de generación y al mismo tiempo disminuye los costos de producción de energía. De esta manera la red trabaja con menos variaciones de demanda [19].

### **2.2.3 Aplicaciones en energía renovable**

Dado que permiten almacenar la energía generada por fuentes intermitentes como la energía solar y eólica, las baterías de plomo-ácido son esenciales para las aplicaciones de energía renovable. Para garantizar un suministro eléctrico confiable y mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda de energía, los sistemas de almacenamiento desempeñan un papel fundamental dentro de las infraestructuras energéticas modernas. En los sistemas



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



fotovoltaicos, las baterías de plomo-ácido se emplean para almacenar la energía que sobra durante las horas de mayor radiación solar.

Posteriormente esa energía puede utilizarse en la noche o cuando el clima no permite una buena generación, por ejemplo en días nublados, permitiendo alimentar las cargas del sistema o incluso aportar energía a la red dependiendo de la configuración instalada donde las baterías contribuyen a mejorar la continuidad del suministro y a optimizar el aprovechamiento de la energía solar disponible [14].

En los sistemas de energía eólica, las baterías de plomo-ácido almacenan la energía generada por las turbinas eólicas cuando las condiciones del viento son favorables. Esta energía almacenada se puede utilizar más adelante cuando el viento sea insuficiente para satisfacer la demanda. Este enfoque ayuda a suavizar la naturaleza intermitente de la energía eólica, proporcionando un suministro de energía más consistente y confiable [15].

Aún con el desarrollo de otras tecnologías, siguen siendo consideradas en muchos proyectos por su costo reducido y su funcionamiento estable y predecible; en aplicaciones estacionarias pueden soportar ciclos repetidos de carga y descarga sin un deterioro inmediato, por lo que continúan utilizándose en sistemas de almacenamiento donde se prioriza la estabilidad operativa antes que la máxima densidad energética. [20]

#### **2.2.4 Aplicaciones en movilidad eléctrica (prototipos y limitaciones)**

Las baterías de plomo-ácido se han utilizado con frecuencia para los sistemas de arranque de vehículos con motor de combustión interna, pero aún no se han utilizado en vehículos eléctricos.

Existieron prototipos de vehículos eléctricos que funcionaban con baterías de plomo-Ácido, algunos de los primeros modelos modernos se produjeron en pequeña escala en los años 70; uno de ellos fue el Electrica CitiCar, un auto compacto de una capacidad cercana a 3,6kWh. Con este sistema lograba autonomías relativamente cortas, del orden de varias decenas de kilómetros, lo cual era suficiente para desplazamientos urbanos de la época. En esos mismos años también se probaron versiones eléctricas de vehículos utilitarios ligeros,



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



como el Daihatsu HiJet EV, producido en cantidades limitadas principalmente para pruebas y validación tecnológica. [21].

En años más recientes se ha vuelto a considerar el uso de baterías de plomo-ácido dentro de propuestas de movilidad eléctrica de bajo costo, sobre todo en soluciones de transporte ligero urbano.

A pesar de la creación de distintos prototipos, las baterías de plomo-ácido no han logrado convencer en vehículos eléctricos. La principal razón está relacionada con su limitada densidad energética frente a tecnologías más modernas como las baterías de ion-litio, para obtener autonomías comparables es necesario incrementar considerablemente la cantidad de material activo, lo que se traduce en sistemas más pesados y voluminosos. Esta condición termina influyendo en el rendimiento general del vehículo, ya que incrementa el consumo energético y condiciona el diseño estructural del sistema de almacenamiento.

Adicionalmente, la vida útil de las baterías de plomo-ácido en aplicaciones de tracción eléctrica se ve comprometida por la necesidad de operar bajo ciclos de carga y descarga profundos y repetitivos, condición que acelera los procesos de degradación electroquímica. Estas limitaciones han llevado a que, en la mayoría de los vehículos eléctricos modernos, las baterías de ion-litio sean la tecnología predominante para aplicaciones de movilidad eléctrica [22].

### **2.2.5 Sistemas de monitoreo de baterías de plomo-ácido**

Los sistemas de monitoreo de baterías de plomo-ácido desempeñan un papel fundamental en la gestión eficiente de estos acumuladores, ya que permiten garantizar un funcionamiento seguro, optimizar el rendimiento y prolongar la vida útil en diversas aplicaciones. Estos sistemas integran sensores y algoritmos de procesamiento que permiten supervisar parámetros clave como el estado de carga (State of Charge, SOC), la capacidad disponible, la resistencia interna y las condiciones térmicas de la batería [23].

Uno de los objetivos principales del monitoreo es la estimación precisa del estado de carga, parámetro esencial para la gestión energética del sistema. Para ello, se emplean mediciones de variables eléctricas y electroquímicas, como el voltaje de circuito abierto, la



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



densidad del electrolito o la impedancia interna, las cuales se procesan mediante modelos matemáticos y algoritmos de estimación que permiten determinar el SOC con mayor precisión.

Un cálculo adecuado para este parámetro ayuda a evitar sobrecargas y descargas profundas que deterioran la batería de manera acelerada.

Además, se controla la capacidad restante del acumulador, que corresponde a la energía disponible en condiciones normales. Con el uso este valor se disminuye los posibles daños por sulfatación y corrosión de las placas generadas por los ciclos repetidos; el monitoreo periódico permite decidir mantenimiento o cambio antes de fallas.

El monitoreo permite identificar irregularidades entre celdas, variaciones de temperatura o fallas internas. Detectarlas a tiempo ayuda a corregir el problema antes de que provoque daños mayores.

Asimismo, el registro y análisis de datos históricos sobre el comportamiento de la batería permite optimizar las estrategias de gestión energética y aportar información valiosa para el diseño y mejora de futuros sistemas de almacenamiento electroquímico [24].

### **2.3 Rendimiento de la batería de plomo-ácido**

El rendimiento de las baterías de plomo-ácido es un factor crítico que determina su idoneidad para diferentes aplicaciones.

Esta sección explora los esfuerzos realizados para mejorar el rendimiento mediante modificaciones en componentes como los bornes de conexión, las placas y el electrolito, así como los antecedentes y avances en cada una de estas áreas.

#### **2.3.1 Características constructivas y evaluación de rendimiento**

En baterías de plomo-ácido, el desempeño no se explica solo por el voltaje nominal, sino por detalles de su construcción. El diseño de placas, la formulación del electrolito y los materiales internos afectan parámetros clave como la capacidad disponible, la eficiencia, la resistencia interna y el tiempo que la batería puede mantenerse operativa sin degradarse. Un ejemplo claro es la concentración del electrolito: al aumentar, puede elevar la conductividad



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



iónica y ayudar en condiciones de frío, pero también tiende a intensificar la corrosión de componentes internos, lo que termina perjudicando la vida útil [25].

El diseño de las placas es un componente decisivo en el desempeño de las baterías de plomo-ácido, porque define tanto la superficie efectiva de reacción como la estabilidad interna del acumulador. Las placas positiva y negativa se constituyen a partir de rejillas metálicas que actúan como soporte y conductor, recubiertas por material activo: dióxido de plomo en la positiva y plomo esponjoso en la negativa. La porosidad, el área superficial y la composición de estas pastas condicionan la capacidad aprovechable y la respuesta durante carga y descarga, al influir en la accesibilidad del electrolito, la transferencia iónica y la distribución de corriente dentro de la placa. La aleación de la rejilla también resulta determinante; configuraciones basadas en plomo-antimonio o plomo-calcio presentan comportamientos distintos frente a la corrosión, lo que incide en la degradación progresiva y, por ende, en la vida útil. De forma complementaria, el electrolito de ácido sulfúrico requiere una concentración controlada, ya que su densidad se asocia con el estado de carga y con el nivel de conductividad iónica disponible. En este mismo contexto, la geometría de los separadores y el grado de compactación del conjunto de placas afectan la circulación del electrolito y el intercambio iónico, pudiendo incrementar la resistencia interna y alterar la eficiencia del proceso electroquímico si las condiciones de ensamblaje no son adecuadas.

Si los separadores permiten el paso de iones el sistema opera normalmente, pero una compactación alta dificulta el flujo del electrolito y disminuye la capacidad.

El rendimiento se evalúa mediante varias pruebas: descarga hasta el voltaje de corte para obtener la capacidad en Ah, medición de la resistencia interna a partir de la caída de voltaje y ensayos de ciclos, vida útil y eficiencia coulombica [19].

### **2.3.2 Antecedentes en mejoras de rendimiento por modificaciones en los bornes de conexión de la batería**

Los bornes de conexión son esenciales para las baterías de plomo-ácido porque proporcionan la interfaz eléctrica entre las celdas individuales y el circuito externo. El comportamiento de una batería de plomo-ácido no está determinado únicamente por las



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



reacciones químicas internas, sino también por componentes externos como los bornes de conexión. Las características eléctricas de estos terminales (su material, forma de contacto y resistencia) pueden afectar el desempeño, sobre todo cuando la batería trabaja con corrientes elevadas.

En los diseños convencionales los bornes se fabrican con aleaciones de plomo-antimonio o plomo-estaño debido a su compatibilidad electroquímica. Con el uso pueden aparecer procesos de corrosión y capas superficiales aislantes que aumentan la las pérdidas de energía. Para reducir este efecto, se han investigado diferentes alternativas, como el uso de recubrimientos conductores o la sustitución de los bornes por materiales con mayor resistencia a la corrosión.

Entre las opciones analizadas se encuentra la aplicación de recubrimientos metálicos, como oro o platino, en los terminales de conexión, los cuales permiten disminuir la resistencia de contacto y reducir la caída de voltaje en el punto de conexión. Asimismo, se ha propuesto el uso de aleaciones basadas en cobre para los bornes, debido a que este material presenta una conductividad eléctrica superior a la del plomo. Sin embargo, la incorporación de cobre en baterías de plomo-ácido requiere medidas de control adicionales, ya que una interacción inadecuada con el electrolito podría generar contaminaciones o compuestos insolubles que afecten el funcionamiento normal del acumulador [26].

También se ha evaluado el uso de terminales de cobre por su mejor conductividad. No obstante, si interactúan con el electrolito pueden contaminarlo, por lo que deben aislarse adecuadamente para no alterar el funcionamiento de la batería.

En los últimos años se ha empezado a evaluar el reemplazo de los bornes tradicionales de plomo por aleaciones basadas en cobre, principalmente por su mayor conductividad eléctrica. Esta propiedad permite disminuir la resistencia de contacto y mejorar el comportamiento eléctrico, sobre todo cuando la batería trabaja con corrientes altas. Sin embargo, su uso dentro de baterías de plomo-ácido debe considerarse con precaución, ya que el contacto directo con el electrolito puede originar corrosión o la



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



formación de compuestos insolubles que alteran el equilibrio químico interno del sistema [27].

Además del material, la forma de los terminales también tiene impacto en el desempeño. Cambios en la geometría o en el tipo de contacto pueden disminuir la resistencia interna y favorecer la entrega de corriente, lo que a largo plazo se refleja en una mayor durabilidad del sistema. No obstante, estas modificaciones deben analizarse en función del costo y de su aplicación práctica dentro de baterías de plomo-ácido reales [28]

### **2.3.3 Antecedentes en mejoras de rendimiento por modificaciones en las placas de la batería**

El rendimiento y la duración de la batería están ligados al estado de sus placas. Ambas utilizan rejillas metálicas con material activo de dióxido de plomo y plomo poroso, y sus características físicas (como porosidad y superficie) determinan cómo entrega energía en los ciclos de carga y descarga. La optimización de la superficie específica de las pastas activas ha emergido como una estrategia clave para mejorar el rendimiento de las baterías de plomo-ácido. El aumento del área superficial facilita una mayor interacción entre el electrolito y el material activo, lo que se traduce en una mejora significativa de la capacidad y eficiencia de la batería" [22].

Las mejoras en el rendimiento de las baterías de plomo-ácido se han logrado, en gran medida, a través de modificaciones en las pastas activas y en las estructuras que conforman las placas. Entre las estrategias más utilizadas se encuentra la incorporación de aditivos porosos y de materiales nanoestructurados en las pastas activas, los cuales permiten aumentar la superficie disponible para las reacciones electroquímicas y mejorar la utilización del material activo.

Además del material activo, también se han desarrollado mejoras en las rejillas metálicas que sirven como soporte de las placas. Se han utilizado aleaciones como plomo-calcio o plomo-estaño, las cuales muestran un comportamiento más estable frente a la corrosión y permiten extender la vida útil respecto a las configuraciones tradicionales.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



De igual manera, algunos cambios en la forma de la rejilla favorecen una distribución más uniforme de la corriente dentro de la placa, disminuyendo la resistencia interna y permitiendo un funcionamiento eléctrico más estable del acumulador.

Los procesos de fabricación de las placas también han contribuido de forma importante a estas mejoras técnicas como el laminado en caliente y la incorporación de fibras de vidrio en las mezclas activas han demostrado favorecer una mejor adherencia de las pastas a las rejillas metálicas, lo que reduce la pérdida de material activo a lo largo del ciclo de vida de la batería y mejora su estabilidad durante los procesos de carga y descarga [23].

También se han incorporado nanomateriales en las pastas activas para incrementar el área superficial. Esto mejora el contacto con el electrolito, estabiliza el intercambio de carga y hace más estable el funcionamiento de la batería. [24], [25].

#### **2.3.4 Antecedentes en mejoras de rendimiento por modificaciones en el ácido de la batería**

El uso de electrolitos alternativos al ácido sulfúrico tradicional ha sido un tema de investigación. Los electrolitos a base de ácido perclórico, por ejemplo, se han estudiado para proporcionar una mayor conductividad iónica y eficiencia de la batería, sin embargo, la seguridad, la corrosión y la compatibilidad con los materiales de la batería son problemas con estos electrolitos alternativos [26].

También se han probado aditivos incorporados directamente en el electrolito. Dependiendo del material, pueden modificar la conductividad, la corrosión o la sulfatación de las placas, influyendo en la duración de la batería.

Entre ellos se mencionan ácido bórico, glicerol y carbonato de propileno, en varios casos se ha observado una menor degradación de las rejillas y un electrolito con mejor desempeño durante la operación. Sin embargo, su incorporación debe controlarse, ya que es necesario verificar su compatibilidad y estabilidad dentro del medio ácido para evitar efectos adversos en el funcionamiento del sistema [27].

También se han evaluado aditivos de tipo inorgánico, por ejemplo sulfato de amonio y algunos compuestos de plomo, los cuales pueden formar películas protectoras sobre las



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



placas o modificar el comportamiento del electrolito ayuda a disminuir la corrosión y a extender el tiempo de operación del acumulador.

La cantidad de aditivo debe ajustarse, porque un exceso puede alterar la química interna y perjudicar el funcionamiento a largo plazo.

Aun cuando mejoran el rendimiento, también influyen la compatibilidad de materiales, la seguridad y el costo [28].

#### **2.4 Aditivos para las baterías plomo-ácido**

Estos aditivos pueden ser compuestos orgánicos o inorgánicos que se agregan al electrolito, placas o rejillas, y han sido objeto de numerosas investigaciones debido a sus efectos en la conductividad, corrosión, sulfatación y generación de gases. Esta sección aborda los antecedentes, tipos de aditivos y sus efectos en el rendimiento de las baterías de plomo-ácido.

##### **2.4.1 Antecedentes sobre el uso de aditivos en las baterías de plomo-ácido**

En los últimos años se ha estudiado principalmente el empleo de aditivos de carbono, en particular grafito. Su conductividad y estructura laminar ayudan a dispersar mejor la corriente en las placas, lo que mejora el desempeño del electrodo negativo y reduce pérdidas por resistencia interna [29].

Algunas investigaciones demuestran que el grafito en la placa negativa aumenta la aceptación de carga, especialmente en operación parcial. Por ello la batería plomo-ácido resulta viable en vehículos híbridos y sistemas renovables, donde la batería casi nunca trabaja completamente cargada. En este tipo de condiciones, el uso de grafito contribuye a disminuir la formación de sulfato de plomo sobre las placas negativas, fenómeno que suele limitar la vida útil de las baterías de plomo-ácido [30].

Su efecto resulta más evidente en baterías selladas o reguladas por válvula (VRLA), donde el equilibrio del electrolito es importante para el funcionamiento. Además, la estructura porosa del grafito genera puntos donde pueden formarse de manera más uniforme



los cristales de plomo durante la carga, favoreciendo una estructura del material activo más estable [31].

#### **2.4.2 Tipos de aditivos**

Por otro lado, los aditivos incorporados en las placas, tanto positivas como negativas, incluyen materiales metálicos y no metálicos que buscan optimizar la estructura del material activo y mejorar su desempeño electroquímico. Asimismo, en las rejillas se utilizan elementos como el antimonio o el estaño, los cuales contribuyen a incrementar la resistencia a la corrosión y a mejorar la conductividad eléctrica del conjunto [32].

Dentro de los distintos tipos de aditivos, los basados en carbono han ganado mayor interés, en especial el grafito, por los efectos que produce en el funcionamiento de la batería. Dependiendo de su estructura y del proceso de fabricación, puede comportarse de manera diferente al incorporarse al sistema electroquímico [33].

El grafito expandido, por su estructura porosa y gran superficie, mejora el contacto entre el material activo y el electrolito en la placa negativa. Esto puede aumentar la capacidad de descarga y alargar la vida útil, sobre todo en descargas profundas [34].

También se ha evaluado el grafeno como aditivo, pese a su mayor costo, su estructura bidimensional mejora la conductividad y estabilidad de la placa negativa, aumentando la capacidad de descarga y la vida útil [35].

El negro de carbón es otro aditivo de carbono ampliamente utilizado en las baterías de plomo-ácido, en muchos casos en combinación con el grafito. Debido a su estructura amorfa y a su elevada área superficial, este material puede contribuir a mejorar la conductividad eléctrica y la porosidad del material activo, favoreciendo una mejor distribución de la corriente dentro de las placas. Diversos estudios han analizado el uso de negro de carbón, así como su modificación mediante la incorporación de grafito, con el fin de optimizar su comportamiento como aditivo en el electrodo negativo [36].

La selección del tipo de aditivo de carbono a emplear depende de varios factores, entre los que se incluyen el diseño específico de la batería, las condiciones de operación previstas y los costos asociados al proceso de fabricación. En este sentido, la combinación



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



de diferentes aditivos de carbono ha sido estudiada como una estrategia para aprovechar los efectos complementarios de cada material, permitiendo mejorar el rendimiento electroquímico y la vida útil de las baterías de plomo-ácido sin incrementar de forma significativa los costos de producción [37].

#### **2.4.3 Antecedentes sobre el efecto del uso de aditivos en baterías de plomo-ácido**

Diversos estudios han analizado el uso de aditivos en baterías de plomo-ácido, considerando aspectos como su tipo, concentración óptima y los mecanismos mediante los cuales influyen en los distintos componentes de la batería. Uno de los efectos más estudiados es su impacto sobre la conductividad eléctrica y la transferencia de iones en las placas. En este contexto, el empleo de aditivos a base de carbono, como el negro de humo o las fibras de carbono, en las pastas activas ha demostrado mejorar la conductividad eléctrica del material activo, lo que se traduce en un aumento de la capacidad y de la eficiencia general de la batería [38].

También se han incorporado elementos como antimonio, estaño y calcio en las aleaciones de las rejillas de plomo para mejorar su resistencia frente a la corrosión. Con ello se logra extender el tiempo de uso de las placas y conservar mejor su estabilidad mecánica cuando la batería trabaja durante múltiples ciclos de carga y descarga [39].

En el electrolito también se han probado aditivos como ácido bórico y glicerol, los cuales favorecen el movimiento de iones dentro de la batería y disminuyen la resistencia interna, permitiendo un funcionamiento más eficiente. El carbonato de propileno, por su parte, muestra mejor comportamiento cuando la batería trabaja a bajas temperaturas, donde normalmente la conductividad del medio disminuye [40].

De forma similar, algunos compuestos inorgánicos como el sulfato de amonio o el nitrato de plomo pueden generar capas protectoras sobre las placas, lo que ayuda a reducir la corrosión y el deterioro del material activo.

La sulfatación de las placas es uno de los problemas más comunes en las baterías de plomo-ácido, ya que la acumulación de sulfato de plomo disminuye la capacidad disponible.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



El bismuto, el estaño y el selenio ayudan a disminuir este efecto y alargar la vida útil, aunque también pueden causar incompatibilidades, mayor generación de gases o incremento en los costos de fabricación [41].

Se emplean aditivos de carbono como negro de humo, grafito y nanotubos en la placa negativa. Al mejorar la conductividad del electrodo, facilitan el paso de electrones, aumentan la aceptación de carga y disminuyen la resistencia interna [42].

El carbono en la pasta activa cambia el comportamiento de la sulfatación, durante los ciclos de carga y descarga, el sulfato de plomo tiende a formarse de manera más uniforme, evitando la aparición de depósitos grandes que normalmente deterioran la capacidad disponible de la batería. Como resultado, el material activo puede participar con mayor eficiencia en las reacciones electroquímicas y el acumulador mantiene su funcionamiento durante más tiempo [43]. No obstante, el efecto final de estos aditivos depende tanto del tipo y la cantidad de carbono empleado como de las condiciones específicas de operación, por lo que su optimización continúa siendo un tema relevante de investigación.

#### **2.4.4 Selección del grafeno como aditivo de carbono para el estudio**

Basándonos en la revisión de los diferentes tipos de aditivos de carbono y sus efectos en las baterías de plomo-ácido, este estudio se enfocará en el uso de grafeno como aditivo para mejorar el rendimiento de las baterías. La selección del grafeno se fundamenta en varias consideraciones clave:

El grafeno ha demostrado ser un aditivo prometedor en las baterías de plomo-ácido debido a su alta conductividad eléctrica intrínseca, superando significativamente al negro de humo tradicional. Esta propiedad contribuye directamente a mejorar la eficiencia de los procesos de carga y descarga de la batería. Investigaciones recientes indican que la incorporación de grafito en la pasta activa puede reducir la tasa de evolución de gases como el hidrógeno y el oxígeno durante la operación, lo que ayuda a disminuir la pérdida de agua del electrolito y favorece un funcionamiento más estable del sistema [44].

El grafito presenta una estructura formada por láminas superpuestas, característica que influye directamente en su comportamiento dentro de la pasta negativa, al incorporarse



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



en el material activo facilita el paso de electrones entre las partículas, generando zonas de conducción más estables. Esto provoca que la resistencia del electrodo disminuya y que la batería trabaje de forma más eficiente durante los ciclos de carga y descarga, reflejándose en un mejor desempeño general [45].

Otra característica relevante del grafito es que puede encontrarse en diferentes tamaños de partícula, desde partículas relativamente gruesas hasta escalas muy finas cercanas al orden nanométrico. Esto permite ajustar la composición de la pasta activa dependiendo del tipo de aplicación que se busque. A diferencia de otros materiales de carbono más sofisticados, como los nanotubos o el grafeno, el grafito resulta mucho más accesible económicamente, manteniendo un balance adecuado entre mejora del desempeño y posibilidad de uso práctico a gran escala [46].

En este trabajo se trabajó con la adición de grafeno en la pasta negativa de baterías de plomo-ácido. Para observar su efecto, se prepararon mezclas con concentraciones entre 0,5 % y 2 % en peso. Posteriormente se comparó su comportamiento con una batería sin modificar, analizando principalmente cambios en la capacidad, el comportamiento durante los ciclos de carga y descarga y la estabilidad a lo largo de los ensayos

En la metodología se integra la evaluación de parámetros importantes como la eficiencia en los ciclos de carga/descarga y la durabilidad. Los resultados revelaron que las concentraciones en el rango del 1% al 1.5% en peso ofrecieron los beneficios más significativos en términos de rendimiento general y longevidad de la batería [47].

Se estudia cómo el grafito interactúa con el electrolito y las placas, y cómo afecta la formación de sulfato de plomo durante los ciclos. Además, se observa su impacto en la conductividad de la pasta negativa, la resistencia interna y la eficiencia coulombica.

Asimismo, se analiza el impacto del grafito en la estabilidad estructural de los electrodos y su capacidad para mitigar la sulfatación irreversible, uno de los principales factores que limitan la vida útil de las baterías de plomo-ácido. Para ello, el estudio incluye un análisis microscópico de la morfología de los electrodos, con el fin de comprender de mejor manera cómo la adición de grafeno modifica la estructura de la pasta activa.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Se observó que el grafeno cambia la formación del sulfato de plomo y mantiene más estable el electrodo. En el microscopio la pasta activa aparece más uniforme cuando está presente el aditivo, lo que hace más reversibles los ciclos y disminuye la sulfatación permanente.

### Capítulo III

## METODOLOGÍA Y MATERIALES

### Introducción general de la metodología aplicada

En este capítulo se detalla la metodología seguida para evaluar la influencia de los aditivos de carbono en el desempeño de las baterías de plomo-ácido. Para ello se partió desde la selección y preparación de las baterías hasta la ejecución de los ensayos experimentales.

