

# **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE BATERÍAS DE ION-LITIO Y PLOMO-ÁCIDO EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA**

## *PERFORMANCE EVALUATION OF LITHIUM-ION AND LEAD-ACID BATTERIES IN ENERGY STORAGE SYSTEMS*

### **Héctor Javier Jarquin Flores**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*hector.jarquin@itoaxaca.edu.mx*

### **Alfredo Cruz Valdiviezo**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*alfredo.cruz@itoaxaca.edu.mx*

### **Adiv González Muñoz**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*adiv.gonzalez@itoaxaca.edu.mx*

### **Noé Pérez Arreortúa**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*Noe.perez@itoaxaca.edu.mx*

### **Rubén Doroteo Castillejos**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*ruben.doroteo@itoaxaca.edu.mx*

### **Carlos Mauricio Lastre Domínguez**

Tecnológico Nacional de México / IT de Oaxaca, México  
*carlos.lastre@itoaxaca.edu.mx*

**Recepción:** 9/diciembre/2024

**Aceptación:** 16/abril/2025

## **Resumen**

La transición hacia fuentes de energía sostenibles y menos contaminantes es una prioridad urgente en el panorama energético actual. La energía solar, especialmente mediante sistemas fotovoltaicos interconectados, se presenta como una solución prometedora. Para maximizar su aprovechamiento, es esencial seleccionar baterías adecuadas para el almacenamiento de energía. Este estudio compara simulaciones de sistemas de almacenamiento construidos por baterías de ion-litio y plomo-ácido en términos de carga, descarga y eficiencia durante un año.

Los resultados destacan la superioridad de las baterías de ion-litio en eficiencia y durabilidad, alcanzando un 93% de capacidad *kWh*, en comparación con un 87% de las baterías de plomo-ácido. Esto las convierte en una opción atractiva para sistemas que requieren alta fiabilidad y larga vida útil. Sin embargo, las baterías de plomo-ácido son una alternativa rentable en escenarios con restricciones presupuestarias. Se concluye que la elección de cada tipo de batería depende de múltiples factores, como la complejidad del sistema, la capacidad económica y el horizonte temporal del proyecto, ya sea a corto, mediano o largo plazo.

**Palabras Clave:** Almacenamiento de energía, Análisis comparativo, Baterías de ion-litio, Baterías de plomo-ácido, Sistemas fotovoltaicos interconectados.

## **Abstract**

*The urgent shift to sustainable and less polluting energy sources is a key priority in the current energy landscape. Solar energy, particularly through interconnected photovoltaic systems, holds significant promise. To maximize its potential, selecting suitable batteries for energy storage is essential. This study compares lithium-ion and lead-acid batteries in terms of their charging, discharging, and efficiency over a year. The results emphasize lithium-ion batteries' superior efficiency and durability, achieving a capacity of 93% kWh compared to 87% for lead-acid batteries. This makes lithium-ion batteries an appealing option for systems that require high reliability and a long life. However, lead-acid batteries are a cost-effective alternative in scenarios with budget constraints. In conclusion, the choice of battery type depends on various factors, including system complexity, economic capacity, and the project's time horizon, whether short, medium, or long long-term.*

**Keywords:** *Comparative analysis, Energy storage, Interconnected photovoltaic systems, Lead-acid batteries, Lithium-ion batteries.*

## **1. Introducción**

En el actual panorama energético, caracterizado por una urgente necesidad de transición energética hacia fuentes cuyas características sean sostenibles y menos contaminantes, la energía solar emerge como una alternativa prometedora. La

integración de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica representa un avance significativo en este sentido, facilitando el aprovechamiento de la energía solar, una fuente limpia y abundante [Solomon, 2022]. Sin embargo, la variabilidad inherente de la generación solar, sujeta a condiciones meteorológicas y diurnas, plantea desafíos críticos para el mantenimiento de la estabilidad y la confiabilidad en la provisión energética [Njeh, 2023]. La gestión eficiente de esta intermitencia es crucial y es aquí donde el almacenamiento de energía adquiere un papel fundamental, permitiendo acumular energía en períodos de alta generación para su utilización durante los momentos de demanda pico o baja producción solar [Alcaide-Godinez, 2022], [Naderi, 2024].

Dentro de la gama de tecnologías de almacenamiento, las baterías de ion-litio y plomo-ácido destacan por su amplia adopción y aplicabilidad. Las primeras, con su notable densidad energética y larga durabilidad, se posicionan como una opción avanzada apta para sistemas donde la eficiencia y la longevidad son prioritarias [Chen, 2020], [Chehab, 2023].