Se explicó la forma en la que el aditivo fue incorporado y la manera en que se registraron variables eléctricas relevantes, principalmente corriente durante los procesos de carga y descarga. Se describen los procedimientos aplicados antes y durante las pruebas, los cuales permitieron observar el comportamiento eléctrico del sistema y posibles cambios físicos en los componentes internos de las baterías a lo largo de su operación.

La metodología empleada se planteó con el fin de obtener una perspectiva más completa del funcionamiento de las baterías, evaluando la incorporación de aditivos de carbono y su efecto, tanto en el desempeño electroquímico como en la vida útil de las baterías de plomo-ácido bajo condiciones controladas.

### 3.1 Delimitación del lugar

El estudio se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Técnica del Norte, laboratorio de la carrera de Ingeniería Eléctrica y laboratorio de la carrera de biotecnología que disponen del equipamiento necesario para realizar los ciclos de carga y descarga de las baterías, así como para aplicar las modificaciones con aditivos de carbono. Para ello se utilizaron fuentes de alimentación reguladas, instrumentos de medición y herramientas



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



adecuadas para manipular de manera segura tanto las baterías como los materiales empleados.

A partir de estas condiciones se planteó una metodología experimental orientada a evaluar de manera práctica el efecto del aditivo sobre el comportamiento de las baterías. En las secciones siguientes se presenta el procedimiento adoptado durante el desarrollo del estudio.

### **3.1.1 Descripción de mejoras en baterías**

Se utilizó el aditivo de carbono con el objetivo de mejorar el rendimiento de las baterías de plomo-ácido, donde su aplicación formó parte de un proceso orientado a incrementar la conductividad eléctrica del sistema y a optimizar la estructura del material activo. Se esperó que esta modificación contribuyera a una mayor eficiencia durante los ciclos de carga y descarga, así como a una reducción en la formación de cristales grandes de sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ), lo cual se reflejaría en una mejor conservación de la capacidad con el paso de los ciclos y en una disminución de la degradación funcional de la batería a lo largo del tiempo.

### **3.2 Metodología**

La metodología se organizó en dos partes. En la primera se revisó bibliografía para ubicar el problema técnico principal de las baterías de plomo-ácido, relacionado con su baja densidad de potencia, y conocer qué soluciones con materiales carbonosos han sido más reportadas. Con base en esa información se definieron las variables a medir, los parámetros de control y la forma más viable de incorporar el aditivo según las condiciones disponibles en el laboratorio.

Posteriormente se desarrolló la etapa experimental. A partir de lo encontrado en la literatura se consideró que el nano-grafeno podía influir en el electrodo negativo al generar trayectorias conductoras y una estructura más porosa del material activo, lo que normalmente favorece la aceptación de carga y reduce la sulfatación temprana. Para verificarlo se compararon los registros eléctricos obtenidos en ciclos repetidos de carga y descarga (voltaje, corriente y potencia) entre las baterías modificadas y la batería de referencia.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Como segunda variante se agregó una pequeña cantidad de nano-grafeno al electrolito para ver si modificaba el comportamiento eléctrico, sobre todo la estabilidad de energía y la respuesta bajo carga.

El análisis se realizó a partir de los registros de voltaje obtenidos durante los ciclos de descarga, comparando la estabilidad de la respuesta eléctrica entre las muestras evaluadas y considerando posibles variaciones asociadas al transporte iónico y al sobrepotencial.

Del mismo modo, cualquier variación en la formación de gas se revisó considerando también las condiciones de operación y la inspección física del electrolito y del interior de la batería, procurando no atribuir el efecto únicamente al aditivo sin evidencia adicional. Considerando ambas intervenciones (tanto en las placas como en el electrolito) se evidenció una mejora general en el comportamiento de las baterías de plomo-ácido. La composición de una reacción electroquímica más eficaz con un menor deterioro progresivo permitió obtener un sistema más estable en comparación con la configuración convencional.

Para cuantificar estos efectos se realizaron ensayos controlados empleando baterías de 12 V y 7 Ah, organizadas en tres grupos: una batería sin modificación utilizada como referencia y dos baterías modificadas mediante distintos métodos de incorporación del nanografeno. Las pruebas se realizaron bajo condiciones estables, registrando variables como voltaje, corriente y potencia mediante un sistema automatizado basado en Arduino Mega 2560.

Durante la etapa de carga el sistema se mantuvo en operación hasta que el sensor de corriente ACS712 registró un valor cercano a cero amperios, considerado como estado de carga completa. En ese momento un relé conmutó hacia la fase de descarga conectando una carga resistiva. El módulo PZEM-017 registró en tiempo real el voltaje y la corriente, almacenando los datos en una tarjeta SD una medición por segundo. Este proceso se mantuvo de manera continua hasta completar entre 100 y 200 ciclos de carga y descarga en cada batería, lo que corresponde a una parte importante de su vida útil.



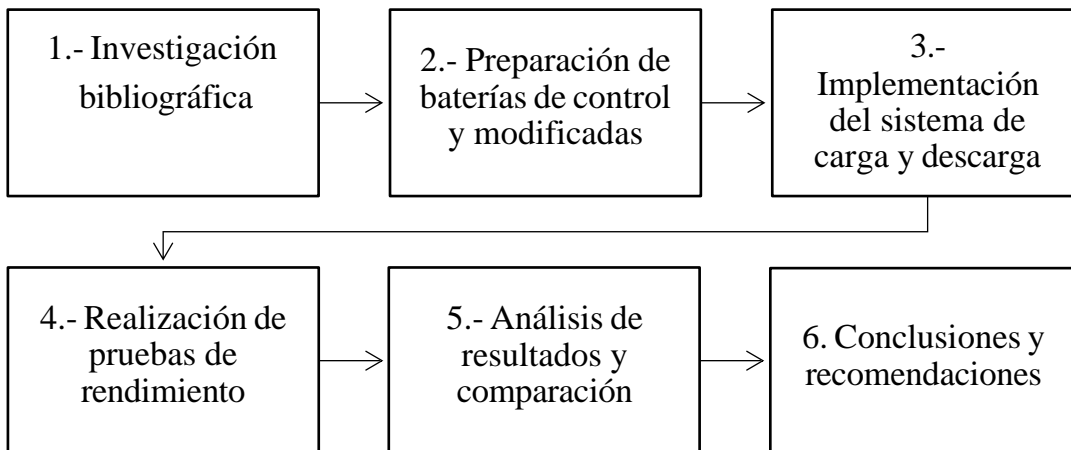
Mediante este sistema automatizado fue posible comparar con mayor precisión el comportamiento eléctrico de cada grupo experimental, observar indicios tempranos de degradación y estimar el efecto del nanografeno sobre el rendimiento de las baterías.

La metodología adoptada permitió relacionar las variables eléctricas medidas con los cambios estructurales internos observados, en concordancia con los objetivos planteados en esta investigación.

También se utilizó un estereomicroscopio para un análisis cualitativo de los componentes internos de las baterías, observando posibles dendritas y procesos de corrosión. Estas observaciones se realizaron en los laboratorios de química de la universidad.

La metodología combinó mediciones eléctricas con observación microscópica de cambios físicos en los electrodos. Para resumir las etapas experimentales se incluyó un diagrama de flujo que muestra la preparación de las baterías y la ejecución de las pruebas.

**3.2.1 Diagrama de flujo**



El flujograma presentado describe la metodología sistemática empleada en este estudio sobre baterías de plomo-ácido con aditivos de carbono. Comenzó con una exhaustiva investigación bibliográfica para establecer el estado del arte y fundamentar el enfoque experimental.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Posteriormente se prepararon baterías de referencia y baterías modificadas mediante la incorporación de aditivos de carbono, procurando mantener las mismas condiciones de trabajo para poder comparar adecuadamente los resultados entre los distintos grupos. Para ello se implementó un sistema de carga y descarga diseñado específicamente para evaluar el comportamiento de las baterías bajo condiciones controladas.

Las pruebas se realizaron midiendo parámetros eléctricos como voltaje y corriente durante los procesos de carga y descarga. Los datos fueron registrados de manera continua a lo largo de múltiples ciclos con el fin de observar la evolución del comportamiento de cada batería con el tiempo. Se definió trabajar entre 100 y 200 ciclos de carga y descarga con el fin de observar variaciones en el comportamiento entre la batería modificada y la de referencia.

Considerando que en las investigaciones reportan entre 400 y 600 ciclos completos para este tipo de baterías en condiciones controladas, el límite de 200 ciclos permitió evaluar el efecto acumulativo del aditivo sin llevar al acumulador a un deterioro total. De esta manera se logró equilibrar el tiempo de ensayo, la repetibilidad de los resultados y la conservación de las baterías para su posterior análisis microscópico.

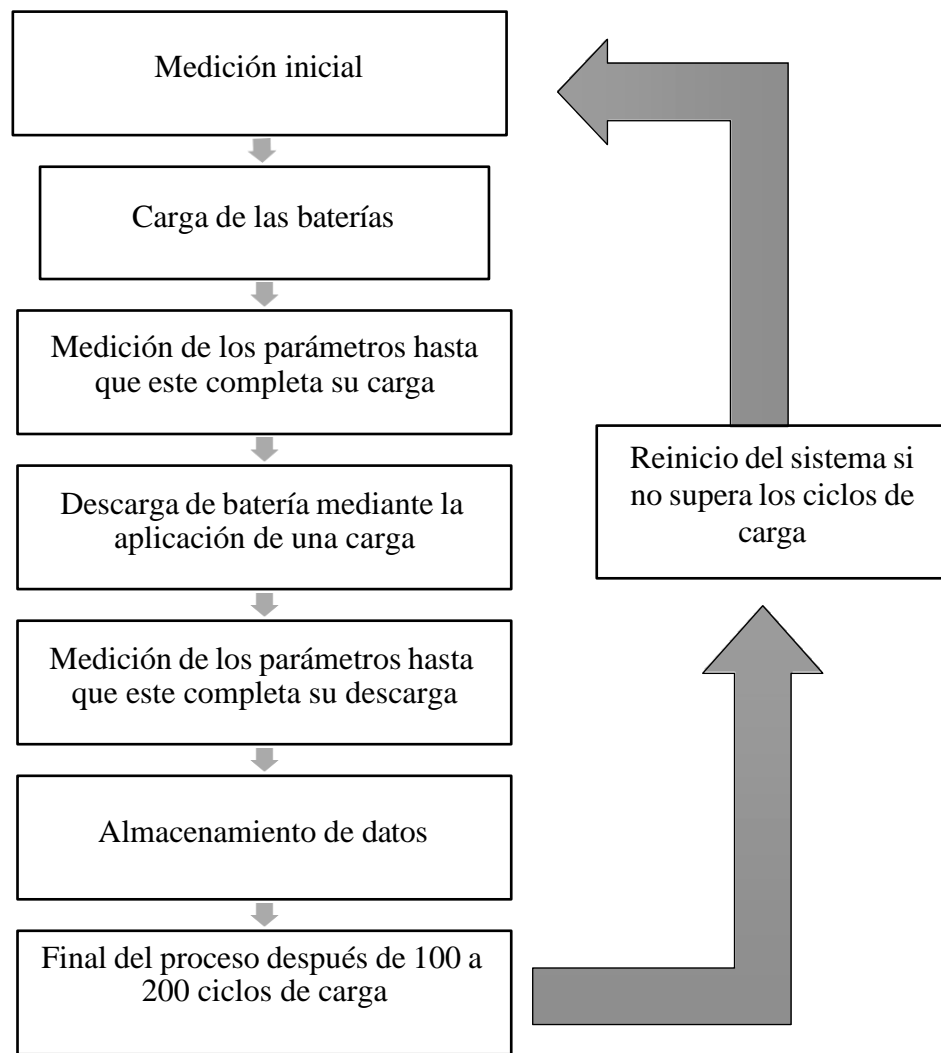
El análisis se realizó comparando directamente la batería de control con las baterías modificadas y aplicando métodos estadísticos para validar las diferencias observadas en el comportamiento eléctrico. A partir de estos resultados se planteó conclusiones y probables líneas de trabajo futuras relacionadas con el uso de aditivos de carbono en baterías de plomo-ácido.

Con base en el procedimiento seguido, se presenta un diagrama de flujo que resume las etapas principales del proceso experimental. Este esquema permite visualizar la secuencia de operación del sistema automatizado, desde la carga inicial hasta la descarga y el registro de datos durante cada ciclo.



**3.2.2 Descripción del funcionamiento del sistema de carga y descarga**

El sistema de carga y descarga se diseñará para evaluar el rendimiento de las baterías de plomo-ácido con y sin la adición de nanografeno. Este sistema permitirá controlar y medir con precisión los parámetros clave durante los ciclos de carga y descarga.



El diagrama de flujo corresponde al proceso de prueba y monitoreo de la batería. Inicialmente se realizó una medición de los parámetros eléctricos y posteriormente se



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



ejecutaron ciclos controlados de carga y descarga mediante un módulo basado en Arduino Mega 2560.

Durante cada ciclo se registraron voltaje, corriente y tiempo en tiempo real por segundos. El sensor ACS712 identifica el fin de la carga cuando la corriente se aproximó a cero, mientras que el módulo PZEM-017 registró las condiciones eléctricas durante la descarga

La descarga se llevó a cabo aplicando una carga resistiva controlada electrónicamente mediante dos módulos relé. Al alcanzarse el voltaje mínimo de descarga predefinido (10.5 V), el sistema conmutó automáticamente hacia la fase de carga, completando así un ciclo. Todos los datos fueron almacenados de manera continua en una tarjeta microSD, con registros cada segundo, asegurando un historial detallado del comportamiento de la batería. El ciclo, definido como el período comprendido entre una carga completa y la descarga hasta alcanzar el umbral mínimo establecido, se repitió entre 100 y 200 veces para cada una de las baterías evaluadas. Este procedimiento permitió analizar tanto el rendimiento como la durabilidad de las baterías a lo largo de múltiples ciclos de uso, proporcionando información relevante sobre su comportamiento y su proceso de degradación con el tiempo.

Una vez definido el funcionamiento general del sistema de prueba, fue necesario realizar una selección cuidadosa de los materiales y componentes requeridos, con el fin de asegurar una implementación eficiente y confiable del sistema experimental.

### **3.3 Materiales**

El impacto de aditivos de carbono en baterías de plomo-ácido requiere una cuidadosa selección de materiales para garantizar resultados precisos y significativos.

#### **3.3.1 Baterías de plomo ácido**

Las baterías de plomo-ácido presentan una construcción simple basada en electrodos de plomo y óxido de plomo sumergidos en ácido sulfúrico. Cada celda entrega cerca de 2 V, por lo que una batería de 12 V se forma mediante seis celdas conectadas en serie. Su densidad energética suele situarse entre 30 y 50 Wh/kg y la densidad de potencia entre 75 y 130 W/kg. En condiciones normales de operación, la eficiencia de este tipo de baterías suele ubicarse



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



aproximadamente entre el 70 % y el 80 %, aunque puede variar según la forma de uso y el régimen de carga y descarga [49].

La vida útil también depende en gran medida del mantenimiento y de las condiciones de operación. De manera referencial, puede situarse alrededor de 4 años, siendo capaces de soportar del orden de 400 a 600 ciclos completos antes de presentar pérdidas apreciables de rendimiento. Una de sus ventajas es la baja tasa de autodescarga, cercana al 3 %–4 % mensual a temperatura ambiente. Su desempeño óptimo suele alcanzarse en un rango de temperatura comprendido entre 20 °C y 35 °C, disminuyendo su eficiencia en condiciones térmicas extremas [50].

En el caso de las baterías no selladas, es necesario realizar revisiones periódicas del nivel del electrolito, lo que forma parte de su mantenimiento regular. Estas baterías se caracterizan además por su bajo costo y por una alta tasa de reciclabilidad, que supera el 98 % de sus componentes. No obstante, los tiempos de carga suelen ser prolongados, requiriendo varias horas para alcanzar una carga completa. Asimismo, se debe evitar la realización frecuente de descargas profundas, ya que estas pueden afectar de manera negativa la integridad estructural y la vida útil del acumulador, especialmente cuando se desciende de forma repetida por debajo del 30 % de la capacidad nominal [51].

En esta investigación se evitó intencionalmente someter a las baterías a descargas profundas, con el objetivo de preservar sus condiciones estructurales y electroquímicas durante las etapas iniciales de evaluación. Este enfoque metodológico permitió analizar el impacto del aditivo de carbono dentro de un rango operativo seguro, evitando daños prematuros que pudieran alterar los resultados. Para ello, se estableció un umbral mínimo de descarga de 10,5 V, valor ampliamente aceptado en la literatura técnica como límite previo al inicio de procesos de degradación irreversible, como la sulfatación severa o la pérdida de material activo.

Al trabajar con descargas controladas y realizar 200 ciclos por batería, se cubrió una parte significativa de la vida útil sin llevar la batería al final de su ciclo de operación. Este rango permitió observar los primeros indicios de degradación y comparar el comportamiento



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



entre las baterías modificadas y la de referencia sin someterlas a un desgaste excesivo que alterara los resultados.

De esta manera, la metodología aplicada permitió evaluar la influencia del aditivo sobre el rendimiento del sistema, manteniendo condiciones estables y repetibles durante el ensayo.

### **3.3.2 Dispositivos de medición**

Este dispositivo permitió monitorear directamente variables eléctricas como voltaje, corriente y potencia, lo cual facilitó el seguimiento del comportamiento de la batería durante los ciclos de carga y descarga.

Se emplearon distintos dispositivos electrónicos para el monitoreo y control del sistema automatizado, seleccionados por su precisión, compatibilidad con Arduino y capacidad de continua operación durante las pruebas.

El módulo PZEM-017 se utilizó para la medición en corriente continua en el sistema de baterías, el módulo dispone de comunicación tipo TTL, lo que hizo posible su conexión con el microcontrolador y el sistema de adquisición de datos utilizado en el montaje. De acuerdo con sus especificaciones, el PZEM-017 trabaja en un rango aproximado de 6,5 V a 100 V con una precisión cercana a  $\pm 0,5\%$  en la medición de voltaje y alrededor de  $\pm 0,1\%$  para corrientes de hasta 20 A. Estas características lo convierten en una herramienta adecuada para la adquisición confiable de datos eléctricos en sistemas de prueba controlados.

El dispositivo opera en un rango de temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $65^{\circ}\text{C}$ , lo que lo hace adecuado para una variedad de entornos de aplicación.

El ACS712 es un sensor de corriente basado en efecto Hall, ampliamente utilizado para medir corriente alterna (AC) y continua (DC) en aplicaciones electrónicas. Su funcionamiento se basa en la detección del campo magnético generado por la corriente que circula a través de una pista conductora integrada, el cual es traducido en una señal analógica proporcional al valor de la corriente. El modelo usado es de  $\pm 20$  A con una sensibilidad típica de 100 mV/A



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### 3.3.3 Placas de desarrollo

El Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo versátil ofrece 54 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 15 pueden usarse como salidas PWM. El microcontrolador empleado dispone de varias entradas analógicas y múltiples puertos serie por hardware, además de trabajar con un oscilador de 16 MHz y conexión USB. Sus capacidades de memoria permiten ejecutar programas relativamente extensos y manejar la adquisición continua de datos durante los ensayos.

La alimentación del sistema pudo realizarse mediante el puerto USB o a través de una fuente externa entre 7 y 12 V, lo que facilitó su adaptación al montaje experimental utilizado en las pruebas [54][55].

### 3.3.4 Aditivos de carbono

Los aditivos de carbono utilizados en baterías de plomo-ácido incluyen diversas formas que ofrecen características únicas:

**Negro de carbono:** Este material amorfo posee una estructura altamente porosa y gran área superficial. Su adición mejora la conductividad eléctrica y la porosidad del material activo [56].

**Nanotubos de carbono:** Estas estructuras cilíndricas de carbono a escala nanométrica ofrecen una conductividad eléctrica excepcional, mejorando significativamente la transferencia de electrones en el electrodo [57].

**Las fibras de carbono:** aportan refuerzo estructural y contribuyen a mejorar la conductividad del material activo, facilitando el transporte de electrones a través del electrodo y aumentando su durabilidad [58].

**El grafeno:** presenta características particulares asociadas a su estructura bidimensional, lo que permite incrementar la conductividad y favorecer la estabilidad del material activo dentro de la batería [59].



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Grafito: Se diferencia como un aditivo de carbono versátil y efectivo, su estructura cristalina en capas facilita la conducción eléctrica y proporciona canales eficientes para el transporte de electrones en el material activo de la batería [60].

Luego de establecer los materiales fundamentales del sistema, se plantearon las expectativas en cuanto a su comportamiento durante la experimentación. En la siguiente sección se detallan los resultados esperados en función de los antecedentes y de las propiedades técnicas de los aditivos utilizados

### **3.4 Descripción de resultados esperados**

En esta sección, se presentaron las proyecciones sobre los posibles efectos de la incorporación de aditivos de carbono en las baterías de plomo-ácido.

El estudio consideró la posible influencia de los aditivos de carbono sobre distintos parámetros del rendimiento de la batería, incluyendo conductividad eléctrica, comportamiento durante los ciclos de carga y descarga y procesos de formación de compuestos en las placas internas.

Además de las mediciones eléctricas registradas durante los ciclos, se realizó un análisis cualitativo del estado físico de las placas mediante estereomicroscopía. La observación se centró en la identificación de sulfatación, formación de dendritas y pérdida de cohesión del material activo. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de química de la universidad.

Este procedimiento permitió obtener información visual adicional para el análisis del comportamiento del sistema.

#### **3.4.1 Implementación del sistema de carga y descarga**

Para la evaluación del rendimiento de las baterías de plomo-ácido modificadas, se diseñó e implementó una estación de pruebas completamente automatizada que permitió realizar ciclos repetitivos de carga y descarga sin intervención humana, garantizando así condiciones experimentales uniformes, controladas y replicables. El sistema experimental fue desarrollado sobre una plataforma Arduino Mega 2560, la cual fue seleccionada debido



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



a su mayor número de pines de entrada y salida, así como a su mayor capacidad de memoria y procesamiento en comparación con versiones estándar. Estas características facilitaron la integración de los distintos sensores y módulos electrónicos necesarios para la adquisición, control y almacenamiento de datos durante las pruebas.

El sistema estuvo conformado por tres módulos electrónicos independientes, uno para cada batería analizada. Se trabajó con una batería sin modificar que sirvió como grupo de control y dos baterías intervenidas mediante la incorporación del aditivo de carbono, utilizando dos métodos distintos: la mezcla directa del aditivo en la pasta activa negativa y el recubrimiento superficial de las placas. Las baterías se dispusieron de manera simultánea bajo las mismas condiciones de prueba.

Durante la carga el sistema se conectó a una fuente tipo cargador que suministró corriente. El estado de carga completa se determinó mediante un sensor de corriente ACS712 (20 A), que permitió monitorear el flujo de corriente y detectar cuando descendía a valores cercanos a cero.

Cuando la corriente medida caía por debajo de un umbral predefinido (aproximadamente 0,05 A), el sistema interpretaba que la batería había alcanzado su carga máxima. Este umbral fue determinado mediante pruebas previas y verificación del comportamiento típico de carga en baterías de 7 Ah, donde una corriente residual próxima a cero indica saturación del material activo.

Una vez alcanzado este punto, un módulo de relé electromecánico programado en la lógica del microcontrolador, actuaba sobre el circuito, conmutando automáticamente la conexión desde el cargador hacia una carga resistiva de descarga, compuesta por bancos de resistencias cerámicas de alta potencia (con valores seleccionados para asegurar un régimen de descarga constante y seguro). Durante la fase de descarga, se activaba el módulo de medición PZEM-017, encargado de registrar en tiempo real parámetros fundamentales: voltaje, corriente y potencia. Este módulo se comunicaba con el Arduino mediante el protocolo Modbus RTU a través de una interfaz RS-485, asegurando precisión en la lectura de datos y minimizando errores por ruido eléctrico.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



La adquisición de datos fue programada para realizar una lectura por segundo. Esta frecuencia de muestreo fue seleccionada tras pruebas preliminares que demostraron que un intervalo menor generaba archivos excesivamente grandes sin aportar mayor resolución útil para los análisis. Todos los datos medidos fueron registrados en una tarjeta microSD mediante un módulo lector conectado al Arduino, generando archivos .csv independientes por cada ciclo y batería, lo cual facilitó su análisis posterior en herramientas como Excel.

El sistema incorporó una lógica de protección destinada a evitar descargas profundas de las baterías. Para ello, se programó una desconexión automática cuando el voltaje descendía hasta 10,5 V, valor que se considera en la literatura técnica y por los fabricantes como el umbral mínimo de descarga segura. Operar por debajo de este límite puede provocar procesos de sulfatación irreversible y daños permanentes en las placas internas. Esta configuración permitió observar el comportamiento de las baterías dentro de un rango de trabajo similar al de uso normal, evitando provocar daños prematuros desde los primeros ciclos de prueba.