Por otro lado, las baterías de plomo-ácido, si bien representan una alternativa económicamente más accesible, enfrentan limitaciones en cuanto a eficiencia y vida útil, situándose como una solución viable en contextos donde los costos iniciales limitados son un factor decisivo [Hannan, 2024]. La elección entre estas tecnologías requiere una evaluación cuidadosa considerando múltiples factores [Makola, 2023], incluidos los económicos, ambientales y de rendimiento, para alinear la solución de almacenamiento con los objetivos de operación del sistema fotovoltaico interconectado [Doe, 2020].

En la literatura, diversos trabajos han considerado estudios comparativos basados en diferentes aplicaciones de baterías. Por ejemplo, algunos estudios han realizado comparaciones entre baterías de ion-litio y baterías de plomo-ácido para aplicaciones en vehículos eléctricos [Scrosati, 2010], [Sarker, 2024]. Otros estudios se han centrado en el uso de baterías de ion-litio para la gestión de almacenamiento en sistemas de redes interconectadas [Yudhistira, 2022]. Además, algunos trabajos han implementado estrategias basadas en el filtro de Kalman para estimar el estado de salud de las baterías de ion-litio. Otros estudios han utilizado el filtro de Kalman

extendido, que considera la no linealidad del sistema, para estimar la carga de la batería [Shi, 2022]. A diferencia de estudios previos que se centran en la comparación de baterías de ion-litio y plomo-ácido en aplicaciones de almacenamiento general o en microrredes conectadas a la red, nuestro trabajo examina específicamente el desempeño de las baterías mencionadas analizando su capacidad de almacenamiento, eficiencia y durabilidad anual.

Los resultados de este estudio, basado en simulaciones de un año, demostraron que las baterías de ion-litio conservan una proporción significativamente mayor de su capacidad original en comparación con las de plomo-ácido. Específicamente, las baterías de ion-litio mantuvieron un 93% de su capacidad inicial, mientras que las de plomo-ácido solo alcanzaron un 87%. Esta mayor durabilidad se traduce en una reducción de la frecuencia de reemplazo, lo que conlleva ahorros sustanciales en costos operativos y de mantenimiento a largo plazo. Las baterías de ion-litio son una opción más adecuada para aplicaciones que demandan alta fiabilidad y una larga vida útil.

## **2. Métodos**

### **Selección de baterías**

Se seleccionaron datos representativos de baterías de ion-litio y plomo-ácido de diferentes fabricantes reconocidos en el mercado, incluyendo baterías de ion-litio con composiciones químicas como NMC (Níquel Manganese Cobalto) y LFP (Fosfato de Hierro y Litio), así como baterías de plomo-ácido en variantes AGM (*Absorbent Glass Mat*) y Gel, [Nitta, 2015], [Zhang, 2012], [Ko, 2023], [Walkowiak, 2024], [Khanahmadi, 2021], [Bello, 2024], [Zhao, 2024], [He, 2024].

### **Pruebas de ciclo**

Las simulaciones de carga y descarga se realizaron utilizando un sistema de ciclaje de baterías programable, que permite controlar y monitorear con precisión los ciclos de carga y descarga. Los parámetros de carga y descarga se ajustaron para reflejar condiciones reales de operación en sistemas fotovoltaicos, con ciclos diarios simulados que incluyen periodos de alta y baja demanda de energía. Las

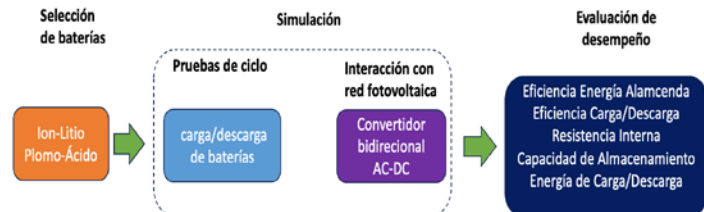
baterías fueron sometidas a múltiples ciclos de carga completa seguida de una descarga controlada hasta el punto de corte especificado por el fabricante.

### Interacción con la red fotovoltaica

En los sistemas fotovoltaicos interconectados, la energía generada por los paneles solares pasa a través del convertidor bidireccional AC-DC, que convierte la corriente alterna en corriente directa para ser almacenada en las baterías de ion-litio o plomo-ácido. Durante los periodos de alta irradiación solar, el convertidor permite la carga de las baterías, almacenando el excedente de energía generado.