Además, el sistema fue programado para reiniciar automáticamente el proceso. Cuando el voltaje alcanzaba el límite mínimo de descarga, la fuente de alimentación se activaba nuevamente y comenzaba la etapa de carga sin intervención manual.

Cada ciclo, desde la carga completa hasta la descarga a 10,5 V, se repitió entre 100 y 200 veces por batería, según la disponibilidad de tiempo de ensayo y el comportamiento operativo de cada acumulador. Este rango corresponde aproximadamente al 25 %–50 % de la vida útil típica reportada para baterías de plomo-ácido convencionales.

El sistema modular permitió realizar ensayos simultáneos en las tres baterías, manteniéndolas bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura, humedad y carga conectada. De esta forma se minimizaron variaciones externas entre pruebas y se mantuvieron condiciones similares para todas las baterías.

Al finalizar los ensayos, los datos eléctricos obtenidos se complementaron con una revisión física del estado interno de los acumuladores. Para ello se utilizó el estereomicroscopio, con el que se observaron cambios estructurales en las placas, tales como



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



desgaste del material activo y posible aparición de dendritas. Estas observaciones estructurales aportaron evidencia visual sobre los efectos acumulados de los ciclos y la eficacia de cada técnica de incorporación del aditivo.

### **3.4.2 Pruebas de funcionamiento**

El procedimiento experimental consistió en someter las baterías a ciclos repetidos de carga y descarga controlados, con el objetivo de evaluar el impacto del aditivo de carbono incorporado.

Se realizó una caracterización eléctrica inicial únicamente a la batería sin modificar, la cual fue utilizada como referencia para establecer los parámetros base del experimento. Para la comparación se construyeron tres módulos: uno destinado a la batería de referencia y dos a las baterías modificadas. Cada módulo incluyó un Arduino Mega 2560, un sensor de corriente ACS712, un medidor PZEM-017, dos relés, una carga resistiva y un sistema de almacenamiento en tarjeta SD. Las tres baterías se ensayaron simultáneamente bajo el mismo entorno de trabajo.

En cada ciclo el módulo inició en modo carga hasta que el sensor ACS712 registró corriente cercana a cero amperios donde el relé desconectó el cargador y conectó la carga resistiva para iniciar la descarga. Durante esta etapa el PZEM-017 registró voltaje y corriente, almacenando los datos en la tarjeta SD por segundo. Se consideró ciclo completo el intervalo comprendido entre la carga total y la descarga hasta un voltaje de 10,5 V.

El procedimiento se repitió 200 ciclos por cada batería, lo que permitió trabajar dentro de una parte representativa de su vida útil e identificar con mayor claridad cambios asociados a la degradación, la eficiencia de carga y la disminución progresiva de capacidad.

De forma complementaria a las mediciones eléctricas, se efectuó un análisis estructural utilizando el estereomicroscopio. Para ello se examinaron muestras obtenidas de las placas internas al finalizar las pruebas, con el fin de observar posibles alteraciones físicas provocadas por la operación cíclica.

Este análisis permitió identificar de forma visual fenómenos como la sulfatación, el desprendimiento del material activo y la corrosión superficial. La correlación entre estas



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



observaciones y los datos eléctricos registrados permitió obtener una evaluación integral del impacto del aditivo de carbono sobre el rendimiento funcional y la estabilidad estructural de las baterías de plomo-ácido.

### **3.4.3 Modificación de baterías con aditivos de carbono**

La investigación consideró la modificación de baterías de plomo-ácido a partir de la incorporación de aditivos de carbono, empleando nanopartículas de grafeno de 6 a 8 capas. El material fue incorporado tanto en las placas activas como en el electrolito ácido, con el propósito de evaluar su influencia en el comportamiento durante los procesos de carga y descarga y en la vida útil operativa del sistema.

En este trabajo se evaluaron dos formas de añadir el aditivo. En la primera, el grafeno se incorporó en la pasta activa de la placa negativa, debido a que en esta zona ocurren las reacciones principales durante los ciclos de carga y descarga.

La intervención se realizó sobre esta placa porque normalmente es donde primero aparecen problemas como la sulfatación y el incremento de la resistencia interna, lo que con el tiempo provoca que la batería entregue menos rendimiento.

La incorporación del grafeno buscó mejorar la conductividad, facilitar la distribución del material activo y aumentar la eficiencia de las reacciones durante los ciclos de carga y descarga. [38]

En el segundo caso, el grafeno fue dopado directamente en el electrolito, es decir, se dispersó en pequeñas cantidades dentro de la solución de ácido sulfúrico que actúa como medio iónico de la batería. La incorporación de grafeno en el electrolito puede favorecer la movilidad de los iones, disminuir la resistencia interna y contribuir a un entorno químico más estable dentro de la batería.

En ambos métodos de modificación los procedimientos se realizaron bajo condiciones controladas, empleando proporciones definidas y protocolos constantes. Estas condiciones se mantuvieron para reducir variaciones en el proceso de preparación.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Una tercera batería, que no recibió ningún tipo de intervención, fue utilizada como grupo de control o referencia. La evaluación comparativa entre las tres muestras se realizó de manera paralela utilizando módulos de prueba independientes y automatizados, que permitieron someter a cada batería a entre 100 y 200 ciclos completos de carga y descarga bajo las mismas condiciones ambientales. Esta metodología permitió analizar no solo el comportamiento eléctrico a lo largo de los ciclos, sino también evaluar los efectos físicos acumulativos, estableciendo diferencias claras entre ambos métodos de incorporación del aditivo y respecto a la batería convencional.

Los procedimientos experimentales fueron realizados en el laboratorio de Química de la Universidad Técnica del Norte. En esta fase se diseñaron mezclas específicas de nanopartículas de grafeno con dos medios: dióxido de silicio, empleado como sustrato viscoso para aplicación sobre placas, y ácido sulfúrico diluido, correspondiente al electrolito funcional de las baterías.



**Fig. 1** Equipo de laboratorio

Se prestó especial atención a lograr una dispersión homogénea del grafeno en ambos medios, evitando aglomeraciones o saturaciones que pudieran afectar el comportamiento electroquímico de las celdas para esto se utilizaron equipos de laboratorio de alta precisión como se muestra en la Figura 1 donde todas las mediciones de masa fueron realizadas con



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



una balanza Ohaus Pioneer, un equipo ampliamente reconocido en entornos científicos por su confiabilidad.

Para la preparación de las mezclas con grafeno se utilizó una balanza analítica de 0,0001 g de resolución (0,1 mg) y 220 g de capacidad máxima. El equipo dispone de calibración interna automática y compensación de temperatura, lo que permitió realizar el pesaje de las nanopartículas bajo condiciones estables durante el proceso experimental.

Las mezclas y agitaciones se llevaron a cabo utilizando un agitador magnético Fisatom 752A, que permitió una mezcla continua y homogénea en líquidos y medios semiviscosos. Este dispositivo cuenta con un control de velocidad ajustable entre aproximadamente 50 y 1200 rpm, lo que facilitó modificar la fuerza de agitación según la viscosidad del medio utilizado, como el ácido sulfúrico o las suspensiones que contienen dióxido de silicio.

En la práctica, las evaluaciones se ejecutaron, por lo general, a velocidades moderadas, que variaron entre 300 y 500 revoluciones por minuto, puesto que este intervalo facilitó garantizar una correcta uniformidad de las mezclas sin provocar una inclusión excesiva de burbujas de aire.

Se emplearon tubos de ensayo de 15 ml y 50 ml para realizar pruebas preliminares antes de preparar las mezclas finales.

El dióxido de silicio se utilizó como medio de suspensión y dispersión de las nanopartículas de grafeno para su incorporación en las superficies tratadas.

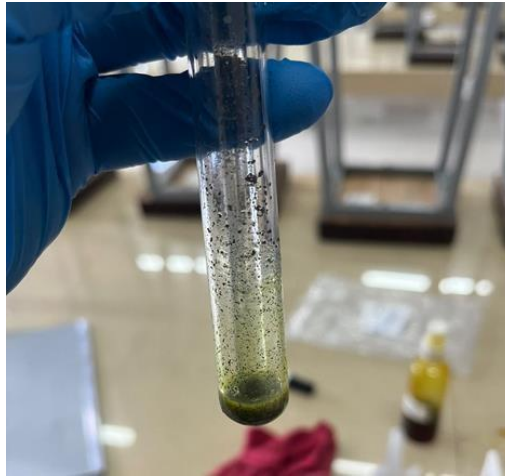
Para iniciar el proceso, se prepararon pequeñas muestras de prueba de 0.5 ml a partir de un volumen total disponible de 38 ml de dióxido de silicio. Al inicio se utilizó 0.5 ml para realizar mezclas experimentales con diferentes concentraciones de nanopartículas las cuales fueron las siguientes: 0.1, 0.01 y 0,001 gramos de nano partículas de grafeno para identificar la proporción óptima que asegurara homogeneidad sin provocar sobresaturación. Las pruebas fueron llevadas a cabo en tubos de ensayo de vidrio, empleando un agitador magnético para promover la integración mecánica de los componentes sin alterar sus



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



propiedades estructurales. Cada ensayo fue documentado con observaciones directas, fotografías de las mezclas y análisis visual de la dispersión alcanzada.



**Fig. 2** Primera mezcla de dióxido de 0.5 ml de silicio con 0.1 gramos de nanografeno

En la primera prueba se mezcló 0.5 ml de dióxido de silicio con 0.1 gramo de nanopartículas de grafeno. Esta combinación fue el punto de partida para observar el comportamiento en condiciones de alta concentración. La mezcla fue sometida a agitación continua durante aproximadamente 10 minutos. Al finalizar, se observó una alta saturación de partículas, con cúmulos visibles que se depositaban en el fondo del tubo como se muestra en la Figura 2. Esto evidenció que la capacidad del dióxido de silicio para dispersar material particulado tiene un límite y que, más allá de cierta concentración, las partículas comienzan a agruparse, reduciendo la homogeneidad del sistema.

A partir de esta observación se realizó una segunda prueba, esta vez manteniendo el volumen de dióxido de silicio constante (0,5 ml), pero reduciendo la cantidad de nanopartículas a 0,01 gramos. Aunque se observó una ligera mejora, los resultados presentaban puntos de concentración elevada y zonas libres de partículas, lo que indicaba que el sistema no había alcanzado un estado de equilibrio homogéneo.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 3** Mezcla final de 0,5 ml de dióxido de silicio con 0,001 gramos de nanografeno

Finalmente, como se observa en la Figura 3 se obtuvo una mezcla óptima utilizando 0,5 ml de dióxido de silicio con 0,001 gramos de nanopartículas de grafeno. A diferencia de los ensayos previos, esta preparación presentó una coloración uniforme, sin presencia de residuos no disueltos ni fases diferenciadas. Al dejarla en reposo durante más de 30 minutos, no se observó sedimentación significativa, lo que confirmó la estabilidad del sistema. En función de los resultados obtenidos en la etapa preliminar, se procedió a escalar la mezcla utilizando los 36 ml restantes de dióxido de silicio. Para ello, se aplicó una regla de tres simple con el fin de determinar la cantidad proporcional de nanopartículas de grafeno necesaria, la cual correspondió a 0,072 gramos.

Esta cantidad fue medida cuidadosamente, posteriormente incorporada en un recipiente de vidrio junto con el volumen total de dióxido de silicio. La mezcla se mantuvo en agitación continua durante aproximadamente tres horas para asegurar una adecuada dispersión de los componentes antes de su utilización en las etapas siguientes del ensayo. Posteriormente, la sustancia obtenida fue almacenada en un frasco sellado y empleada como recubrimiento sobre las placas negativas de las baterías modificadas.

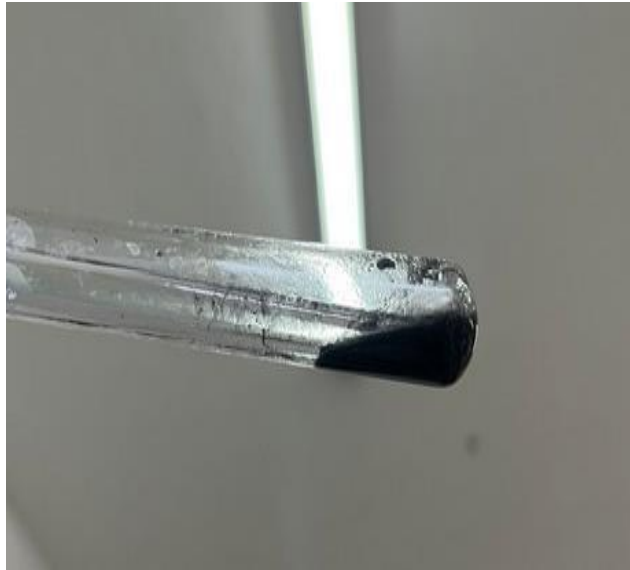
En otra etapa del experimento se procedió también a incorporar nanopartículas de grafeno directamente en el electrolito ácido de las baterías. Se trabajó con el ácido suministrado para uso en baterías de plomo-ácido, cuya composición es del 47% de ácido sulfúrico y el resto de agua destilada. Dada la naturaleza corrosiva de esta sustancia, se



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



utilizaron exclusivamente tubos de ensayo y materiales resistentes al ácido para todas las manipulaciones.



**Fig. 4** Primera mezcla del ácido de batería con nanografeno

La primera mezcla consistió en añadir 0,5 gramos de nanopartículas de grafeno a 1 ml de ácido sulfúrico como se muestra en la Figura 4. La mezcla fue agitada por cinco minutos con barra magnética, pero presentó signos evidentes de sobresaturación. Se observó una acumulación inmediata de partículas en el fondo del tubo, y aunque el medio presentaba una coloración opaca, el comportamiento no era homogéneo ni estable. Esto sugirió que el medio ácido no era capaz de sostener concentraciones tan altas de material particulado sin recurrir a técnicas adicionales como la sonicación o el uso de surfactantes.

En vista de estos resultados, se redujo la cantidad de grafeno a 0,1 gramos por 1 ml de ácido. Esta nueva mezcla presentó una mejora en cuanto a la dispersión inicial, aunque se seguían observando restos en suspensión que tendían a sedimentar al cabo de algunos minutos. La mezcla era más fluida y menos densa, pero no alcanzaba aún los parámetros deseados de homogeneidad y estabilidad.



**Fig. 5** Mezclas finales del ácido de batería con nanografeno

Se realizó una tercera prueba utilizando 0,01 gramos de grafeno por mililitro de ácido. La mezcla fue más uniforme y se mantuvo relativamente estable durante el tiempo de observación, aunque algunas partículas seguían separándose del medio. Por lo tanto, se ensayó una cuarta proporción con 0,001 gramos por mililitro, donde finalmente se logró una mezcla completamente homogénea, sin evidencia visible de acumulación o segregación en comparación a la anterior mezcla como se observa en la Figura 5.

A partir de este resultado se procedió a preparar el volumen total de ácido necesario para una batería, estimado en 500 ml. Aplicando la proporción óptima, se determinó que serían necesarios 0,5 gramos de nanopartículas de grafeno para dicho volumen. La mezcla se preparó en un matraz de vidrio resistente, y fue sometida a agitación continua por tres horas utilizando el sistema magnético con barra recubierta. Se observó una buena integración del grafeno en el medio ácido, sin desprendimiento de burbujas, formación de flóculos ni separación de fases. La solución obtenida fue utilizada posteriormente como electrolito modificado en una de las baterías de ensayo, con el fin de evaluar su comportamiento durante los ciclos de carga y descarga.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Como complemento al análisis previo, se realizaron mediciones de conductividad eléctrica, expresadas en TDS (ppm), y de pH, tanto en el ácido sulfúrico sin adición de grafeno como en el electrolito modificado con nanopartículas de grafeno de entre 6 y 8 capas. Estas mediciones tuvieron como propósito verificar si la incorporación del aditivo producía cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas del electrolito antes de su introducción en las baterías, asegurando así condiciones controladas para la etapa experimental posterior.



**Fig. 6** MEASURY EC Meter Tester TDS Measuring Device for Osmosis Systems

Para la medición de la conductividad se utilizó un equipo MEASURY EC Meter Tester TDS Measuring Device for Osmosis Systems, Aquarium and Drinking Water Conductivity Meter, como se muestra en la Figura 6, diseñado específicamente para obtener lecturas rápidas y confiables de sólidos disueltos totales (TDS) expresados en partes por millón (ppm). Este tipo de medición resulta fundamental en experimentos de modificación de electrolitos, ya que un incremento en los TDS puede correlacionarse directamente con la cantidad de partículas en suspensión o parcialmente disueltas en el medio, lo que permite estimar de forma indirecta la dispersión y estabilidad del grafeno incorporado.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 7** Stanaway Medidor de prueba de calidad del agua PH/TDS

Adicionalmente, se empleó un Stanaway Medidor de prueba de calidad del agua PH/TDS, con el cual se realizaron mediciones paralelas tanto de pH como de TDS como se ve en la Figura 7, reforzando la confiabilidad de los datos mediante la comparación cruzada entre ambos dispositivos. Esta doble verificación se consideró indispensable, ya que la medición de TDS en soluciones de alta densidad iónica, como el ácido sulfúrico, puede verse afectada por interferencias o variaciones en la conductividad debidas a la presencia de aditivos. Comparar los valores de dos instrumentos con principios de medición similares, pero con diferente calibración interna, permitió reducir la incertidumbre experimental y validar los resultados obtenidos

Los resultados mostraron que el electrolito modificado presentó un incremento significativo en el contenido de sólidos disueltos en comparación con el ácido original. El valor registrado en el ácido sin aditivos fue de aproximadamente 150 ppm, mientras que el electrolito con grafeno alcanzó alrededor de 380 ppm, lo cual representa un aumento cercano al doble en la concentración de partículas disueltas. Este incremento se atribuye a la presencia de las nanopartículas de grafeno suspendidas en el medio, las cuales, aunque no alteran de manera apreciable la acidez del electrolito, contribuyen a elevar la cantidad de sólidos detectables por los sensores TDS.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Por otro lado, las mediciones de pH no evidenciaron cambios relevantes, manteniéndose prácticamente constantes en ambos casos. La diferencia entre las lecturas fue de apenas 0,01 unidades de pH, este resultado confirma que la adición de grafeno no modifica de manera sustancial la acidez del electrolito, manteniendo las condiciones químicas requeridas para el correcto funcionamiento de la batería.

Previo a la incorporación del aditivo de nanografeno en las baterías, se realizó un análisis de caracterización espectrofotométrica con el objetivo de evaluar la homogeneidad y la correcta dispersión del aditivo de carbono en las mezclas preparadas. Este análisis permitió verificar que el nanografeno se encontrara adecuadamente distribuido en cada medio, condición fundamental para asegurar que los resultados electroquímicos obtenidos posteriormente no estén influenciados por problemas de aglomeración, sedimentación o inestabilidad de las suspensiones. Para analizar las muestras se empleó la técnica UV-Visible, mediante la cual se evaluó el paso de la radiación a través de la solución en el rango ultravioleta y visible. Las mediciones se realizaron con el espectrofotómetro JENWAY disponible en el laboratorio (Figura 8).

El equipo permitió registrar los valores de absorbancia y transmitancia, es decir, la fracción de radiación retenida por la muestra y la que logra atravesarla. Con estos datos se comparó el comportamiento del medio antes y después de la incorporación del aditivo. Estas mediciones resultan útiles para evaluar cambios en las propiedades ópticas de las soluciones analizadas.

El equipo fue configurado para realizar mediciones a 265 nm, 350 nm y 550 nm, longitudes de onda representativas del comportamiento óptico del nanografeno. Las mediciones se efectuaron bajo condiciones controladas, garantizando la repetibilidad de los resultados.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 8** JENWAY 6705 UV/Vis. Spectrophotometer

El análisis espectrofotométrico de la mezcla de ácido sulfúrico con nanografeno, destinada a su uso como electrolito modificado, se presenta en las Figuras 9, 10 y 11. En la Figura 9, correspondiente a una longitud de onda de 265 nm, se registra una absorbancia de 0,515 y una transmitancia del 30,6 %. La elevada absorbancia observada en esta longitud de onda se debe a la alta energía de la radiación ultravioleta, la cual interactúa intensamente con la estructura electrónica del nanografeno, provocando una mayor absorción de la luz incidente. De manera complementaria, el valor relativamente bajo de transmitancia indica que una parte significativa de la radiación es absorbida por la muestra, lo que confirma la presencia efectiva del nanografeno en el electrolito. El hecho de que la absorbancia se mantenga dentro de un rango moderado indica que el material se encuentra bien disperso, sin evidencias de saturación óptica o aglomeración.



**Fig. 9** UV-Vis JENWAY a 265nm mezcla del ácido y nanocarbono



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



En la Figura 10, correspondiente a 350 nm, se observa una absorbancia de 0,214 y una transmitancia del 61,1 %. En este caso, la disminución de la absorbancia respecto a la medición a 265 nm se explica por la menor energía de la radiación a esta longitud de onda, lo que reduce la interacción con el nanografeno. El incremento en la transmitancia indica que una mayor fracción de la luz logra atravesar la muestra, lo cual es coherente con el comportamiento espectral esperado de los materiales carbonosos. La relación equilibrada entre absorbancia y transmitancia confirma que el nanografeno continúa presente y uniformemente distribuido en el electrolito, sin presentar inestabilidades ópticas.



**Fig. 10** UV-Vis JENWAY a 350nm mezcla del ácido y nanocarbono

La Figura 11, correspondiente a una longitud de onda de 550 nm, muestra una absorbancia de 0,229 y una transmitancia del 59,1 %. A esta longitud de onda, ubicada en el rango visible, la energía de la radiación es menor, por lo que la absorción por parte del nanografeno es más limitada. El valor moderado de absorbancia, junto con una transmitancia estable y similar a la obtenida a 350 nm, evidencia que la mezcla presenta un comportamiento óptico consistente en el rango visible. Esta estabilidad indica que el nanografeno permanece homogéneamente disperso en el ácido sulfúrico antes de su utilización en la batería experimental.



**Fig. 11** UV-Vis JENWAY a 550nm mezcla del ácido y nanocarbono

De manera complementaria, se realizó el análisis espectrofotométrico de la mezcla de dióxido de silicio con nanografeno, empleada en el proceso de modificación de las placas negativas. Los resultados correspondientes se presentan en las Figuras 12, 13 y 14.

En la Figura 12, obtenida a 265 nm, se registra una absorbancia de 0,350 y una transmitancia del 44,7 %. En este caso, la absorbancia es inferior a la observada en la mezcla del electrolito, lo que indica una interacción óptica distinta entre el nanografeno y la matriz de dióxido de silicio. El valor de transmitancia, intermedio, sugiere que la radiación es parcialmente absorbida, reflejando una dispersión adecuada del nanografeno sin una atenuación excesiva de la luz.



**Fig. 12** UV-Vis JENWAY a 265nm mezcla del dióxido de silicio y el nanografeno

En la Figura 13, correspondiente a 350 nm, se obtiene una absorbancia de 0,277 y una transmitancia del 52,9 %. La reducción progresiva de la absorbancia y el aumento de la



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

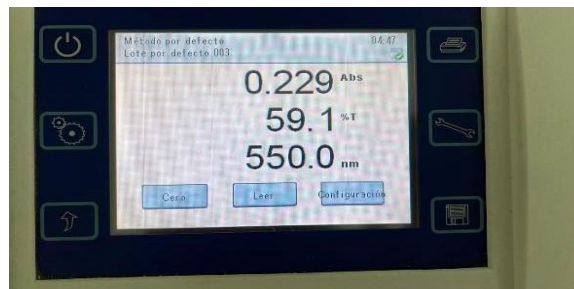


transmitancia respecto a la medición a 265 nm responden a la disminución de la energía de la radiación incidente. La relación entre ambos parámetros se mantiene dentro de rangos moderados, lo que confirma que la mezcla presenta una dispersión homogénea del nanografeno y una estabilidad óptica adecuada para su aplicación en la modificación de las placas.



**Fig. 13** UV-Vis JENWAY a 350nm mezcla del dióxido de silicio y el nanografeno

En la Figura 14, correspondiente a 550 nm, presenta una absorbancia de 0,229 y una transmitancia del 59,1 %. Estos valores reflejan una interacción óptica menor en el rango visible, coherente con el comportamiento espectral del nanografeno. La similitud entre los valores de transmitancia obtenidos a 350 nm y 550 nm evidencia una respuesta óptica estable de la mezcla, confirmando que el nanografeno se encuentra correctamente distribuido en el dióxido de silicio y no presenta segregación previa a su incorporación en las placas negativas.



**Fig. 14** UV-Vis JENWAY a 550nm mezcla del dióxido de silicio y el nanografeno

Todo el proceso descrito fue ejecutado con materiales de laboratorios limpios, debidamente etiquetados y bajo condiciones ambientales controladas. Las mezclas obtenidas fueron almacenadas de forma cuidadosa hasta su aplicación, asegurando que no existieran contaminaciones cruzadas ni cambios en las propiedades físicas durante el tiempo de reposo.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Las observaciones realizadas durante estos procedimientos fueron documentadas fotográficamente, lo que permitió correlacionar los resultados experimentales con el desempeño observado en las fases posteriores de carga, descarga y análisis estructural.

Una vez realizadas las modificaciones en las baterías, se evaluó mediante el sistema automatizado que se diseñó previamente. En esta sección se presentan los resultados obtenidos, considerando tanto el comportamiento funcional de las baterías durante los ciclos de carga y descarga, como los cambios estructurales observados tras la intervención experimental.

#### **3.4.4 Evaluación de baterías**

La implementación de la estación de pruebas automatizada permitió realizar un monitoreo continuo y controlado del comportamiento eléctrico de las tres baterías seleccionadas a lo largo de los ciclos de carga y descarga.

El módulo se programó para alternar automáticamente entre carga y descarga registrando mediciones de voltaje, corriente, potencia y tiempo cada segundo.

La estación operó de forma continua durante varias semanas, permitiendo la descarga periódica de la información almacenada.

El procedimiento de modificación de las baterías se documentó mediante registros de laboratorio y fotografías. En la batería intervenida en la placa negativa se aplicó manualmente una mezcla de grafeno con la pasta activa antes del cierre. En la batería modificada en el electrolito las nanopartículas se dispersaron en el ácido sulfúrico mediante agitación constante.

En este apartado se presentan los resultados de los ciclos de ensayo y se compara el comportamiento eléctrico de cada batería con los cambios observados en su estructura interna. Esto permitirá establecer conclusiones objetivas sobre la eficacia del grafeno como aditivo en baterías de plomo-ácido y sus implicaciones para futuras aplicaciones.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



## CAPÍTULO IV

### Resultados

#### Introducción

El desarrollo metodológico descrito permitió establecer las condiciones experimentales necesarias para evaluar, de manera objetiva y comparable, el comportamiento electroquímico de las baterías de plomo-ácido sometidas a modificación con aditivos de carbono. Durante el ensayo se registraron los parámetros eléctricos de tres baterías de plomo-ácido a lo largo de 200 ciclos de carga y descarga. Se evaluaron una batería de referencia, una con aditivo incorporado en el electrolito y otra con aditivo en las placas negativas. Se analizaron voltaje, corriente y densidad de potencia para comparar el comportamiento entre las configuraciones ensayadas. A continuación, se presentan los valores iniciales y la evolución de estos parámetros durante los ciclos.

#### 4.1 Caracterización inicial de las baterías

Antes de iniciar el registro de ciclos automatizados, se realizó una caracterización inicial con el propósito de contar con un punto de partida claro para la comparación posterior entre las baterías evaluadas. Para reducir variaciones asociadas a diferencias de fabricación, se trabajó con baterías selladas de plomo-ácido de 12 V y 7 Ah del mismo modelo comercial. En esta etapa se verificaron parámetros fisicoquímicos del electrolito y se efectuó una inspección estructural de las placas, buscando confirmar que las unidades se encontraban en condiciones comparables luego de la intervención aplicada en cada caso (batería de referencia, batería con aditivo incorporado en placas negativas y batería con aditivo incorporado en el electrolito).

Como parte del análisis del electrolito, se realizaron mediciones de pH y de sólidos disueltos totales (TDS) expresados en ppm. Para la medición de TDS/conductividad se empleó un MEASURY EC Meter Tester (TDS Measuring Device for Osmosis Systems, Aquarium and Drinking Water Conductivity Meter) y se utilizó un Stanaway Medidor de prueba de calidad del agua PH/TDS con el cual se efectuaron mediciones paralelas tanto de pH como de TDS, reforzando la confiabilidad de los datos mediante comparación cruzada



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



entre instrumentos. En el caso del PH, las mediciones mostraron que la variación entre el electrolito sin aditivo y el electrolito modificado fue casi inexistente, lo que sugiere que la adición del nanografeno no cambió la acidez del sistema. Esta verificación fue importante porque permite asumir que, al inicio, las condiciones químicas del electrolito se mantenían dentro de lo esperado para una batería de plomo-ácido, evitando que cambios fuertes de acidez distorsionen el comportamiento electroquímico durante los ciclos.

En cuanto al TDS, se observaron diferencias entre las soluciones analizadas, en el electrolito correspondiente a la batería sin aditivo se registró un valor aproximado de 150 ppm, mientras que en el electrolito modificado con aditivo el valor fue cercano a 380 ppm. Este incremento fue esperado por la presencia de material disperso en el medio, ya que la incorporación de partículas puede incrementar el contenido de sólidos/iones medidos por el equipo, sin que esto implique necesariamente una contaminación perjudicial. En esta fase no se evidenció precipitación visible ni señales de inestabilidad inmediata del electrolito, por lo que la diferencia de TDS se consideró un cambio asociado al proceso de modificación y no una anomalía que invalide el punto de partida del ensayo.

En las mediciones realizadas después de los 200 ciclos, el medidor de ppm registró valores diferenciados entre las tres configuraciones evaluadas. La batería de referencia presentó una lectura de 480 ppm, mientras que la batería con modificación en placas alcanzó 520 ppm y la batería con modificación en el electrolito registró 600 ppm. Estos resultados evidencian una mayor concentración de sólidos disueltos en esta última, lo cual puede asociarse con una mayor actividad iónica dentro del sistema.

La diferencia observada entre las configuraciones sugiere que las modificaciones implementadas influyen en la composición química del medio interno, particularmente en la cantidad de especies activas presentes en solución. El incremento progresivo desde la batería de referencia hasta la batería modificada en el electrolito podría relacionarse con una mayor disponibilidad de iones para el proceso electroquímico.

En cuanto a la medición de pH, no se registraron variaciones significativas entre las tres baterías, manteniéndose el nivel de acidez en valores similares a los iniciales. Esto indica que, a pesar de las diferencias en ppm, la acidez del sistema permaneció estable durante el



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



período de evaluación, sin evidenciar alteraciones que pudieran comprometer el equilibrio químico del electrolito.

De manera complementaria, se realizó una observación estructural mediante estereomicroscopio para revisar el estado físico de las placas antes de los ciclos. Esta inspección permitió descartar daños mecánicos notorios, desprendimientos relevantes de material activo o deformaciones evidentes que pudieran influir en los resultados posteriores. En la batería de referencia y en la batería modificada en el electrolito, la apariencia general de las placas fue similar en cambio en la batería modificada en las placas negativas se distinguió una variación leve en la textura superficial asociada a la incorporación del aditivo en la pasta, lo cual era esperable por el propio método de intervención. Con esta revisión se dejó establecido que las diferencias observadas durante el ensayo podrían asociarse con mayor fundamento al efecto del aditivo y al comportamiento bajo ciclos, y no a fallas estructurales previas.

#### **4.1.1 Parámetros de las tres baterías antes de las pruebas**

Una vez realizadas las modificaciones correspondientes en cada unidad (batería de referencia, batería con aditivo incorporado en las placas negativas y batería con aditivo incorporado en el electrolito), se definió una etapa previa de verificación antes de iniciar los ciclos automatizados. Esta fase tuvo dos objetivos, asegurarse que las tres baterías se encontraran en condiciones estables y comparables al momento de empezar el ensayo, y registrar parámetros básicos que sirvieran de línea base para interpretar los resultados posteriores.

En primer lugar, después de incorporar el electrolito las unidades se mantuvieron en reposo durante 24 horas. Este tiempo se consideró necesario para permitir que el sistema alcanzara un equilibrio interno razonable antes de someterlo a carga y descarga forzada. En la práctica, este reposo ayudó a evitar que el inicio de los ciclos coincida con un estado transitorio del electrolito (por ejemplo, burbujas atrapadas, redistribución interna de la solución o estabilización de la humectación del material activo), lo cual podría introducir variaciones que no estén relacionadas con el efecto del aditivo, sino con el proceso inmediato de preparación.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Cumplido el reposo, se registraron los parámetros eléctricos iniciales, comenzando por el voltaje en circuito abierto (OCV) de cada batería. Esta medición se realizó con el fin de obtener un indicador inicial del estado de carga relativo y verificar que no existieran diferencias marcadas entre unidades antes de iniciar el ensayo. Los valores obtenidos se registran en la Tabla, donde se presenta el voltaje inicial de cada batería en condiciones equivalentes:

<b>Batería</b>	<b>Voltaje</b>
Referencia	12,5 V
Modificada en electrolito	12,2 V
Modificada en placas negativas	12,3 V

Además del OCV, se verificó el estado funcional de los bornes y conexiones, ya que en este tipo de ensayos pequeñas variaciones en el contacto pueden reflejarse como caídas de voltaje o lecturas irregulares de corriente. Por esa razón, antes de iniciar el primer ciclo se revisó que los terminales estuvieran firmes, sin señales de falso contacto y con una superficie limpia para minimizar resistencia de contacto porque una conexión deficiente podía alterar la repetibilidad de los registros.

Antes del inicio de los ciclos, la batería modificada en el electrolito no presentó cambios geométricos ni diferencias visibles en textura del material activo respecto a la batería de referencia, ya que la modificación se aplicó en la solución y no implicó alteración directa de la pasta activa en ese momento. Por esta razón, desde el punto de partida, ambas unidades se consideraron comparables en cuanto a su estado físico inicial, quedando como diferencia principal el medio electrolítico utilizado. En cambio, la batería modificada en las placas negativas sí partía de una condición distinta a nivel de electrodo debido al método de incorporación del aditivo, lo cual se asumió como parte del diseño experimental y se tomó en cuenta al momento de interpretar las curvas posteriores.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



A partir de este punto, los ciclos de carga/descarga se ejecutaron de forma repetida bajo el mismo criterio de operación y el mismo umbral de descarga definido para el estudio.

#### **4.1.2 Descripción de la preparación de cada batería**

Para poder comparar resultados sin mezclar efectos por “diferencias de fábrica”, se trabajó con cada unidad con el mismo cuidado, pero se le asignó una condición distinta y desde el inicio se procuró mantener constantes el tipo de electrolito base, el procedimiento de manipulación y el armado final, de manera que cualquier cambio posterior pudiera asociarse con mayor confianza al tipo de modificación aplicada. Durante toda la preparación se utilizaron recipientes de vidrio y materiales resistentes al ácido, además de medidas básicas de seguridad (guantes, gafas y ventilación), porque se trabajó con electrolito para baterías cuya composición es aproximadamente 47% ácido sulfúrico y el resto agua destilada, según la especificación del insumo empleado en el laboratorio.

**Batería de referencia:** La batería de control se preparó con el procedimiento estándar, sin incorporar material carbonoso ni alterar sus componentes internos. Esta unidad se dejó con el electrolito base correspondiente a baterías de plomo-ácido y se mantuvo como punto de comparación para las otras dos configuraciones. La idea con esta batería fue sencilla, que represente el comportamiento “normal” del sistema bajo los mismos ciclos y el mismo entorno de ensayo, para que cualquier diferencia observada no se confunda con variaciones propias de la marca o del tipo de acumulador.

**Batería modificada en las placas negativas:** En esta unidad, la intervención se enfocó en las placas negativas, porque en la práctica es uno de los elementos donde se manifiestan con fuerza efectos como el aumento de resistencia interna y la sulfatación durante el ciclado. Para preparar el aditivo se trabajó con nanopartículas de grafeno y se realizó primero una etapa de pruebas de mezcla a pequeña escala usando dióxido de silicio como medio de dispersión. En estas pruebas se ensayaron diferentes proporciones (por ejemplo, 0,1 g, 0,01 g y 0,001 g en 0,5 ml) para observar cuál ofrecía mejor comportamiento de dispersión y homogeneidad antes de escalar el volumen total. Una vez seleccionada la condición de mezcla más estable, se escaló el preparado usando una regla de tres para el volumen restante del medio, obteniendo una cantidad proporcional de grafeno; en el procedimiento aplicado



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



se trabajó con un valor de 0,072 g para el volumen total utilizado en esa etapa. Luego, la mezcla se mantuvo en agitación constante durante un tiempo prolongado con el fin de favorecer una distribución lo más uniforme posible del material. Con el preparado listo, se aplicó el aditivo sobre las placas negativas según la técnica definida, luego de aplicar el recubrimiento con el aditivo sobre la placa negativa, las placas se colocaron en una estufa de laboratorio durante 45 minutos, con el objetivo de favorecer el secado del recubrimiento y mejorar su adherencia antes del ensamblaje. En este paso se trabajó con calentamiento controlado, a una temperatura entre 60 y 80 grados para no alterar ni dañar las placas, después se procedió al armado de la batería para continuar con los ensayos eléctricos.

Batería modificada en el electrolito (aditivo disperso en ácido): En la tercera unidad, el aditivo se incorporó directamente al electrolito ácido, manteniendo las placas con una condición comparable a la batería de referencia antes del ciclado. Para lograr una dispersión estable se realizaron mezclas preliminares variando la cantidad de grafeno por volumen de ácido donde se probó inicialmente 0,5 g en 1 ml, pero esa relación mostró sobresaturación por lo que se ajustó progresivamente la concentración; se trabajó con concentraciones más bajas (por ejemplo 0,1 g/ml, 0,01 g/ml y 0,001 g/ml) hasta obtener una mezcla más estable sin saturación del material. Estas preparaciones se realizaron con agitación magnética y en recipientes adecuados para evitar contaminación o reacciones no deseadas. Antes de utilizar el electrolito modificado dentro de la batería, se verificó su condición mediante mediciones fisicoquímicas (pH y TDS) y también se complementó con caracterización del medio por UV-Vis, en el análisis UV-Vis se buscó verificar si el nanografeno realmente quedó presente y disperso en las mezclas preparadas (tanto para el electrolito modificado como para la mezcla usada en la modificación de placas). Para ello, el 6705 UV/Vis. Spectrophotometer marca JENWAY se configuró en tres longitudes de onda (265 nm, 350 nm y 550 nm), que sirven como puntos de comparación dentro de las zonas UV y visible.

En la mezcla de ácido sulfúrico con nanografeno (electrolito modificado), a 265 nm se obtuvo una absorbancia de 0,515 con transmitancia de 30,6 %, lo que refleja una interacción fuerte en ultravioleta y confirma la presencia del aditivo en el medio. Luego, a 350 nm, la absorbancia disminuyó a 0,214 y la transmitancia subió a 61,1 %, un



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



comportamiento donde la radiación tiene menor energía y atraviesa más la muestra. Finalmente, en 550 nm (rango visible) se reportó absorbancia 0,229 y transmitancia 59,1 % y los valores se mantuvieron moderados y relativamente estables, lo que se interpreta como una señal de que la mezcla no estaba “saturada” ópticamente ni presentaba una aglomeración evidente antes de usarse en la batería.

De manera complementaria, se evaluó la mezcla de dióxido de silicio con nanografeno, utilizada en el proceso de modificación asociado a las placas negativas. En este caso, a 265 nm se registró absorbancia 0,350 y transmitancia 44,7 %, valores menores que los del electrolito, lo cual es coherente con que aquí el nanografeno está interactuando con una matriz distinta ( $\text{SiO}_2$ ) y no únicamente con el ácido. A 350 nm se obtuvo absorbancia 0,277 y transmitancia 52,9 %, manteniendo un comportamiento gradual (baja absorbancia / sube transmitancia) y, sobre todo, sin cambios bruscos que sugieran separación del material. En 550 nm, se reportó absorbancia 0,229 con transmitancia 59,1 %, lo que refuerza la idea de una respuesta óptica estable en el rango visible y, por tanto, de una dispersión adecuada del nanografeno en la mezcla previa a su aplicación, esto se realizó con el fin de tener un control adicional sobre el comportamiento de la solución y confirmar que el procedimiento de incorporación se realizó de manera consistente.

En conjunto, estas tres preparaciones (referencia, modificación en placas negativas y modificación en electrolito) permitieron arrancar la etapa de pruebas con configuraciones comparables y bien diferenciadas.

#### **4.1.3 Condiciones experimentales de carga y descarga**

Una vez preparadas las tres baterías (referencia, modificada en placas negativas y modificada en electrolito), se procedió a su evaluación bajo un esquema de carga y descarga controlado, con el objetivo de someterlas a condiciones comparables y registrar su comportamiento eléctrico a lo largo del ciclado. Para evitar sesgos por variaciones externas, las pruebas se realizaron de forma paralela y bajo el mismo entorno físico (misma ubicación de trabajo, condiciones ambientales similares y misma configuración de carga resistiva), manteniendo constantes los criterios de inicio/fin de cada etapa y el método de adquisición de datos.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



El sistema de ensayo se basó en una estación automatizada con arquitectura modular controlada mediante Arduino Mega 2560 e instrumentada con un sensor de corriente ACS712, un medidor PZEM-017 y 2 relés. Durante la prueba, cada batería alternó de manera automática entre una fase de carga y una fase de descarga, de tal forma que el ciclo completo quedara definido por dos condiciones, carga completa y descarga hasta un voltaje mínimo de seguridad.

En la fase de carga, la batería se conectó a un cargador y el sistema permaneció en este modo hasta que el sensor de corriente detectó que la corriente descendía a valores cercanos a cero, lo cual se tomó como señal práctica de que el acumulador alcanzó su condición de carga completa dentro del método usado. Al cumplirse este criterio, el relé conmutó automáticamente para iniciar la etapa siguiente, evitando intervención manual y reduciendo errores por tiempos de respuesta.

En la fase de descarga, la batería se conectó a una carga resistiva fija, registrándose continuamente la respuesta del acumulador bajo carga. El ensayo incorporó una lógica de protección para impedir descargas profundas: la descarga se detuvo cuando el voltaje alcanzó 10,5 V, valor que se adoptó como umbral mínimo de operación segura para baterías de plomo-ácido de 12 V, con el fin de no inducir sulfatación severa o degradación acelerada desde etapas tempranas. Al llegar a ese umbral, el sistema desconectó la carga y retornó automáticamente al modo de carga, reiniciando el ciclo.

Durante todo el proceso, el PZEM-017 permitió medir en tiempo real voltaje y corriente mientras que el Arduino registró los datos en una tarjeta microSD con una frecuencia constante de una muestra por segundo. Esta tasa de muestreo se mantuvo para todas las baterías y para todos los ciclos, con el propósito de que las curvas obtenidas fueran directamente comparables entre configuraciones. El procedimiento se repitió de manera continua durante el número de ciclos planificado, permitiendo observar la evolución del comportamiento eléctrico y detectar tendencias de degradación o variaciones entre la batería de referencia y las baterías modificadas.

Finalmente, para el análisis comparativo se tomaron ciclos representativos, de modo que se pueda discutir el desempeño en etapas tempranas e intermedias del ensayo sin



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



mezclarlo con los cambios más marcados de etapas posteriores, que se presentan y analizan en su sección correspondiente.

Todas las baterías se sometieron al mismo protocolo de ensayo donde la carga se realizó con un cargador en el cual su corriente se entrega en base al voltaje de la batería. La descarga de las baterías se realizó mediante una carga resistiva fija con el objetivo de garantizar condiciones repetibles en todos los ensayos. Para ello se utilizaron dos resistencias de  $5,6 \Omega$  conectadas en serie, obteniéndose una resistencia total equivalente de  $11,2 \Omega$ . Este tipo de descarga permite mantener un comportamiento estable y comparable entre las distintas baterías evaluadas, evitando variaciones asociadas a cargas electrónicas variables.

El proceso de descarga se llevó a cabo hasta alcanzar un voltaje de corte de  $10,5 \text{ V}$ , valor equivalente a  $1,75 \text{ V}$  por celda en baterías plomo-ácido de seis celdas. Aplicando la ley de Ohm, la corriente nominal de descarga resultó cercana a:

$$I \approx \frac{12}{11,2} \approx 1,07 \text{ A}$$

Durante cada ciclo se registraron voltaje, corriente y densidad de potencia de forma automática y los resultados obtenidos bajo estos parámetros se presentan en el siguiente apartado.

## **4.2 Resultados de las pruebas eléctricas**

El análisis eléctrico de las tres configuraciones de baterías es importante para determinar la influencia del aditivo de nanografeno en el desempeño de un acumulador de plomo-ácido. A lo largo de los 200 ciclos en el módulo, se registraron de manera continua en las tarjetas SD las variables de voltaje y corriente obteniendo curvas que reflejan la respuesta de cada batería frente a las condiciones del módulo.

### **4.2.1 Curvas de carga y descarga**

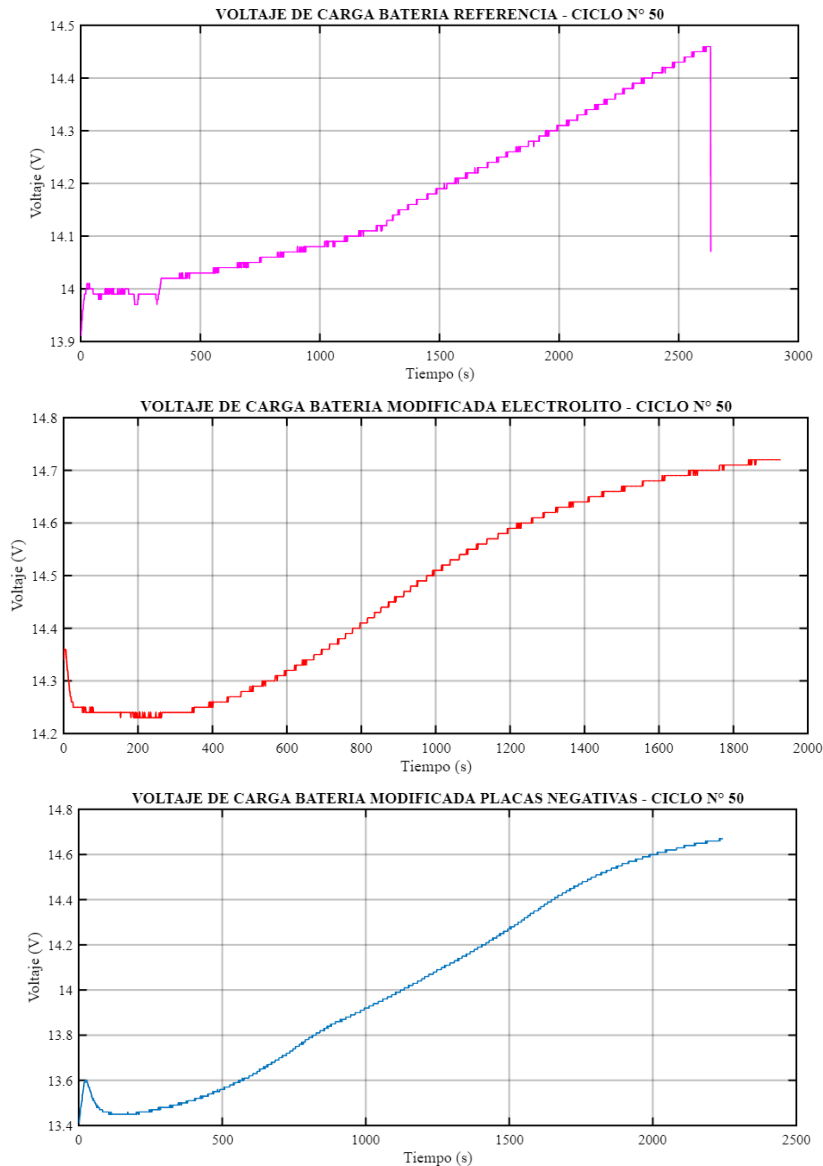
Las curvas de voltaje registradas en los ciclos 50, 100 y 150 permiten observar, de forma clara, cómo evoluciona el comportamiento de descarga en las tres configuraciones evaluadas: batería de referencia (sin aditivo), batería modificada en las placas negativas (con grafeno en la pasta activa) y batería modificada en el electrolito (con grafeno disperso en el



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



ácido). En todos los casos, el ciclo presenta dos etapas bien marcadas: una fase de carga, donde el voltaje se eleva y se mantiene en un rango alto, y una fase de descarga, donde el voltaje cae progresivamente hasta alcanzar el umbral mínimo definido (10,5 V). Esta forma general confirma que el sistema de prueba conmutó correctamente entre estados y que la comparación entre baterías se realizó bajo el mismo criterio de corte.