### Evaluación de desempeño

Se midieron varios parámetros clave durante estas simulaciones: la capacidad de las baterías ( $Ah$ ) utilizando un ciclo de carga completa seguido de una descarga controlada; la eficiencia de carga y descarga, calculada comparando la energía suministrada durante la carga con la energía recuperada durante la descarga; la resistencia interna ( $m\Omega$ ), y la durabilidad, evaluada mediante la simulación de un año de operación con ciclos de carga y descarga diarias, registrando la capacidad residual y la eficiencia al final del periodo de simulación. Todo el marco metodológico se ilustra en la Figura 1, donde se muestra las etapas para la comparación de las baterías estudiadas.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Marco metodológico.

Las simulaciones se realizaron bajo el software Python, con bibliotecas como Pandas para la manipulación y el procesamiento de datos, Matplotlib para la creación de gráficos y visualizaciones, Scipy para el análisis estadístico. Para modelar y analizar el rendimiento de las baterías, se emplearon modelos de

ecuaciones diferenciales asociados. Para reflejar la incertidumbre operativa en sistemas fotovoltaicos interconectados, se incluyó la variabilidad en los modelos de simulación.

### Descarga eléctrica

Para modelar la descarga de la batería (Ecuación 1), que relaciona la tasa de cambio de la carga  $Q$  con respecto al tiempo  $t$ , considerando una corriente de descarga  $I(t)$  variable.

$$\frac{dQ}{dt} = -I(t) \quad (1)$$

Donde:

$Q$  : Carga eléctrica, medida en coulombs ( $C$ ).

$t$  : Tiempo medido en segundos ( $s$ ).

$\frac{dQ}{dt}$  : Derivada de la carga  $q$  con respecto al tiempo  $t$ .

$-I(t)$  : Corriente eléctrica en función del tiempo, medida en amperios ( $A$ ).

### Energía almacenada

La energía almacenada, determinada tanto por la carga  $Q$  en Ampere-hora ( $Ah$ ) y el voltaje  $V(t)$ , que también puede variar durante la descarga, Ecuación 2.

$$\frac{dE}{dt} = V(t)I(t) \quad (2)$$

Donde:

$\frac{dE}{dt}$  : Tasa de cambio de la energía con respecto al tiempo.

$E$  : Energía almacenada en la batería respecto al tiempo.

$V(t)$  : Voltaje en un instante de tiempo.

$I(t)$  : Corriente en un instante de tiempo.

### Resistencia interna

La derivada respecto al tiempo del diferencial de resistencia interna  $\frac{dR}{dt}$ , Ecuación 3, es una función del proceso de carga y descarga a lo largo del tiempo, así como por otros factores como la temperatura.

$$\frac{dR}{dt} = f(R, q, T) \quad (3)$$

Donde:

$\frac{dR}{dt}$  : Relación entre la tasa de cambio de la resistencia y factores  $R$ ,  $Q$ , y  $T$ .

$f$  : Función bajo condiciones operativas de eficiencia y vida útil de la batería.

$R$  : Resistencia interna de la batería.

$T$  : Temperatura de la batería.

### Capacidad de batería

La capacidad de la batería  $C(t)$  disminuye con el tiempo debido a procesos de degradación, Ecuación 4.

$$\frac{dC(t)}{dt} = -\delta \cdot C(t) \quad (4)$$

Donde:

$\frac{dC(t)}{dt}$  : Derivada de la función de carga con respecto al tiempo.

$\delta$  : Tasa de degradación.

$C(t)$  : Capacidad de carga en el tiempo.

### Eficiencia

La eficiencia  $\eta(t)$  de la batería se ve afectada por variaciones diarias respecto a su rendimiento, Ecuación 5. Dada la Ecuación 5, se calcula la energía de carga  $E_c(t)$  y de descarga  $E_d(t)$ , Ecuaciones 6 y 7.

$$\eta(t) = \eta_0 - \epsilon(t) \quad (5)$$

$$E_c(t) = \alpha(t) \cdot C(t) \cdot \eta(t) \quad (6)$$

$$E_d(t) = \frac{E_c(t)}{\eta(t)} \quad (7)$$

Donde:

$\eta(t)$  : Eficiencia de la batería en el tiempo.