**Fig. 15** Voltaje de carga del ciclo 50 de las baterías



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



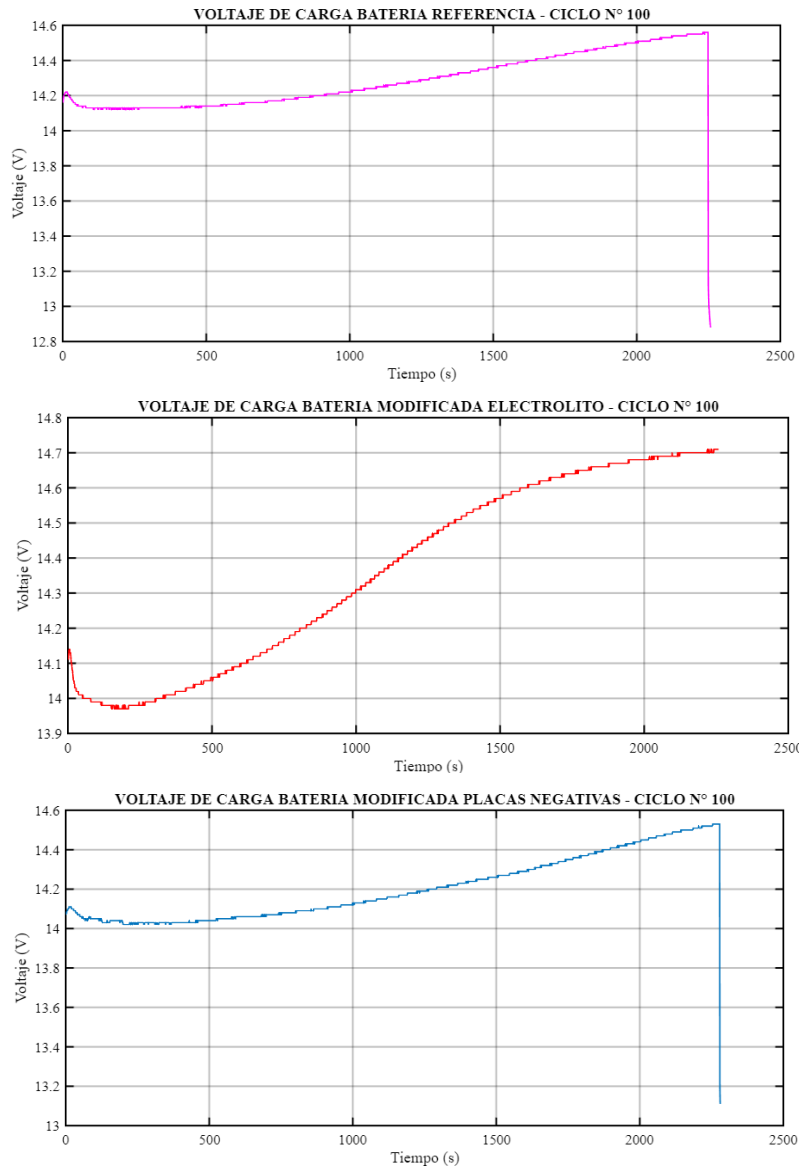
En la figura 15, En la batería referencia, se observa que el proceso se desarrolla durante un intervalo de tiempo más amplio, extendiéndose prácticamente hasta el final del eje temporal mostrado. Durante la mayor parte del registro la curva mantiene una evolución ordenada, con cambios graduales y sin oscilaciones fuertes, lo que indica una respuesta relativamente estable a lo largo del ciclo. En comparación con las otras configuraciones, esta batería presenta una duración mayor y una progresión temporal más extendida.

En la batería modificada el electrolito, se evidencia que el ciclo se completa en un tiempo menor, ya que el registro termina antes dentro del eje temporal. La señal muestra un comportamiento estable en el desarrollo, aunque con un trazo discretizado por el muestreo, manteniendo una tendencia clara sin variaciones bruscas durante la mayor parte del intervalo. Frente a la referencia, esta configuración concentra su evolución en menos tiempo.

En la batería modificada las placas negativas, se observa una duración intermedia, con un registro que se extiende más que la modificada en electrolito, pero menos que la referencia. En cuanto a estabilidad, la curva mantiene una progresión continua y uniforme durante casi todo el intervalo, con una pendiente consistente en el tiempo y sin cambios abruptos relevantes, lo que refleja un comportamiento estable dentro del ciclo comparado.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 16** Voltaje de carga del ciclo 100 de las baterías

En la Figura 16, en la batería referencia, se observa que la carga se desarrolla durante un intervalo de tiempo amplio. La evolución se mantiene ordenada conforme avanza el tiempo, con una tendencia estable durante la mayor parte del registro y sin cambios bruscos en su comportamiento. En comparación con las baterías modificadas, esta configuración muestra una respuesta más uniforme y lineal en el tiempo, con una progresión continua que permite apreciar con claridad el desarrollo completo del ciclo.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

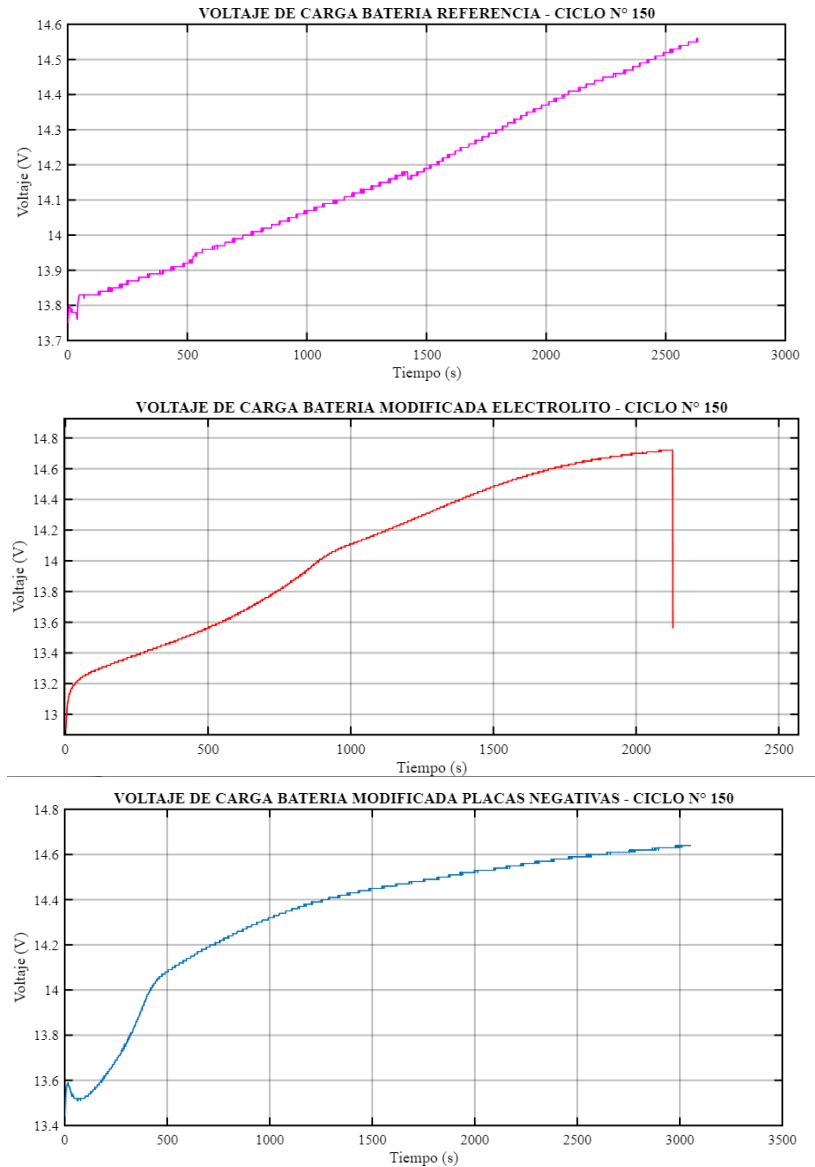


En la batería modificada el electrolito, se evidencia que la duración del proceso es muy cercana a la de la batería referencia, manteniéndose también a lo largo de casi todo el intervalo temporal. En cuanto a estabilidad, la curva conserva una progresión definida y consistente en el tiempo, aunque se aprecia un inicio más sensible antes de entrar en su tendencia principal. Frente a la referencia, no se observa una reducción marcada del tiempo total, pero sí una evolución temporal que se concentra más claramente en una fase de crecimiento sostenido durante el tramo medio del ciclo.

En la batería modificada las placas negativas, se observa igualmente una duración amplia y comparable a las otras dos configuraciones, manteniendo el desarrollo del ciclo a lo largo de prácticamente el mismo intervalo temporal. La estabilidad es alta durante casi todo el registro, con una progresión sostenida y con menor variación en la forma general a medida que transcurre el tiempo. Comparada con la modificada en electrolito, esta curva se percibe más uniforme en su evolución temporal; y frente a la referencia, conserva una duración equivalente, mostrando una respuesta estable durante el ciclo analizado.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 17** Voltaje de carga del ciclo 150 de las baterías

En la figura 17, en la batería referencia, la carga se extiende en el tiempo de forma sostenida y con una progresión bastante uniforme. La curva sube de manera gradual durante todo el registro, sin cambios bruscos de pendiente, lo que refleja una respuesta estable y constante. Frente a las otras configuraciones, esta batería mantiene un desarrollo temporal completo y una evolución regular, sin tramos de aceleración marcados.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



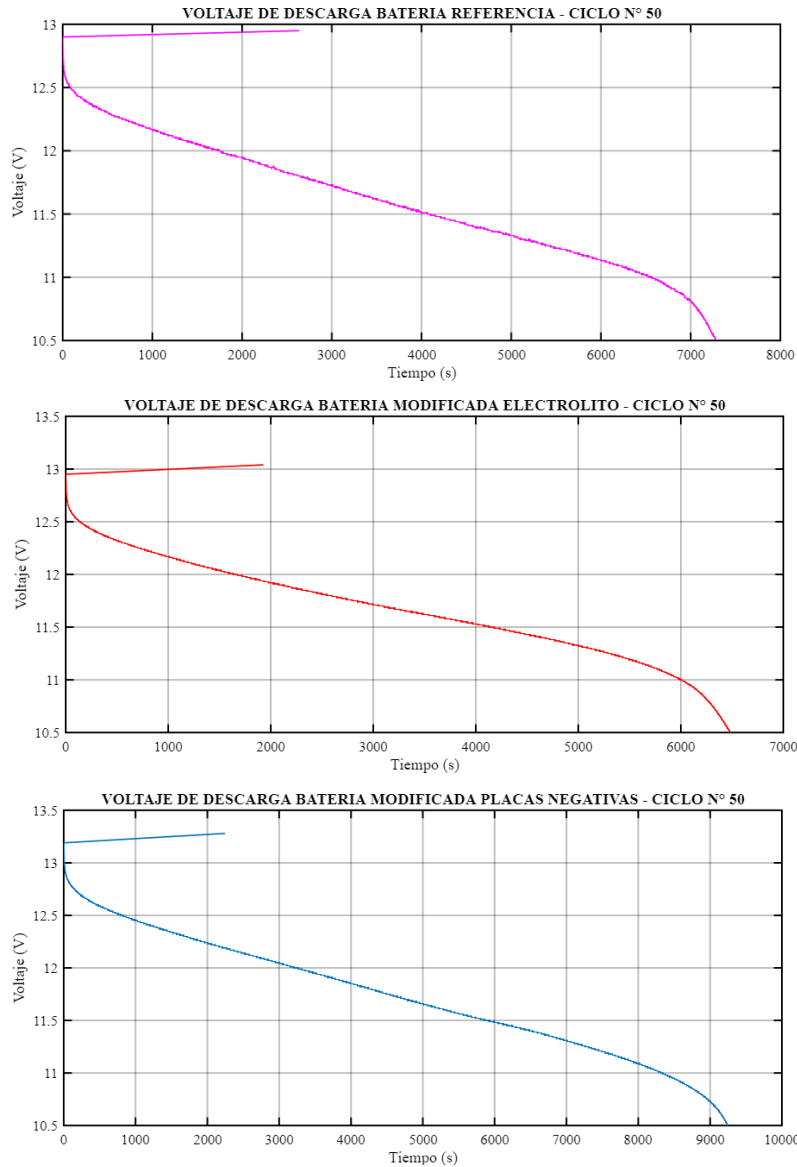
En la batería modificada el electrolito, el comportamiento esta más concentrado en el tiempo: la carga termina antes y la curva muestra un incremento más rápido en el tramo de la mitad, para luego mostrar menor pendiente hacia el final. En estabilidad, se mantiene ordenada, pero se diferencia de la referencia porque no conserva la misma similitud de pendiente durante todo el ciclo, presenta etapas más definidas a lo largo de esta etapa del ciclo.

En la batería modificada las placas negativas, la carga se prolonga más en el eje temporal y se distingue por un inicio con ajuste más marcado seguido de una subida rápida temprana, tras lo cual el incremento se vuelve más suave y estable en el resto del registro. Comparada con la modificada en electrolito, esta configuración distribuye el cambio de voltaje en un intervalo mayor y luego se mantiene más estable; y frente a la referencia, conserva estabilidad en la parte media-final, pero con una dinámica inicial más pronunciada.

En esta sección se presentan las curvas de voltaje durante la descarga para la batería referencia y las dos configuraciones modificadas, con el objetivo de describir su comportamiento en función del tiempo bajo el mismo ciclo de ensayo.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 18** Voltaje de descarga del ciclo 50 de las baterías

En la figura 18, en la batería referencia, el voltaje durante la descarga se observa con una caída progresiva y bastante uniforme conforme transcurre el tiempo, manteniendo una tendencia estable en la mayor parte del ciclo. La disminución no presenta oscilaciones fuertes y se conserva una pendiente relativamente constante, hasta acercarse al tramo final donde la caída se vuelve más pronunciada. En cuanto a duración, la descarga se mantiene en un intervalo amplio, aunque no es la más prolongada entre las tres. Esto guarda relación con



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



lo visto en carga para este mismo ciclo, donde la referencia mostró un desarrollo temporal completo y estable; en descarga mantiene esa misma característica de comportamiento ordenado, pero con una duración intermedia frente a las modificaciones.

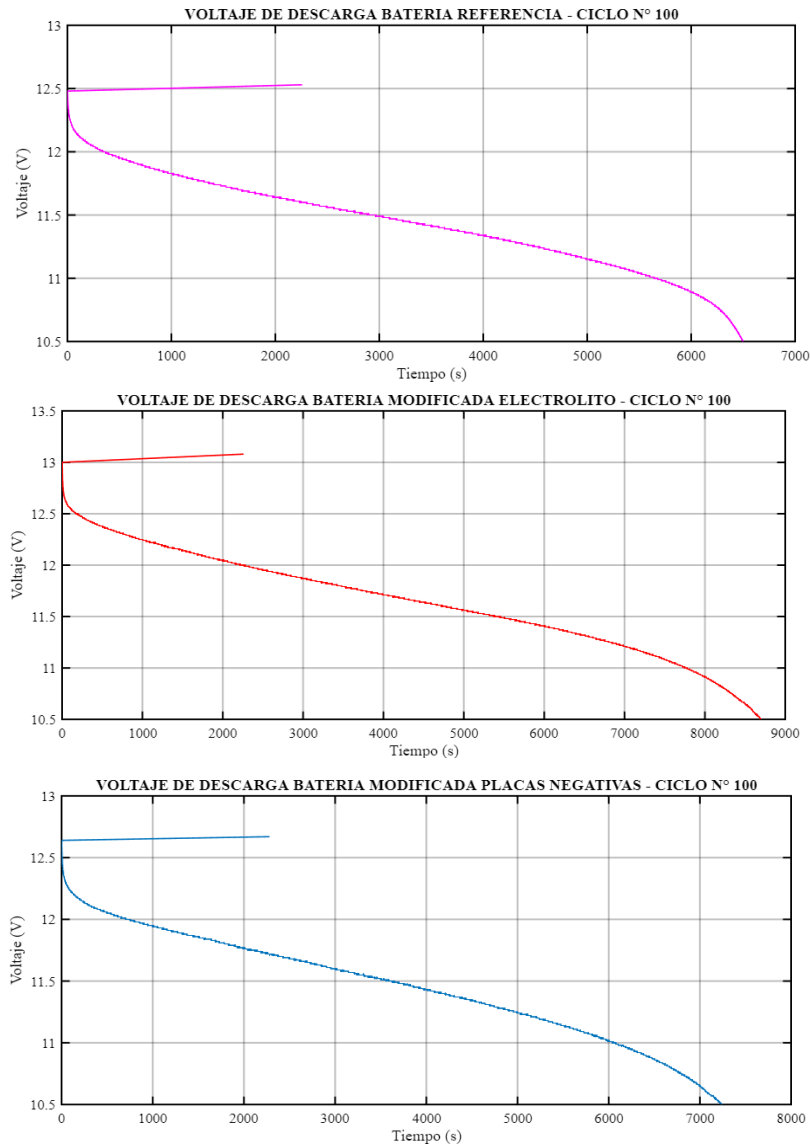
En la batería modificada el electrolito, la descarga presenta un descenso continuo, con estabilidad aceptable durante el desarrollo, aunque se nota que el voltaje cae de forma sostenida y llega antes al tramo final respecto a las otras configuraciones. En términos de duración, esta batería completa la descarga en un tiempo menor, lo cual es consistente con lo observado en carga, donde su proceso se concentró en un intervalo más corto y con etapas más definidas. Es decir, tanto en carga como en descarga, esta configuración tiende a “cerrar” el ciclo en menos tiempo, manteniendo una tendencia clara, pero con menor prolongación temporal.

En la batería modificada las placas negativas se evidencia una descarga más prolongada en el tiempo, con una caída progresiva que se distribuye durante un intervalo temporal mayor.

La curva se mantiene relativamente uniforme durante gran parte del ciclo, con una pendiente sostenida y un descenso continuo, antes de entrar al tramo final donde la caída se acentúa. Comparada con la modificada en electrolito, esta batería conserva el proceso durante más tiempo y sostiene mejor la descarga; y frente a la referencia, se distingue por una mayor duración global. Esta configuración mostró un desarrollo temporal más extendido y una evolución más uniforme en la parte media-final, lo cual se refleja en una descarga que también se mantiene estable y se prolonga más.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 19** Voltaje de descarga del ciclo 100 de las baterías

En la figura 19, la batería referencia, la descarga se observa con una caída progresiva del voltaje conforme avanza el tiempo, manteniendo una tendencia relativamente estable durante la mayor parte del ciclo. La pendiente se sostiene de forma continua y, hacia el tramo final, la disminución se acentúa, lo que marca el cierre de la descarga. En cuanto a duración, esta configuración completa el proceso en un intervalo temporal menor que la modificada en electrolito y cercano al de placas negativas. Esto se relaciona con lo observado en la carga del mismo ciclo, donde la referencia mantuvo una evolución temporal amplia y estable; en



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



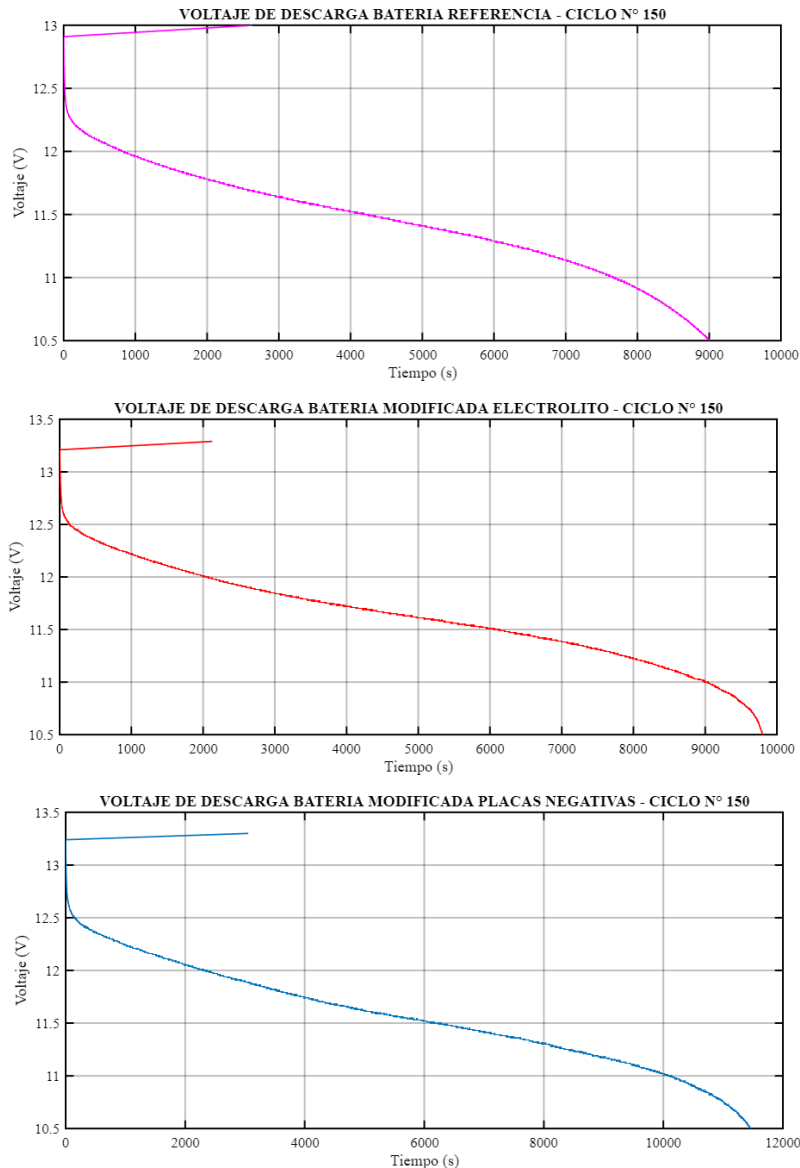
descarga conserva ese comportamiento ordenado, aunque sin extenderse tanto como la configuración modificada en electrolito.

En la batería modificada el electrolito, se evidencia una descarga más prolongada en el tiempo, con un descenso continuo y estable durante gran parte del ciclo. La curva mantiene una pendiente sostenida durante un intervalo amplio y solo hacia el final se observa una caída más marcada. Comparada con las otras dos, esta batería presenta la mayor duración de descarga en este ciclo. En correlación con la carga, donde esta configuración mostró una evolución temporal comparable a la referencia, aquí se aprecia que la etapa de descarga se extiende más, lo que sugiere un comportamiento de descarga más sostenido en el tiempo y con buena continuidad del perfil, mejora respecto a la referencia en estabilidad de voltaje, aunque sin llegar a igualar de manera constante el desempeño observado cuando el aditivo está incorporado directamente en la pasta activa.

En la batería modificada las placas negativas, la descarga muestra una disminución progresiva con buena estabilidad, distribuyendo el descenso del voltaje de forma continua a lo largo del tiempo. La duración es amplia, pero se mantiene por debajo de la observada en la modificada en electrolito, ubicándose en un nivel intermedio. En relación con la carga de este ciclo, donde placas negativas mantuvo un comportamiento estable y con duración comparable, en descarga conserva una tendencia ordenada y sostenida, aunque sin alcanzar la prolongación temporal que se observa en la configuración modificada en electrolito.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 20** Voltaje de descarga del ciclo 150 de las baterías

En la figura 20, en la batería referencia, la descarga se evidencia con una caída progresiva del voltaje a lo largo del tiempo, manteniendo una tendencia relativamente estable durante la mayor parte del ciclo. Después del ajuste inicial, la pendiente se conserva continua y, hacia el tramo final, la disminución se vuelve más marcada, lo cual es característico del cierre de la descarga. En términos de duración, esta configuración se extiende en un intervalo amplio, completando la descarga en un tiempo mayor que el observado en ciclos anteriores,



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



y manteniéndose como una de las curvas más prolongadas del conjunto. En correlación con la carga, donde la referencia mostró un desarrollo temporal sostenido y uniforme, en descarga conserva esa misma respuesta ordenada en función del tiempo.

En la batería modificada el electrolito, se observa un descenso continuo y estable durante prácticamente todo el ciclo, con una pendiente sostenida en el tiempo y una caída más pronunciada solo al final. La duración de la descarga es amplia y comparable a la referencia, manteniéndose dentro de los intervalos temporales más largos en este ciclo. Relacionándolo con la carga, donde esta configuración concentró su proceso en un intervalo menor, en descarga se aprecia que el comportamiento se sostiene por más tiempo, mostrando una etapa de descarga prolongada y con buena continuidad del perfil.

En la batería modificada las placas negativas, la descarga se presenta con un descenso progresivo y estable, distribuyendo la caída del voltaje durante un intervalo temporal aún más extendido. En comparación con las otras dos, esta configuración muestra la mayor duración de descarga en este ciclo, manteniendo una tendencia continua en el tiempo y un perfil estable durante la mayor parte del registro. En correlación con la carga, donde placas negativas ya se caracterizaba por un desarrollo temporal más prolongado, en descarga se mantiene ese mismo patrón, evidenciando un proceso más extendido y sostenido en el eje temporal.

En conjunto, el análisis de voltaje de los ciclos 50, 100 y 150 respalda que la modificación con grafeno sí altera el comportamiento eléctrico, y que el efecto más consistente se observa cuando el aditivo se incorpora en las placas negativas. Esto se refleja en una descarga con pendiente más suave y con una transición menos abrupta hacia el tramo final, lo cual es compatible con un mejor intercambio electroquímico en el electrodo negativo y con menor penalización por pérdidas internas durante el ciclo.

Estas diferencias se interpretan como un indicio de que el aditivo en placas tiene un efecto más directo sobre la entrega de tensión bajo carga, mientras que el aditivo en electrolito podría influir de forma más moderada y dependiente de las condiciones del medio.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

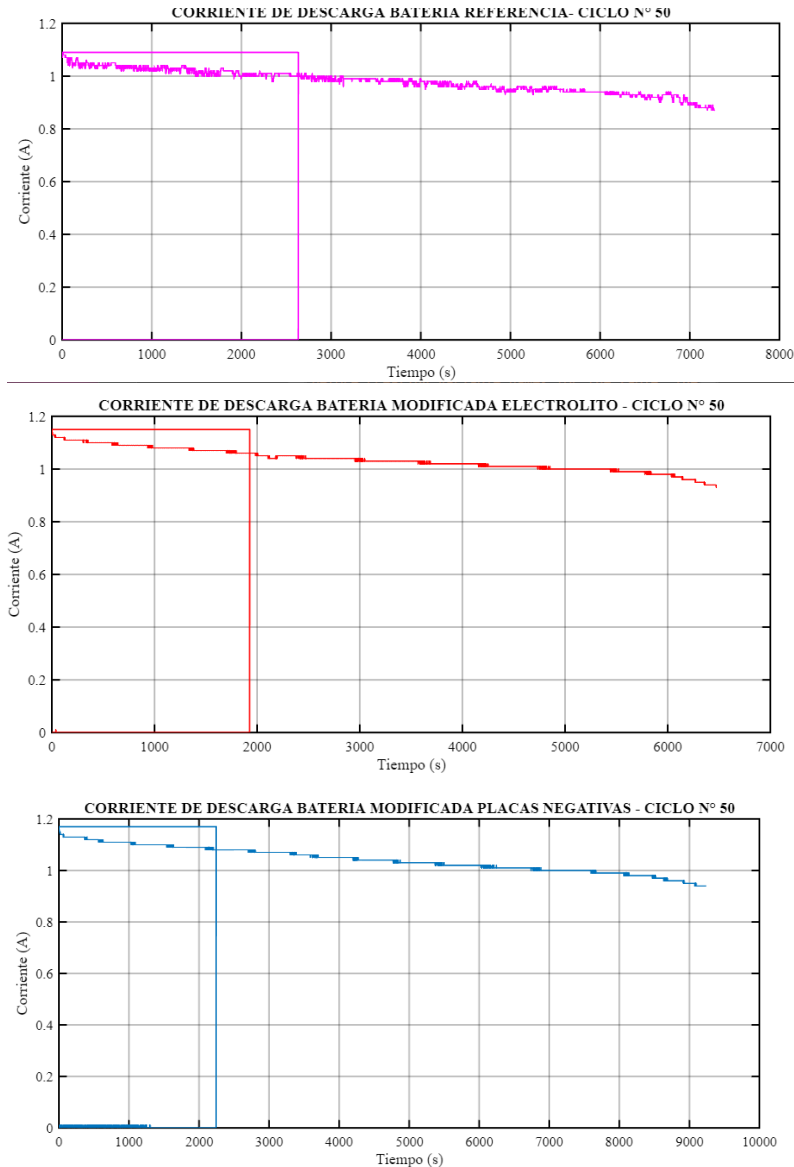


#### **4.2.2 Corriente de descarga**

El análisis de la corriente durante la etapa de descarga en los ciclos 50, 100 y 150 permite evaluar con mayor claridad la respuesta de cada batería bajo una condición de descarga repetible. En este caso, la descarga se realizó conectando una carga resistiva fija de  $11,6 \Omega$ , lo cual es importante porque, al mantenerse constante la resistencia, cualquier variación observable en el perfil de corriente queda directamente asociada al comportamiento interno del acumulador (por ejemplo, cambios en resistencia interna, polarización y limitaciones de transferencia de carga), y no a cambios en la carga aplicada. Bajo esta configuración se compararon tres unidades: batería de referencia, batería con grafeno incorporado en la placa negativa y batería con grafeno incorporado en el electrolito.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 21** Corriente del ciclo 50 de las baterías

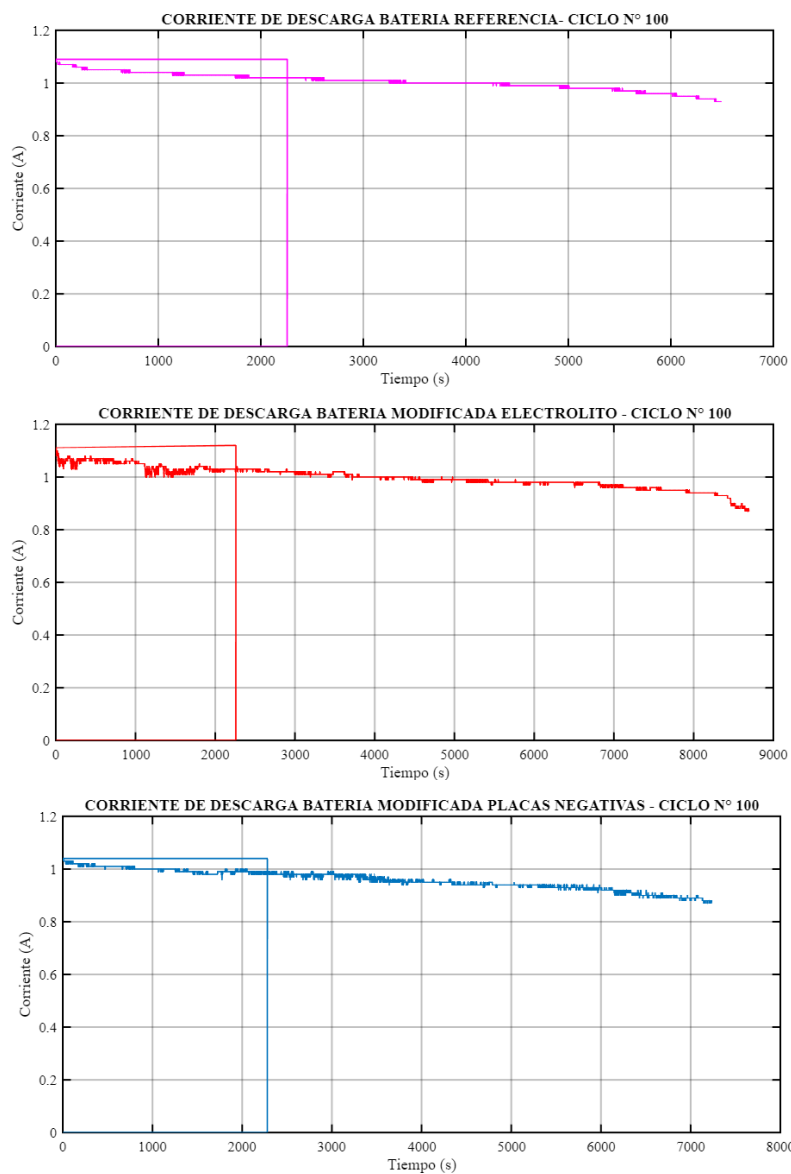
En la figura 21, la batería referencia presenta un desarrollo temporal más completo y continuo en carga, y en descarga conserva un perfil ordenado, con una duración intermedia y una tendencia estable sin cambios abruptos relevantes durante la mayor parte del ciclo. La batería modificada en el electrolito muestra en carga una evolución más concentrada y por etapas, y en descarga mantiene una respuesta ordenada, aunque tiende a completar el proceso en un intervalo temporal menor frente a placas negativas, con una estabilidad aceptable. Por



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



su parte, la batería modificada en placas negativas se distingue por una evolución más uniforme tanto en carga como en descarga, sosteniendo mejor la estabilidad del perfil y, en descarga, extendiéndose por más tiempo, lo cual sugiere una entrega más sostenida del comportamiento del ciclo en comparación con las otras dos configuraciones, al comparar carga y descarga, se observa un comportamiento coherente entre las tres configuraciones, donde la evolución en carga mantiene una tendencia ascendente estable y en descarga se refleja una caída progresiva sostenida en el tiempo.



**Fig. 22** Corriente del ciclo 100 de las baterías



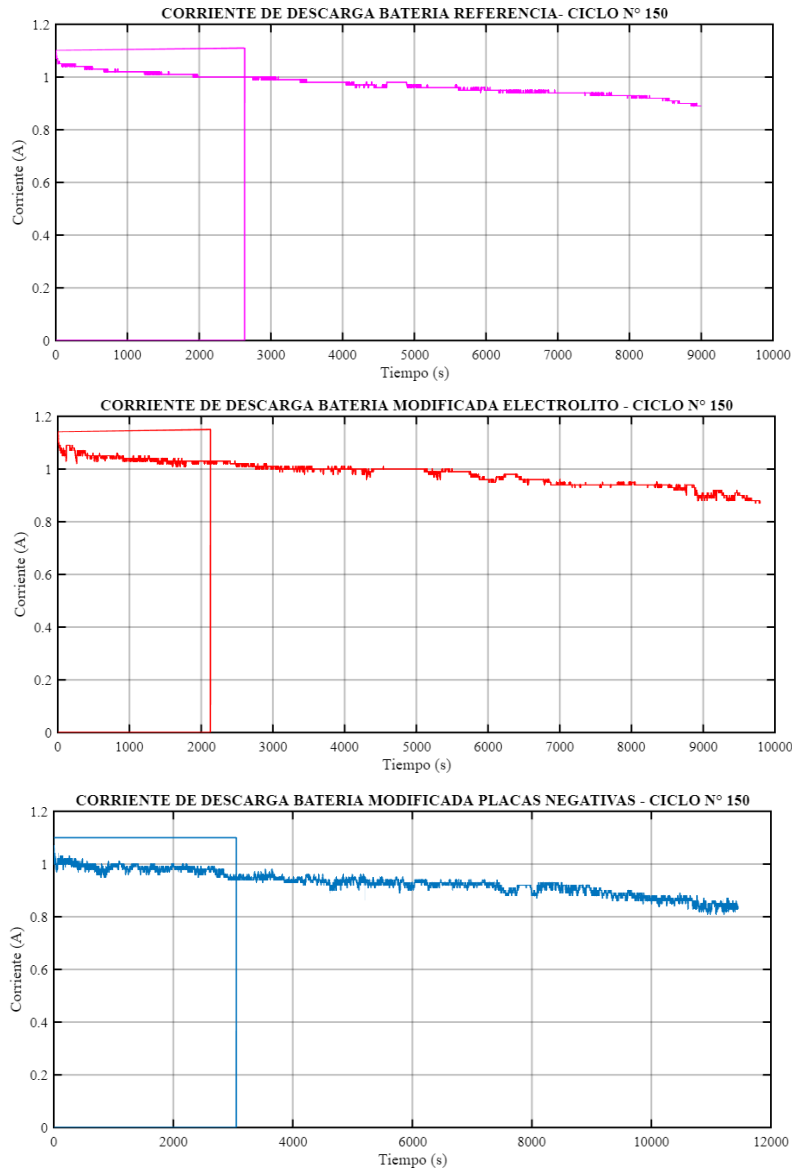
**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



En la figura 22, las tres curvas de corriente de descarga muestran un comportamiento general similar: la corriente se mantiene cercana al valor de trabajo durante una parte importante del tiempo y presenta una tendencia gradualmente descendente conforme avanza el ciclo. En la batería referencia el perfil es relativamente estable, con variaciones pequeñas y una disminución que se vuelve más evidente hacia el tramo final. En la batería modificada el electrolito se observa una respuesta sostenida, aunque con mayor presencia de fluctuaciones finas al inicio, estabilizándose posteriormente y manteniendo una descarga prolongada en el tiempo. En la batería modificada las placas negativas la corriente se mantiene más uniforme durante gran parte del registro, con oscilaciones pequeñas y un descenso progresivo y continuo. En conjunto, este comportamiento se mantiene coherente con lo observado en las curvas de voltaje del mismo ciclo, ya que las configuraciones con mayor duración en descarga tienden también a sostener la corriente durante más tiempo, mientras que los perfiles más uniformes de corriente se asocian a una evolución más estable del proceso en el eje temporal.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 23** Corriente del ciclo 150 de las baterías

En la figura 23, las tres curvas de corriente de descarga mantienen el patrón general esperado: la corriente se sostiene cerca del valor de trabajo durante una parte importante del tiempo y luego presenta una disminución gradual conforme avanza el ciclo. En la batería referencia se evidencia un perfil relativamente estable, con variaciones pequeñas y una tendencia descendente suave, manteniendo buena continuidad en el registro. En la batería modificada el electrolito la corriente también se mantiene sostenida durante el tiempo,



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



aunque se aprecia un perfil más “irregular” en comparación con la referencia, con variaciones finas más frecuentes a lo largo del ciclo, lo que indica menor estabilidad relativa pese a conservar una descarga prolongada. En la batería modificada las placas negativas se observa la descarga de mayor duración, extendiéndose más en el eje temporal, y aunque presenta ruido de señal propio del registro, el descenso se mantiene progresivo y continuo, sosteniendo la corriente por más tiempo, ya que combina mayor duración de descarga con una caída gradual sostenida; mientras que la referencia mantiene buena estabilidad, pero con menor prolongación temporal, y la modificada en electrolito conserva duración comparable, aunque con mayor irregularidad del perfil.

El análisis de la corriente de descarga en los ciclos considerados indica que las tres baterías descargan de forma controlada y con una caída gradual de la corriente a medida que avanza el tiempo dentro de cada ciclo. La comparación entre configuraciones muestra diferencias claras en continuidad y duración: la batería con modificación en placas negativas mantiene la corriente por más tiempo y con menor variación en el perfil, por lo que presenta el desempeño más sólido en esta parte del estudio. La batería de referencia conserva estabilidad, pero tiende a completar la descarga en intervalos más cortos en determinados ciclos, mientras que la batería modificada en el electrolito logra duraciones competitivas, aunque con mayor presencia de oscilaciones finas. Estas tendencias permiten concluir que la modificación en placas negativas mejora la sostenibilidad de la descarga y la continuidad del comportamiento eléctrico.

#### **4.2.3 Densidad de potencia obtenida**

Para evaluar la capacidad de entrega de potencia de las baterías bajo la condición experimental aplicada, se calculó la densidad de potencia a partir de los registros de voltaje y corriente obtenidos durante la descarga. En cada instante se determinó la potencia como

$$P(t) = V(t) \times I(t)$$



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Posteriormente se normalizó respecto a la masa del acumulador, definida experimentalmente como 2,4 kg, obteniéndose

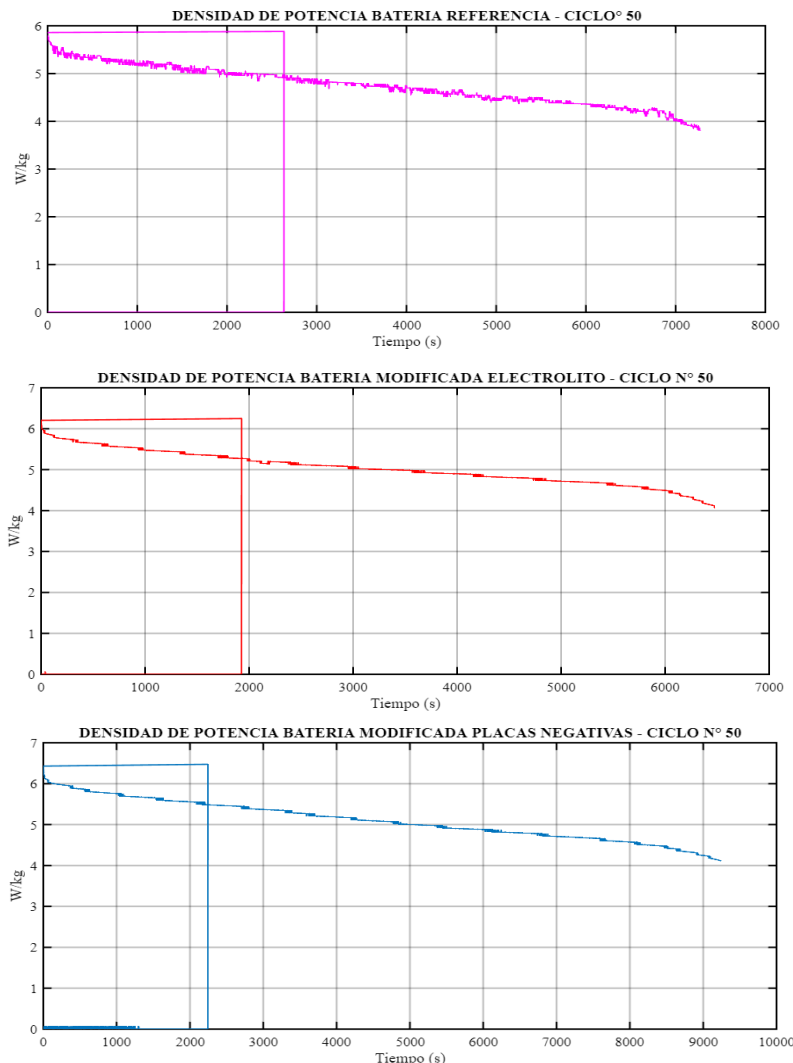
$$PD(t) \approx \frac{V(t) \times I(t)}{2,4}$$



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Con estos datos se analizaron tanto el comportamiento instantáneo como el valor promedio y el valor máximo de densidad de potencia por ciclo, lo que permitió comparar de manera directa la batería de referencia frente a las baterías modificadas. Debido a que la descarga se realizó mediante una carga resistiva de  $11,6 \Omega$ , los valores obtenidos representan el desempeño bajo un régimen de descarga moderado; por ello, la interpretación se centró en las diferencias relativas entre baterías y en la evolución del parámetro conforme aumentó el número de ciclos.



**Fig. 24** Densidad de potencia del ciclo 50 de las baterías



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



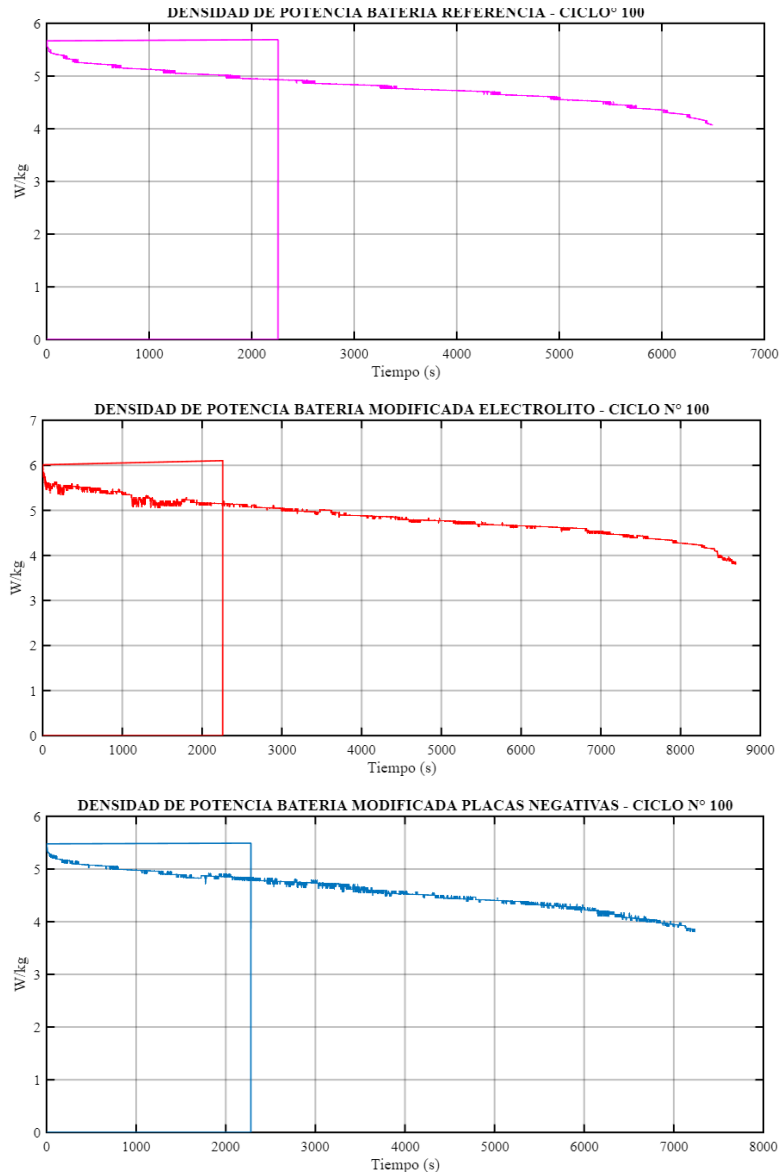
En la figura 24, la batería referencia muestra una densidad de potencia que inicia relativamente alta y luego presenta una disminución progresiva conforme avanza el tiempo. El perfil mantiene una tendencia descendente bastante clara, con presencia de variaciones finas (ruido) durante el trayecto, lo que indica menor estabilidad comparativa del registro frente a las baterías modificadas. Esta curva va perdiendo capacidad de sostener potencia específica de forma gradual, y hacia el tramo final se aprecia una caída más marcada de la pendiente, consistente con la etapa donde el voltaje ya viene bajando con mayor rapidez.

La batería modificada en el electrolito inicia con una densidad de potencia ligeramente mayor y presenta un descenso más ordenado a lo largo del ciclo, con un perfil visualmente más controlado y con menor dispersión durante la mayor parte del ensayo. La potencia específica se mantiene sólida en la primera etapa y luego disminuye de manera progresiva, sin irregularidades marcadas; no obstante, este comportamiento se desarrolla en un intervalo temporal más corto en comparación con la modificación en placas negativas. En consecuencia, aunque entrega buena potencia específica al inicio y la caída es estable, la capacidad de sostener esa entrega se reduce antes en el eje temporal. En la batería modificada en placas negativas se observa el desempeño más favorable, ya que el perfil arranca alto y desciende de forma más gradual y continua, manteniendo una curva estable durante un periodo más prolongado.

Comparada con las otras dos, esta configuración no solo sostiene una densidad de potencia competitiva en el tramo inicial, sino que además la “estira” por más tiempo, lo que en resultados se interpreta como una entrega de potencia específica más sostenida durante la descarga. La curva se ve más uniforme y con una disminución progresiva bien distribuida a lo largo del ciclo, lo cual es coherente con una descarga que conserva mejor el equilibrio entre voltaje y corriente durante más tiempo, la diferencia está en qué tan estable y por cuánto tiempo logran sostener potencia específica útil.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 25** Densidad de potencia del ciclo 100 de las baterías

En la figura 25, la batería referencia mantiene una densidad de potencia que inicia alta y luego desciende de forma progresiva conforme transcurre el tiempo. La tendencia es clara y relativamente estable, con variaciones finas pequeñas, y se aprecia que la pendiente se mantiene moderada durante la mayor parte del registro, volviéndose más marcada hacia el tramo final. En términos de desempeño, esta curva refleja que la batería va perdiendo



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



potencia específica de manera continua, sin lograr sostener el nivel inicial por tanto tiempo como la configuración modificada en electrolito.

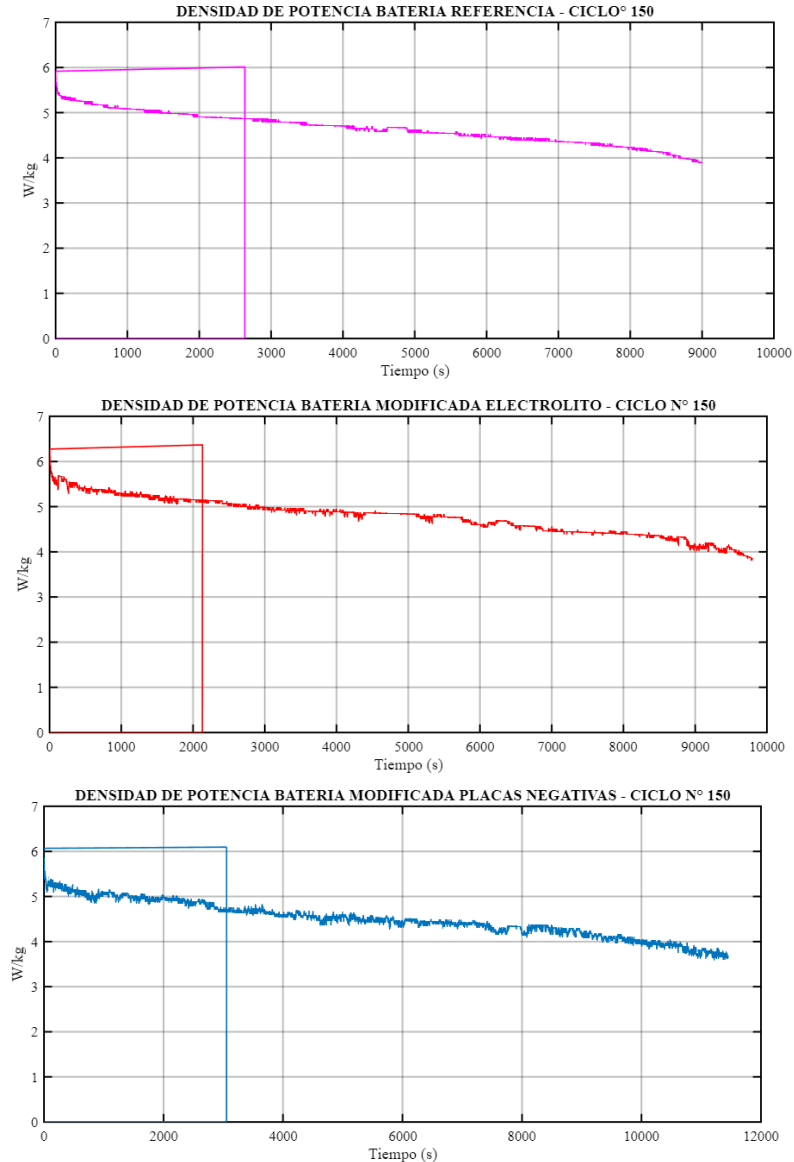
En este ciclo, la batería modificada en el electrolito presenta el comportamiento más conveniente al considerar simultáneamente la permanencia de la potencia específica y el tiempo durante el cual se mantiene la entrega. Al inicio se aprecian pequeñas oscilaciones, pero luego la señal se vuelve más estable y desciende de manera gradual a lo largo de un intervalo temporal mayor que el observado en las otras configuraciones. Este resultado sugiere que, para el ciclo analizado, la modificación del electrolito favorece una entrega de potencia más prolongada, con una reducción progresiva y sin variaciones abruptas en la tendencia.