$\eta_0$  : Eficiencia base de la batería.

$\epsilon(t)$  : Variaciones estocásticas.

$E_c(t)$  : Energía de carga respecto al tiempo.

$E_d(t)$  : Energía de descarga con respecto al tiempo.

$\alpha(t)$  : Factor relacionado con la variabilidad en la cantidad de energía. que se intenta cargar en cada ciclo.

Dado que algunos de los parámetros puede variar en condiciones reales, se introdujeron valores promedio con márgenes de variabilidad para reflejar incertidumbres operativas. Las especificaciones técnicas de las baterías seleccionadas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1 Especificaciones técnicas de las baterías.

Tipo de batería	Composición química	Capacidad nominal (Ah)	Voltaje nominal (V)	Ciclos de vida
Ion-Litio	NMC	200	3.7	2000+
Ion-Litio	LFP	180	3.2	3000+
Plomo-Ácido	AGM	150	12	500-800
Plomo-Ácido	Gel	140	12	600-900

Fuente: elaboración propia.

### 3. Resultados

#### Impacto del convertidor AC-DC en el rendimiento de las baterías

Uno de los aspectos clave evaluados en este estudio es el impacto que tiene la inclusión de un convertidor bidireccional AC-DC en el rendimiento de las baterías de ion-litio y plomo-ácido en los sistemas fotovoltaicos interconectados. Este convertidor introduce pequeñas pérdidas energéticas durante la conversión de corriente alterna (AC) a corriente directa (DC) y viceversa.

Como muestra la Tabla 2, el convertidor AC-DC utilizado en las simulaciones tiene una potencia nominal de 5 kW y una eficiencia del 95%, lo que implica una pérdida energética del 5% durante los procesos de conversión.

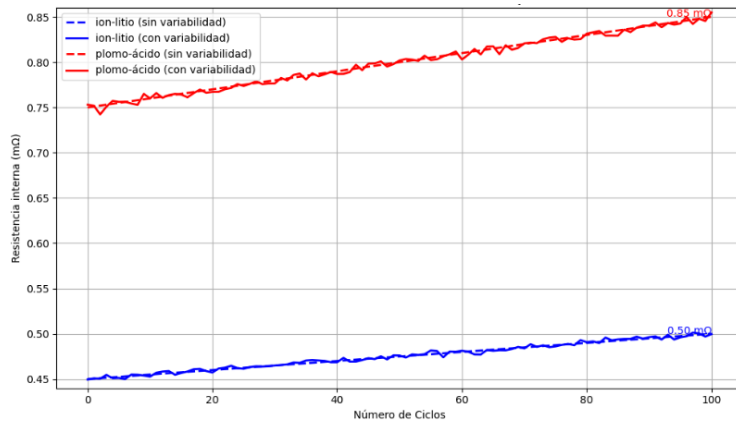
Tabla 2 Rendimiento promedio con y sin convertidor AC-DC.

Tipo de batería	Parámetro medido	Sin convertidor AC-DC	Con convertidor AC-DC	Diferencia
Ion-Litio	Eficiencia energía almacenada	95%	93%	-2%
	Eficiencia carga/descarga	90%	88%	-2%
	Resistencia interna (mΩ)	0.45	0.50	+0.05
Plomo-Ácido	Eficiencia energía almacenada	85%	82%	-3%
	Eficiencia carga/descarga	84%	80%	-4%
	Resistencia interna (mΩ)	0.75	0.80	+0.05

Fuente: elaboración propia.

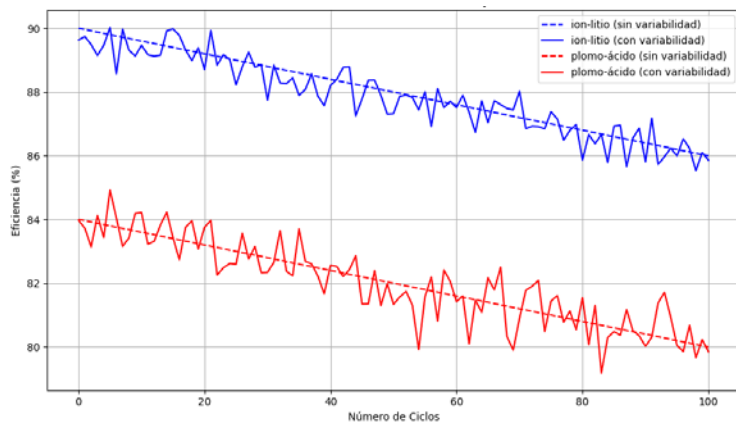
El sistema trabaja con un voltaje de entrada de 220 VAC y un voltaje de salida de 48 VDC, entregando una corriente nominal de salida de 100 ADC. Estas características permiten evaluar con precisión el impacto del convertidor en el rendimiento de las baterías. Los resultados obtenidos, en base a la Ecuación 2, muestran que la energía almacenada en las baterías de ion-litio sin el convertidor fue del 95%, mientras que con el convertidor se redujo al 93%. Para las baterías de plomo-ácido, la energía almacenada sin el convertidor fue del 85%, disminuyendo al 82% con el convertidor.