En la batería modificada en placas negativas, la densidad de potencia desciende de manera continua y estable, con una pendiente bastante uniforme a lo largo del ciclo. No obstante, al compararla con la batería modificada en el electrolito, se aprecia que su curva se corta antes en el eje temporal y que hacia el final alcanza valores más bajos, lo que refleja una menor capacidad de sostener la potencia específica durante todo el intervalo registrado. Frente a la batería de referencia, el perfil resulta más ordenado y la caída está mejor distribuida, aunque en este ciclo no alcanza la misma combinación de estabilidad y duración temporal que se observa en la modificación del electrolito.

En este ciclo, la batería modificada en el electrolito destaca por sostener potencia específica durante un intervalo temporal mayor y con un perfil estable, mientras que la referencia presenta una reducción progresiva con menor prolongación, y la modificada en placas negativas mantiene estabilidad, pero con menor duración efectiva y una caída más notoria hacia el cierre.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Fig. 26** Densidad de potencia del ciclo 150 de las baterías

En la figura 26, la batería referencia presenta una densidad de potencia que inicia alta y luego desciende de manera progresiva conforme transcurre el tiempo. La curva mantiene una tendencia descendente clara y relativamente estable durante la mayor parte del registro, con variaciones finas pequeñas, y hacia el tramo final la pendiente se acentúa, evidenciando una pérdida más marcada de potencia específica en la fase de cierre. De forma general, el comportamiento es estable y sin alteraciones abruptas; sin embargo, la potencia específica se va reduciendo gradualmente durante el desarrollo del ciclo.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



La batería modificada en el electrolito inicia con valores altos de densidad de potencia y mantiene un descenso progresivo que se extiende de manera consistente en el eje temporal. Aunque se observan pequeñas oscilaciones en la señal, estas no afectan la continuidad del perfil. Frente a la referencia, la modificación en el electrolito conserva la entrega de potencia por más tiempo y presenta una reducción más uniforme en el transcurso del ensayo.

En la batería modificada en placas negativas, la densidad de potencia se caracteriza por un perfil estable y sostenido durante un intervalo temporal más extendido, con una disminución progresiva continua que se mantiene durante todo el registro. A diferencia de las otras dos curvas, esta configuración se prolonga más en el eje temporal y distribuye la reducción de potencia de forma más gradual, manteniendo niveles útiles por más tiempo. En comparación con la modificada en electrolito, la pendiente se percibe más uniforme y la duración es mayor, lo que refleja una entrega de potencia específica más prolongada.

En este ciclo, la batería modificada en placas negativas destaca por mantener un perfil más prolongado y estable en el tiempo; la modificada en el electrolito también presenta buen desempeño con una tendencia controlada y sostenida; y la batería referencia muestra una reducción progresiva más marcada hacia el cierre, con menor capacidad relativa para sostener la potencia específica durante todo el ciclo.

Al analizar durante los ciclos de descarga se puede estimar de forma comparativa el comportamiento de la potencia entregada por cada batería. En los ciclos iniciales y medios se observa que la batería modificada en las placas negativas mantiene valores simultáneamente más altos de voltaje y corriente durante una mayor fracción del tiempo de descarga, lo que implica una mayor capacidad de entrega de potencia en relación con la batería de referencia. La batería con aditivo en el electrolito presenta un comportamiento intermedio, mostrando una entrega más estable que la de control, pero sin alcanzar la intensidad sostenida observada en la modificación de placa. En la batería de referencia la potencia disminuye más rápidamente debido a la caída progresiva de voltaje acompañada por la reducción de corriente, lo que evidencia mayores pérdidas internas. En conjunto, las curvas sugieren que la incorporación del aditivo favorece la transferencia de carga y reduce



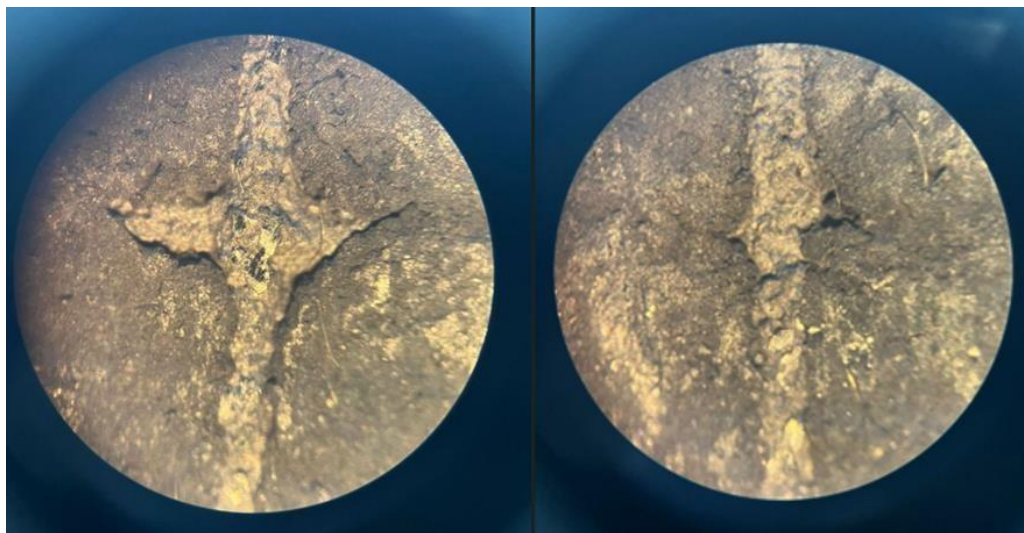
la oposición interna al flujo de corriente, permitiendo mantener niveles de potencia más uniformes durante la descarga.

#### **4.3 Análisis microscópico de las placas**

Con el objetivo de complementar los resultados eléctricos obtenidos en los ciclos de carga y descarga, se realizó un análisis microscópico de las placas correspondientes a las tres configuraciones de baterías estudiadas: referencia, placas dopadas con nanografeno en la pasta activa y electrolito modificado con nanografeno. El estudio se llevó a cabo en dos momentos: antes del contacto con el electrolito y después de la finalización de los 200 ciclos, con el fin de establecer la correlación entre la morfología de las placas y el desempeño electroquímico observado; este análisis se realizó mediante estereomicroscopio binocular MOTIC, serie ST-30, con sistema de iluminación incidente y transmitida, el cual permitió capturar registros fotográficos antes y después de los ciclos de carga/descarga para comparar cambios morfológicos y evidencias cualitativas como sulfatación, corrosión superficial y desprendimiento de material activo.

##### **4.3.1 Estereomicroscopio antes de las pruebas**

Antes de iniciar los ciclos, se registraron imágenes del estado superficial de las placas para tener un punto de partida lo más claro posible.



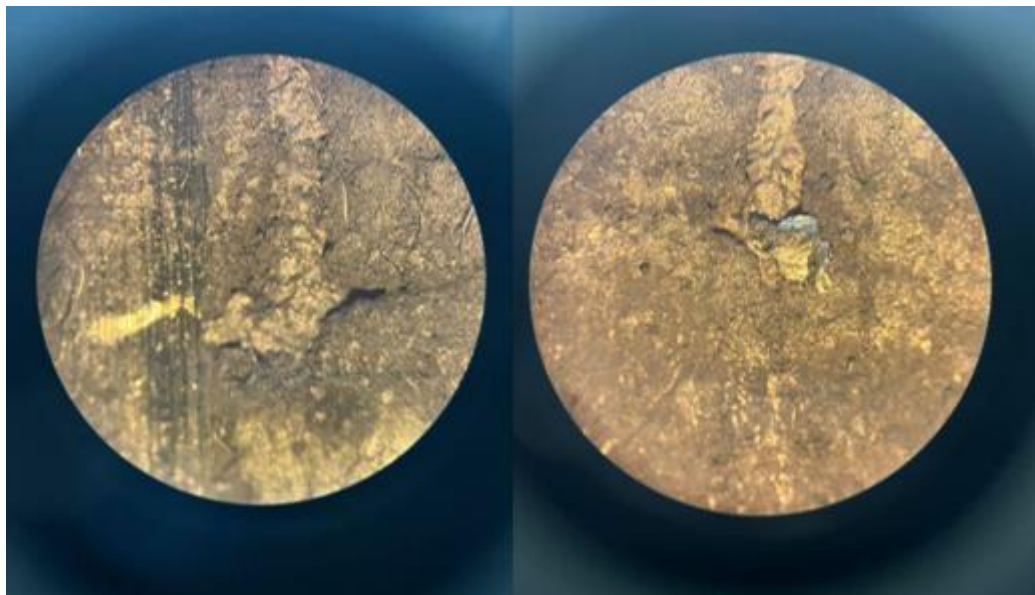
**Fig. 27** Fotos del estereomicroscopio de la batería referencia



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

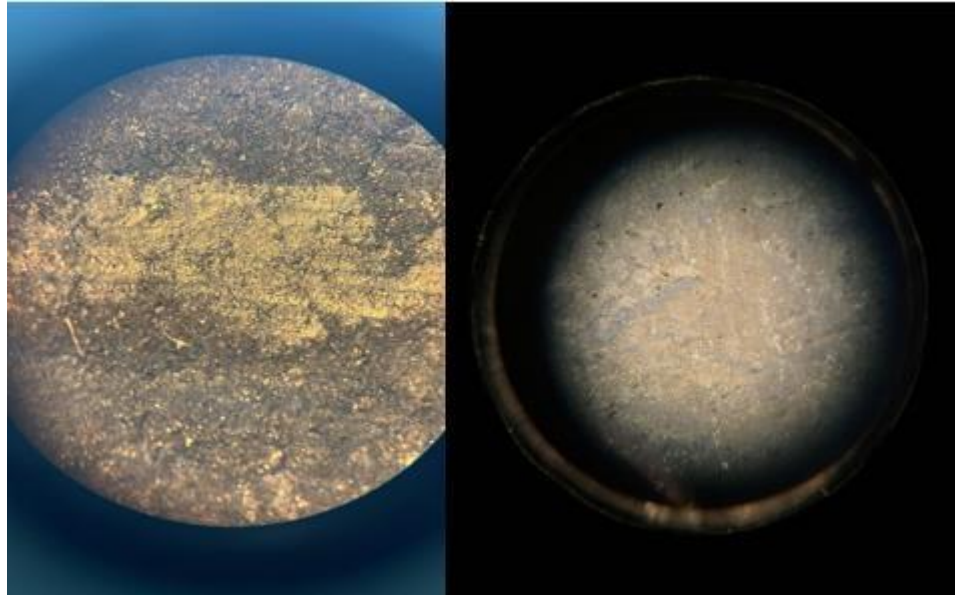


En la batería de referencia, mostrada en la Figura 27, la superficie presenta un aspecto menos uniforme, con variaciones visibles en la textura y pequeñas discontinuidades en el material activo. Sin emitir conclusiones únicamente a partir de la observación visual, este tipo de morfología suele relacionarse con una distribución menos homogénea del material sobre la placa. Esta condición adquiere relevancia durante el proceso de descarga bajo carga, ya que las irregularidades superficiales pueden convertirse en puntos donde se concentren mayores esfuerzos locales, afectando el comportamiento electroquímico en determinadas zonas.



**Fig. 28** Fotos del estereomicroscopio de la batería modificada el ácido

En la batería modificada en el electrolito, en la figura 28 las placas observadas antes de las pruebas se ven muy similares a las de la batería de referencia. Esto es coherente con el hecho de que en esta configuración el cambio no se aplica directamente sobre la pasta activa ni sobre la geometría de la placa, sino sobre el medio (el electrolito). Por lo tanto, en esta etapa inicial era esperable no encontrar diferencias grandes en morfología superficial únicamente por inspección visual, ya que el posible efecto del aditivo en electrolito normalmente se evidencia durante el proceso electroquímico repetido (ciclos), no como un cambio inmediato de “forma” en la placa antes de operar

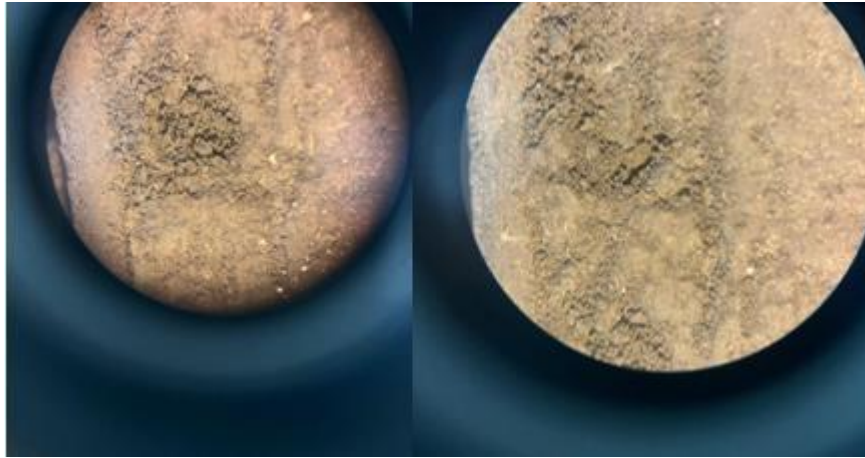


**Fig. 29** Fotos del estereomicroscopio de la batería modificada la placa negativa

Finalmente, en el caso de la batería modificada en las placas negativas la figura 29, se aprecia una superficie con un tono más uniforme en varias zonas y con una textura que, al menos visualmente, luce más “compacta” en comparación con las otras configuraciones. En estas placas se distinguen áreas donde el material activo se ve más continuo, con menos cambios bruscos de relieve, lo que sugiere que la modificación aplicada sí dejó una huella observable desde el inicio, aunque todavía no se haya sometido a la batería a esfuerzo por carga resistiva.

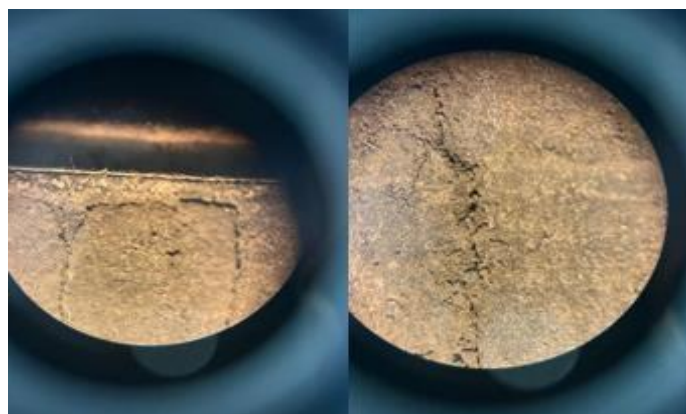
#### **4.3.2 Estereomicroscopia después de los ciclos**

Luego de finalizar los ciclos de carga y descarga, se repitió la inspección microscópica para observar cómo quedó el material activo en cada condición.



**Fig. 30** Fotos del estereomicroscopio de la batería referencia después de los 200 ciclos

En la batería de referencia se aprecia un desgaste superficial más evidente, con zonas donde la textura resulta más áspera y áreas en las que el material activo pierde cierta homogeneidad. En algunos puntos se observa una disminución en la continuidad del recubrimiento, así como variaciones de contraste que podrían estar asociadas a cambios en el estado del material después de los ciclos de operación. Estas características, consideradas dentro del contexto experimental, son compatibles con un proceso de envejecimiento asociado al ciclaje, en el cual el material activo puede volverse menos uniforme y presentar mayor susceptibilidad a desprendimientos localizados.



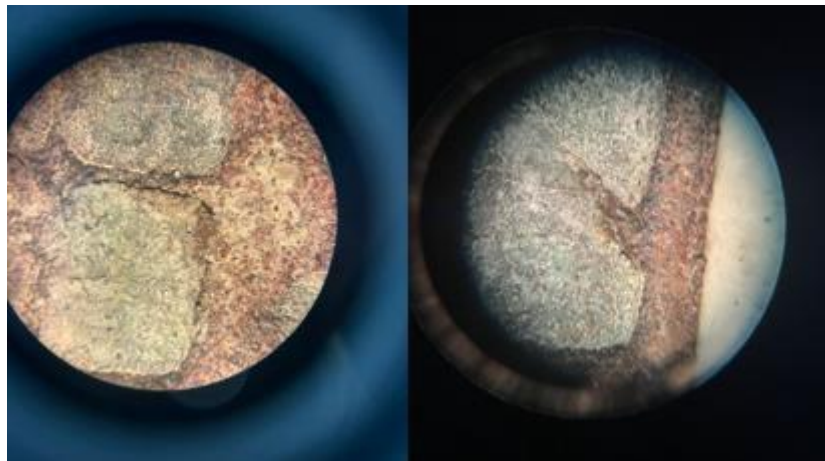
**Fig. 31** Fotos del estereomicroscopio de la batería modificada el electrolito después de los 200 ciclos



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Por su parte, en la batería modificada en el electrolito la figura 31, se aprecian cambios posteriores al ciclaje pero con un patrón que, en apariencia, se mantiene cercano al de la referencia en cuanto a morfología base, lo cual tiene sentido porque la placa no fue intervenida directamente. Sin embargo, el hecho de que el electrolito sea distinto puede reflejarse más en el comportamiento electroquímico (estabilidad de ciclos, caída de voltaje, respuesta bajo carga) que en un cambio geométrico inmediato del material. Por eso, en esta configuración la lectura más fuerte se apoya cómo se relaciona lo observado con lo que mostraron las curvas eléctricas a lo largo de los ciclos.



**Fig. 32** Fotos del estereomicroscopio de la batería modificada la placa negativa después de los 200 ciclos

En la batería modificada en las placas negativas la figura 32, se observa un comportamiento visual distinto: aunque también hay zonas con desgaste, en varias áreas el material parece conservar una estructura más “entera”, con menos transición abrupta entre regiones y con un aspecto más continuo del recubrimiento. Esto no significa que no exista degradación, pero sí da un indicio de que el tratamiento aplicado podría estar ayudando a mantener mayor cohesión superficial del material activo frente al trabajo repetido bajo carga. Esta observación adquiere relevancia porque se relaciona directamente con el objetivo de las modificaciones implementadas: no solo optimizar la conducción eléctrica, sino también contribuir a una mayor estabilidad estructural del material activo frente al proceso de ciclaje.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



La degradación progresiva de la superficie puede incidir en la respuesta eléctrica, por lo que su control resulta fundamental en la evaluación comparativa.

El análisis microscópico aporta un elemento adicional de interpretación, ya que las diferencias entre configuraciones no solo se evidencian en los registros eléctricos obtenidos, sino que también se sugieren en el estado superficial del material activo. Esta relación se aprecia con mayor claridad en la configuración donde el aditivo fue incorporado directamente en las placas negativas, cuya morfología muestra indicios de mayor continuidad estructural dentro de las condiciones evaluadas.

. Este resultado es coherente con el enfoque experimental del trabajo, donde se comparan dos formas de incorporación del nano-grafeno y se evalúa cuál deja un efecto más observable tanto en operación como en condición física tras el ciclaje.

#### **4.4 Discusión e interpretación de resultados**

La integración de los resultados eléctricos con las observaciones microscópicas permite construir una lectura más completa sobre el efecto del nanografeno en baterías plomo-ácido. En esta sección se integran los resultados obtenidos en la batería de referencia y en las dos configuraciones modificadas, correspondientes a la incorporación de nanografeno en la placa negativa y en el electrolito. El propósito es establecer una relación entre las tendencias observadas durante los ciclos de carga y descarga y las variaciones apreciadas en la morfología superficial de las placas antes y después de las pruebas. La discusión se plantea de manera conjunta, de modo que los registros eléctricos no se analicen de forma aislada respecto de las micrografías, sino como partes de un mismo comportamiento electroquímico. Desde esta perspectiva, las diferencias en el desempeño pueden interpretarse a la luz del estado físico del material activo, considerando especialmente cómo el método de incorporación del aditivo influye en la estabilidad estructural y, en consecuencia, en la respuesta global del sistema.

##### **4.4.1 Comparación entre los tres escenarios**

Al comparar de forma directa los tres escenarios, se observa que el método de incorporación del nanografeno marca diferencias tanto en el comportamiento eléctrico como en el estado físico del material activo. La batería de referencia representa el desempeño



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



esperado de un acumulador comercial sin intervención, mientras que las dos baterías modificadas permiten aislar el efecto del aditivo según el punto donde se lo incorporó: en la pasta activa de la placa negativa o directamente en el electrolito. Esta comparación es importante porque, aunque las tres unidades parten del mismo formato (12 V – 7 Ah) y se ensayan bajo la misma carga resistiva (11,6  $\Omega$ ) y el mismo umbral de corte (10,5 V), el mecanismo de mejora no debería ser el mismo en ambos casos.

Desde el análisis del voltaje durante la descarga, la batería modificada en la placa negativa presenta una trayectoria más estable, con una disminución menos pronunciada y un tramo operativo más extendido antes de aproximarse al límite de 10,5 V. Esta tendencia se observa con mayor claridad en ciclos intermedios como el 50, 100 y 150, donde el voltaje se mantiene por más tiempo en comparación con la batería de referencia. Este comportamiento puede asociarse a una menor oposición interna al paso de corriente y a una respuesta más uniforme bajo carga.

Por su parte, la batería con electrolito modificado muestra un perfil más cercano al de la referencia en términos de caída de voltaje, aunque se perciben ciertos indicios de mayor regularidad entre ciclos, reflejados en una forma de curva menos irregular. Este comportamiento resulta coherente con una posible influencia del aditivo sobre el medio iónico; sin embargo, el efecto no parece ser tan marcado como el observado cuando el material conductor se incorpora directamente en la pasta activa de la placa negativa.

En cuanto a la corriente de descarga, al trabajar con una resistencia fija de 11,6  $\Omega$  la corriente queda condicionada por el voltaje instantáneo ( $I \approx V/R$ ). Por eso, cuando una batería logra sostener mayor voltaje durante más tiempo, también sostiene una corriente más sostenida durante la descarga. En este sentido, la batería modificada en la placa negativa no necesariamente presenta corrientes máximas más altas, sino una descarga más aprovechable: la corriente cae de forma menos acelerada conforme avanza el tiempo, lo que se refleja en una entrega energética más uniforme. La referencia, por el contrario, tiende a mostrar una reducción más marcada de la corriente a medida que el voltaje cae, especialmente en los ciclos más avanzados, lo cual es consistente con aumento progresivo de resistencia interna y pérdida de capacidad efectiva



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



La batería con electrolito modificado se mantiene en una posición intermedia: puede mostrar una leve mejora en estabilidad respecto a la referencia, pero sin alcanzar el comportamiento más consistente que se observa cuando el aditivo forma parte de la estructura del electrodo.

Finalmente, al contrastar estos resultados con el análisis microscópico, la comparación se vuelve más sólida. Antes de las pruebas, la batería de referencia y la batería destinada al electrolito modificado presentaban placas con morfología muy similar (lo cual es lógico, porque todavía no existía interacción del aditivo con los ciclos), mientras que la placa negativa modificada ya mostraba cambios asociados al recubrimiento/mezcla del nanografeno. Después de completar los ciclos de ensayo, la batería de referencia muestra indicios más evidentes de deterioro superficial, con mayor presencia de zonas rugosas y acumulaciones localizadas que pueden asociarse a procesos de sulfatación, además de señales compatibles con fatiga del material activo. En contraste, en la batería modificada en la placa negativa las micrografías reflejan una degradación menos pronunciada: el material activo mantiene una apariencia más homogénea y con menor concentración de estructuras en puntos específicos. Este comportamiento resulta consistente con la hipótesis de que la incorporación del aditivo en la placa negativa favorece una distribución más uniforme de la conducción eléctrica, disminuyendo la formación de zonas donde la reacción electroquímica tiende a concentrarse de manera localizada. La batería con electrolito modificado, por su parte, muestra cambios posteriores a los ciclos, pero su patrón se acerca más al comportamiento de la referencia que al de la batería modificada en placa, reforzando la interpretación de que el efecto del nanografeno es más fuerte cuando se incorpora directamente en el electrodo negativo y no solo en el medio electrolítico

#### **4.4.2 Relación entre mejoras estructurales y eléctricas**

La relación entre los resultados eléctricos y las observaciones microscópicas permite interpretar de forma más sólida el efecto del nanografeno sobre el desempeño de las baterías de plomo-ácido. En este estudio, las variaciones observadas en las curvas de voltaje y corriente se comprenden mejor cuando se consideran junto con el estado del material activo en las placas, ya que la respuesta eléctrica durante la descarga depende directamente de la



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



conductividad interna, del grado de contacto entre partículas y de la uniformidad con la que ocurren las reacciones electroquímicas en el electrodo.

En la caracterización previa al inicio de los ensayos, la batería de referencia y la batería destinada al electrolito modificado presentaron una morfología muy similar a nivel de placa, con porosidad irregular, distribución heterogénea del material activo y zonas con aglomeraciones. Este aspecto resulta relevante porque permite establecer que ambas unidades partían de condiciones comparables en el electrodo, de modo que las diferencias observadas posteriormente no pueden atribuirse a una ventaja estructural inicial. En contraste, la batería intervenida en las placas negativas presentó desde el inicio una textura superficial más homogénea, coherente con la incorporación directa del aditivo en la pasta activa, lo que sugiere una distribución más uniforme del material conductor dentro del electrodo.

Estas características estructurales encuentran correspondencia en la respuesta eléctrica registrada durante los ciclos. Bajo una descarga con carga resistiva constante de  $11,6 \Omega$ , el voltaje se convierte en un indicador sensible de la oposición interna al paso de corriente y de la estabilidad del sistema electroquímico. En los ciclos 50, 100 y 150 se observó que la batería modificada en las placas negativas sostuvo el voltaje durante un intervalo más prolongado, con una pendiente de caída menos pronunciada en comparación con la batería de referencia. Este comportamiento es compatible con la presencia de rutas de conducción más eficientes dentro del electrodo y con una menor tendencia a la concentración localizada de la reacción, condiciones que suelen asociarse con un incremento más moderado de la resistencia interna a medida que progresa el ciclaje.

De manera complementaria, el comportamiento de la corriente de descarga refuerza esta interpretación. Al mantenerse constante la resistencia externa, la corriente depende directamente del voltaje disponible, por lo que una trayectoria de voltaje más estable se traduce en una entrega de corriente más sostenida y consistente entre ciclos. En este contexto, las baterías modificadas evidenciaron una respuesta más uniforme a lo largo del ensayo, mientras que la batería de referencia mostró una pérdida progresiva de estabilidad conforme



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



aumentó el número de ciclos, comportamiento que puede relacionarse con la degradación del material activo y con un incremento gradual de las pérdidas internas.

Las observaciones microscópicas realizadas después de los ciclos aportan un respaldo morfológico a estas tendencias eléctricas. En la batería de referencia se identifican rasgos compatibles con mayor deterioro superficial del material activo, así como zonas con estructuras más densas o de apariencia cristalizada, características que suelen asociarse con procesos de sulfatación y con la pérdida de contacto efectivo dentro de la pasta. Este tipo de alteraciones estructurales permite comprender por qué, desde el punto de vista eléctrico, la batería de referencia presenta una caída de voltaje más pronunciada y una corriente menos sostenida a medida que avanza el ciclaje. En contraste, en la batería modificada en las placas negativas se observa un estado más homogéneo del material activo y una estructura superficial menos afectada, lo cual es consistente con una mejor conservación del intercambio electroquímico y con una respuesta eléctrica más estable durante la descarga.

En el caso de la batería con electrolito modificado, la interpretación se orienta a un efecto más indirecto, debido a que sus placas no recibieron dopaje en la pasta activa y, por tanto, partieron con una morfología similar a la batería de referencia. Bajo esta condición, cualquier variación en el desempeño puede atribuirse principalmente a modificaciones en el medio electrolítico, tales como cambios en el transporte iónico o en las pérdidas asociadas al sobrepotencial. En consecuencia, el comportamiento registrado tiende a situarse en un nivel intermedio: se observan mejoras respecto a la batería de referencia en términos de estabilidad de respuesta, aunque sin alcanzar el desempeño más consistente evidenciado por la batería intervenida directamente en las placas negativas. En esta última, el aditivo forma parte de la estructura conductora del electrodo, lo que implica una influencia más directa sobre las rutas de conducción y sobre la dinámica interna de la reacción electroquímica.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten inferir que el mecanismo con mayor impacto observable corresponde a la incorporación del nanografeno en las placas negativas. La mejora en el comportamiento eléctrico se presenta acompañada por una morfología más homogénea del material activo después de los ciclos de ensayo, lo que sugiere una relación



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



entre la estabilidad estructural del electrodo y su desempeño bajo carga. Este vínculo respalda la hipótesis de que las modificaciones estructurales en la placa influyen de manera directa en la resistencia interna efectiva del sistema y, en consecuencia, en la estabilidad del voltaje y en la capacidad de mantener la entrega de corriente durante el proceso de descarga.

#### **4.4.3 Impacto estructural en la vida útil de la batería**

El análisis microscópico permitió observar que la condición estructural de las placas tiene un efecto directo sobre la vida útil de las baterías de plomo-ácido, ya que la degradación no ocurre solo por “pérdida eléctrica”, sino por cambios físicos acumulativos en el material activo y en la interfaz con el electrolito. En términos prácticos, mientras más rápido se altera la porosidad, se forman microfisuras o se pierde cohesión en la pasta, más temprano aparece el aumento de resistencia interna y la disminución de capacidad durante el uso cíclico. En consecuencia, la vida útil del sistema no puede asociarse únicamente al número de ciclos alcanzados, sino también a la capacidad del electrodo para conservar su estabilidad mecánica y microestructural a lo largo del tiempo. En la batería de referencia, las micrografías evidencian una superficie con porosidad poco uniforme y zonas donde el material activo presenta heterogeneidad marcada, además de microfisuras y sectores con acumulaciones más densas. Este tipo de configuración superficial resulta propicia para mecanismos de deterioro progresivo, como la pérdida de cohesión del material activo y su eventual desprendimiento, la formación localizada de cristales de  $PbSO_4$  en regiones donde la penetración del electrolito no es homogénea, y la generación de áreas con menor actividad electroquímica que reducen la participación efectiva del electrodo. Conforme avanza el ciclaje, estas condiciones pueden manifestarse en una disminución más acelerada de la capacidad disponible, debido a que una fracción del material activo deja de intervenir en la reacción, reduciendo el área efectiva de intercambio y afectando el desempeño global de la batería.

En contraste, la batería modificada en las placas negativas mostró una textura superficial más homogénea y una distribución más uniforme del material activo. Esta característica adquiere relevancia desde el punto de vista mecánico, ya que una estructura más continua tiende a ofrecer mayor resistencia frente a la fatiga asociada al ciclaje repetido. Cuando la pasta conserva cohesión y presenta una porosidad más controlada, disminuye la



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



probabilidad de que se generen puntos críticos donde el material pueda fracturarse o desprenderse con mayor facilidad.

Asimismo, una microestructura más uniforme favorece que la formación de sulfato de plomo se distribuya de manera más equilibrada en la superficie del electrodo, lo que potencialmente incrementa su reversibilidad en ciclos posteriores y reduce el riesgo de sulfatación irreversible localizada. Desde la perspectiva de vida útil, este comportamiento puede interpretarse como una mayor capacidad para mantener el rendimiento durante un número más amplio de ciclos antes de que se manifiesten signos evidentes de degradación estructural y pérdida de desempeño eléctrico.

En el caso de la batería con electrolito modificado, las placas iniciales presentaban características similares a las de la batería de referencia, dado que no se realizó una incorporación directa del aditivo en la pasta activa antes de los ensayos. En consecuencia, cualquier efecto sobre la vida útil debe analizarse principalmente desde la modificación del medio electrolítico. Si el electrolito intervenido favorece un transporte iónico más estable o contribuye a reducir pérdidas asociadas al sobrepotencial, el sistema puede operar bajo condiciones electroquímicas más equilibradas durante el ciclo. Este comportamiento podría traducirse en una disminución de ciertos factores que aceleran el desgaste estructural, aunque su influencia tiende a ser menos directa que aquella derivada de una modificación estructural en el propio electrodo. Sin embargo, al no existir una mejora estructural inicial en la placa, los mecanismos de degradación mecánica del material activo pueden aparecer de forma parecida a la referencia, especialmente si la microfisuración y la heterogeneidad de la pasta son dominantes. En otras palabras, el electrolito puede aportar estabilidad operativa, pero la resistencia a la degradación a largo plazo depende en gran medida de la integridad física del electrodo.

En conjunto, los resultados permiten interpretar que las modificaciones estructurales aplicadas en las placas negativas ejercen una influencia relevante en la prolongación de la vida útil funcional, al incidir directamente en los mecanismos asociados a la pérdida de capacidad, tales como la sulfatación no reversible, el incremento progresivo de la resistencia interna y el desprendimiento del material activo. Desde esta perspectiva, la comparación



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



entre las tres configuraciones indica que la batería intervenida en las placas negativas muestra el mayor potencial para conservar su desempeño a lo largo del ciclaje.

Por su parte, la batería con electrolito modificado evidencia un aporte positivo vinculado principalmente al comportamiento del medio iónico y a la estabilidad química del sistema; sin embargo, su efecto se encuentra condicionado por el hecho de que la microestructura de la placa no fue alterada de forma directa, manteniendo características similares a la configuración de referencia. Esta diferencia estructural delimita el alcance del impacto observado en términos de retención de capacidad y estabilidad eléctrica en el tiempo.

#### **4.4.4 Implicaciones para aplicaciones prácticas**

Los resultados obtenidos en los tres escenarios evaluados permiten extraer implicaciones directas para aplicaciones reales donde las baterías de plomo-ácido siguen siendo una opción vigente por costo, disponibilidad y reciclabilidad. En términos generales, las diferencias observadas entre la batería de referencia, la modificada en placas negativas y la modificada en el electrolito sugieren que el tipo de intervención (en el electrodo o en el medio) puede orientar la selección del acumulador según el perfil de demanda: potencia instantánea, trabajo en carga parcial, estabilidad cíclica o necesidad de baja mantención.

En aplicaciones de alta corriente y uso intermitente (por ejemplo, arranque automotriz, respaldo de potencia por intervalos cortos o equipos con picos de consumo), el comportamiento de la batería modificada en las placas negativas resulta especialmente relevante. La mejora estructural observada en el material activo y la tendencia a una respuesta más estable durante los ciclos se asocian con una menor resistencia interna y con una entrega de potencia más consistente. En la práctica, esto se traduce en menor caída de voltaje bajo carga y en una mejor tolerancia a demandas intensas repetitivas, dos aspectos que suelen definir el desempeño real de una batería cuando trabaja cerca de su límite.

Por otro lado, en aplicaciones estacionarias o de respaldo (UPS, bancos para iluminación de emergencia, sistemas de telecomunicaciones) el criterio más crítico no siempre es la potencia máxima, sino la confiabilidad del ciclo y la estabilidad de operación. En este tipo de usos, la batería con electrolito modificado podría ofrecer ventajas si el aditivo



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



contribuye a mantener una respuesta más uniforme entre ciclos y a disminuir pérdidas asociadas al medio interno, siempre considerando que el estado físico de las placas sigue siendo un factor determinante. En sistemas donde se prioriza un comportamiento predecible y un control de degradación gradual, cualquier reducción de gasificación o mejora de estabilidad del electrolito puede representar menos mantenimiento y menor riesgo de fallos inesperados, especialmente cuando el banco opera en régimen continuo.

En el contexto de energías renovables (fotovoltaico/eólico), donde el trabajo en carga parcial y los ciclos frecuentes son comunes, las implicaciones son más claras desde el punto de vista operativo. Si la modificación en placas negativas ayuda a retardar la sulfatación y mantiene la conductividad del electrodo, el acumulador puede conservar su capacidad útil por más tiempo bajo un régimen de ciclos repetidos. Esto es importante porque en instalaciones reales, una batería rara vez trabaja con ciclos “ideales”; más bien enfrenta variaciones diarias, cambios de temperatura y periodos de carga incompleta. En ese escenario, una placa más estable estructuralmente reduce el deterioro acelerado típico del plomo-ácido cuando trabaja fuera de condiciones óptimas.

Finalmente, desde una perspectiva de implementación, los resultados también sugieren una diferencia práctica entre intervenir el electrodo y modificar el electrolito. La modificación de las placas negativas tiende a requerir un control más cuidadoso del proceso (mezcla, homogeneidad y aplicación), pero a cambio aporta un efecto más directamente relacionado con la durabilidad del material activo. En cambio, modificar el electrolito puede ser más sencillo de aplicar en ciertos entornos, aunque su beneficio depende de mantener la dispersión estable y de evitar efectos secundarios en la química interna. Por ello, para un uso práctico y escalable, no basta con que exista una mejora en laboratorio: también debe considerarse la repetibilidad del método, la seguridad del manejo de materiales y la factibilidad de replicarlo sin introducir variaciones que afecten el desempeño.

En síntesis, el trabajo sugiere que la incorporación de nanografeno tiene potencial para ampliar la aplicabilidad de las baterías de plomo-ácido, particularmente cuando se busca mejorar su desempeño en regímenes exigentes o prolongar su estabilidad en ciclos repetitivos. La elección del enfoque de modificación (placa o electrolito) debe alinearse con



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



el tipo de demanda de la aplicación, priorizando la estabilidad estructural del electrodo cuando se busca vida útil, y evaluando el aporte del electrolito cuando el objetivo principal es mejorar la uniformidad operativa del sistema

### **Conclusiones**

- La incorporación de aditivos de carbono sí influye positivamente en el comportamiento de las baterías de plomo-ácido, especialmente cuando el nanografeno se aplicó directamente en la placa negativa. Durante los ciclos de carga y descarga, esta batería mostró una respuesta más estable en voltaje y corriente, lo que evidencia una mejora en el desempeño electroquímico frente a la batería de referencia.
- La modificación en la placa negativa fue más efectiva que la incorporación del aditivo en el electrolito. Aunque ambas configuraciones modificadas presentaron mejoras respecto a la batería convencional, los resultados eléctricos y el análisis microscópico demostraron que el tratamiento sobre la placa permitió una mejor conservación del material activo, una descarga más uniforme y una menor tendencia al deterioro acelerado.
- Existe una relación directa entre la estabilidad estructural de las placas y el rendimiento eléctrico de la batería. Las observaciones realizadas con estereomicroscopio confirmaron que las baterías con mejor comportamiento durante los ciclos también conservaron una superficie más homogénea y menos afectada por procesos de degradación. Esto permite concluir que mejorar la microestructura del electrodo contribuye no solo al rendimiento inmediato, sino también a una mayor proyección de vida útil.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda profundizar el estudio del nanografeno aplicado, ya que se presentó los resultados favorables para futuras investigaciones que podrían evaluar diferentes concentraciones y métodos de aplicación con el fin de optimizar aún más su integración y determinar la proporción más eficiente.



## **Bibliografía**

- [1] Y. Gogotsi and P. Simon, “True performance metrics in electrochemical energy storage,” *Science*, vol. 334, no. 6058, pp. 917–918, 2011.
- [2] M. Kozawa, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology, A Comprehensive Treatment*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2021.
- [3] Yao, L. W., Aziz, J. A., Kong, P. Y., & Idris, N. R. N. *Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/Simulink*, 2019.
- [4] Nasser-Eddine, M., Hubert, C., Aurbach, D., & Hammami, A. *A comprehensive review on lead-acid batteries: Competitive technologies and challenges*, 2021
- [5] Battery University, "BU-201: How does the Lead Acid Battery Work?," [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/lead\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries)
- [6] Schiffer, J., Schmitz, D., Kosch, S., & Sauer, D. U. *Modelling of the fundamental aspects of lead-acid batteries*, 2020.
- [7] D. Pavlov, B. Monahov, and P. T. Moseley, “Advances and limitations of lead–acid batteries for energy storage applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 436, Art. no. 226857, 2019.
- [8] B. Monahov, D. Pavlov, and P. T. Moseley, “Lead–carbon batteries for automotive and energy storage applications,” *Journal of Energy Storage*, vol. 24, Art. no. 100766, 2019.
- [9] M. Aneke and M. Wang, “Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review,” *Applied Energy*, vol. 179, pp. 350–377, 2016.
- [10] J. Garche et al., *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018.
- [11] N. Nitta et al., “Li-ion battery materials: present and future,” *Materials Today*, vol. 18, no. 5, pp. 252–264, 2015.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



- [12] J. B. Goodenough and K. Park, “The Li-ion rechargeable battery: A perspective,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 135, no. 4, pp. 1167–1176, 2013.
- [13] D. Linden and T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
- [14] D. Linden and T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
- [15] D. Pavlov, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2011. M. Kozawa, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology, A Comprehensive Treatment*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2021.
- [15] Bagen, B., & Billinton, R. *Evaluation of different operating strategies in small stand-alone power systems*, 2019.
- [16] D. Linden and T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
- [17] M. Kozawa, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology, A Comprehensive Treatment*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2021.
- [18] M. Parker y R. McMahon, “Novel test procedure for assessing lead–acid batteries for partial-state-of-charge duty using internal resistance charge acceptance technique,” *Batteries*, vol. 11, no. 4, Art. no. 131, 2025.
- [19] M.Á.H. Epigmenio, “Estudio y análisis del estado de carga y descarga de baterías de plomo-ácido en función de voltaje y corriente,” ESIME, Institución Politécnica Nacional, México, 2025
- [20] Zhang, L., Liu, Y., & Wang, H. *Advances in lead-acid battery technology: Materials, manufacturing, and applications*, 2021
- [21] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



- [22] J. Garche et al., “Electrochemical energy storage for electric vehicles,” *Journal of Power Sources*, vol. 479, Art. no. 228806, 2020.
- [23] M. Berecibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van den Bossche, “Critical review of state of charge estimation methods of lead–acid batteries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 572–587, 2016.
- [24] J. Jiang, Q. Xue, C. Zhang, J. Li, and R. Zhang, “Battery management system design for lead–acid battery applications,” *Journal of Power Sources*, vol. 412, pp. 552–564, 2019.
- [25] D. Pavlov, B. Monahov, and P. T. Moseley, “Influence of plate design and electrolyte composition on the performance of lead–acid batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 412, pp. 552–560, 2018.
- [26] A. Ruetschi and B. Monahov, “Corrosion phenomena and contact resistance in lead–acid battery terminals,” *Journal of Power Sources*, vol. 404, pp. 35–44, 2018.
- [27] B. Monahov, D. Pavlov, and P. T. Moseley, “Influence of terminal materials on corrosion and contact resistance in lead–acid batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 404, pp. 35–44, 2018.
- [28] A. Tomaszewska et al., “Design considerations for improving electrical connections in lead–acid batteries,” *Energies*, vol. 12, no. 22, Art. no. 4321, 2019.
- [29] D. Pavlov, B. Monahov, and P. T. Moseley, “Effect of carbon additives on the negative plates of lead–acid batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 412, pp. 552–560, 2018
- [30] B. Monahov and D. Pavlov, “Carbon additives improve charge acceptance and cycle life of lead–acid batteries under partial state of charge,” *Journal of Energy Storage*, vol. 21, pp. 654–662, 2019.
- [31] J. Wang et al., “Graphite and graphene as additives in lead-acid batteries: A review,” *J. Energy Storage*, vol. 28, p. 101228, 2020.
- [32] D. Pavlov, B. Monahov, and P. T. Moseley, “Advances in lead–acid battery additives and materials,” *Journal of Power Sources*, vol. 409, pp. 1–14, 2018.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



- [33] B. Monahov, D. Pavlov, “Carbon additives for the negative active material of lead–acid batteries,” *Journal of Energy Storage*, vol. 24, 2019.
- [34] A. Kirchev et al., “Effect of expanded graphite on the performance of lead–acid batteries under deep discharge,” *Journal of Power Sources*, vol. 440, 2019.
- [35] M. Saravanan et al., "Graphene and modified graphene-based polymer nanocomposites in energy storage applications: A review," *Energy Storage Mater.*, vol. 33, pp. 501-521, 2020.
- [36] B. Monahov, D. Pavlov, “Effect of carbon black additives on the performance of lead–acid batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 435, 2019.
- [37] A. Kirchev et al., “Synergistic effects of combined carbon additives in lead–acid batteries,” *Journal of Energy Storage*, vol. 28, 2020.
- [38] D. Pavlov, P. Nikolov, T. Rogachev, *J. Power Sources*, 196 (2011) 5155–5167.
- [39] Patel, S., & Johnson, K. *Advanced grid alloys for lead-acid batteries*, 2022.
- [40] Kumar, S., Yadav, P., & Jain, S. *Recent advances in electrolyte additives for lead-acid batteries*, 2021.
- [41] M. Kozawa, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology, A Comprehensive Treatment*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2021.
- [42] Fernández-Macía, L., Rodríguez-Martínez, L. M., & García-Luis, A *Carbon-enhanced negative electrodes for high-performance lead-acid batteries*, 2023.
- [43] Chen, X., Li, W., & Zhao, Y. *Recent advances in sulfation mitigation strategies for lead-acid batteries*, 2020.
- [44] Wang, J., Zhang, Y., & Liu, C. *Graphite-based additives for lead-acid batteries*, 2021.
- [45] Rodríguez-Martínez, L. M., & Fernández-Macía, L. *Graphene and graphite additives for high-performance lead-acid batteries*, 2023.
- [46] Wang, J., Zhang, Y., & Liu, C. *Graphite-based additives for lead-acid batteries*, 2021.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



- [47] Chen, X., Li, W., & Zhao, Y. Effect of graphite concentration on the performance of lead-acid battery negative electrodes, 2020.
- [48] Rodríguez-Martínez, L. M., & Fernández-Macía, L. Graphite-enhanced electrodes in lead-acid batteries: Structural and electrochemical considerations, 2023.
- [49] J. Garche and E. Karden, "Lead-acid batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles," in *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, B. Scrosati, J. Garche, and W. Tillmetz, Eds. Woodhead Publishing, 2019, pp. 249-278.
- [50] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P. J. Ker, "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 69362-69388, 2019.
- [51] T. Horiba, "Lead-acid battery," in *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, P. T. Moseley and J. Garche, Eds. Elsevier, 2020, pp. 515-531.
- [52] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, and D. G. Dorrell, "A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1868-1878, 2022.
- [53] J. Rivera-Barrera, N. Muñoz-Galeano, and H. Sarmiento-Maldonado, "SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges," *Electronics*, vol. 6, no. 4, p. 102, 2021.
- [54] M. Kusw and I. Yüksek, "Design and Implementation of a Low-Cost Arduino Mega 2560-Based Data Acquisition System for Photovoltaic Modules," *Sustainability*, vol. 12, no. 21, p. 9230, 2020.
- [55] R. Krishnan, M. Ramesh, and V. Nagarajan, "Design and Development of Arduino Uno-Based Energy Management System for Smart Buildings," *Journal of Green Engineering*, vol. 10, no. 11, pp. 11297-11309, 2020.
- [56] Y. Zhang, H. Feng, X. Wu, L. Wang, A. Zhang, T. Xia, H. Dong, X. Li, and L. Zhang, "Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 4889-4899, 2019.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



- [57] Q. Zhang, E. Uchaker, S. L. Candelaria, and G. Cao, "Nanomaterials for energy conversion and storage," *Chemical Society Reviews*, vol. 42, no. 7, pp. 3127-3171, 2019.
- [58] L. Kou, C. Chen, and S. C. Smith, "Phosphorene: Fabrication, Properties, and Applications," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 6, no. 14, pp. 2794-2805, 2019.
- [59] A. Ambrosi, C. K. Chua, N. M. Latiff, A. H. Loo, C. H. A. Wong, A. Y. S. Eng, A. Bonanni, and M. Pumera, "Graphene and its electrochemistry – an update," *Chemical Society Reviews*, vol. 45, no. 9, pp. 2458-2493, 2019.
- [60] Y. Wang, C. Chen, H. Xie, T. Gao, Y. Yao, G. Pastel, X. Han, Y. Li, J. Zhao, K. Fu, and L. Hu, "Advanced rechargeable zinc-based batteries: Recent progress and future perspectives," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 51, p. 2002974, 2020