La Figura 2 y 3 presenta la evolución de dos parámetros clave: la resistencia interna y la eficiencia de carga y descarga de las baterías de ion-litio y plomo-ácido, con y sin variabilidad operativa. Los resultados se basan en las Ecuaciones 3, 5, y 6.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Evolución de la resistencia interna de las baterías (con y sin variabilidad).



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Evolución de la eficiencia de las baterías (con y sin variabilidad).

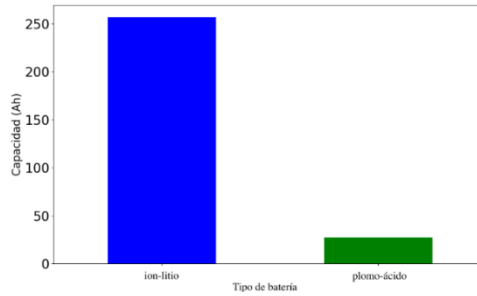
Se observa cómo la resistencia interna de las baterías aumenta progresivamente a lo largo del tiempo, según lo descrito en la Ecuación 3. Las simulaciones muestran que la resistencia interna de las baterías de plomo-ácido tiene un incremento más rápido, comenzando en  $0.75\text{ m}\Omega$  y aumentando en  $+0.1\text{ m}\Omega$  después de 100 ciclos, alcanzando los  $0.85\text{ m}\Omega$ . En comparación, las baterías de ion-litio comienzan en  $0.45\text{ m}\Omega$  y aumentan en  $+0.05\text{ m}\Omega$  después de 100 ciclos, alcanzando los  $0.50\text{ m}\Omega$ . Sin variabilidad, las baterías de ion-litio comienzan con una eficiencia del 90%, que disminuye gradualmente al 86% tras 100 ciclos cuando se introduce la variabilidad. Por su parte, las baterías de plomo-ácido presentan una mayor reducción en eficiencia, pasando del 84% inicial a 80% en condiciones de variabilidad.

En el escenario con variabilidad, tanto la resistencia interna como la eficiencia se ven afectadas por fluctuaciones aleatorias, simulando variaciones en las condiciones operativas. Estas fluctuaciones incluyen cambios en la demanda de energía, variaciones en la temperatura o degradación acelerada de los materiales internos de las baterías. La variabilidad en la resistencia interna se modeló utilizando una distribución normal aleatoria, lo que permite un análisis más realista del comportamiento de las baterías bajo condiciones de operación impredecibles.

### **Capacidad de almacenamiento**

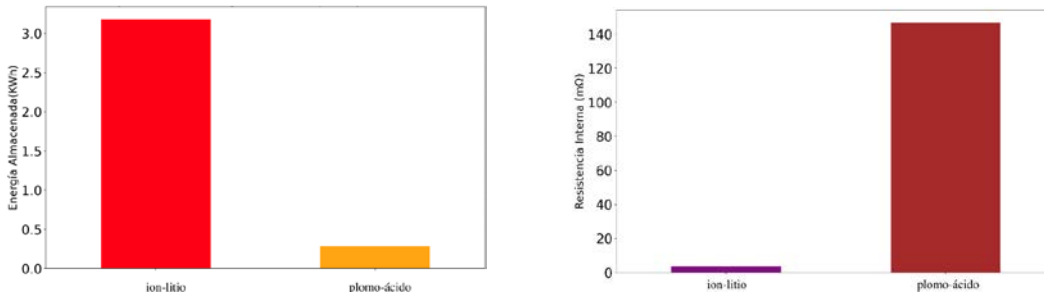
La capacidad amperios-hora ( $Ah$ ) y la energía almacenada kilowatt-hora ( $kWh$ ) son indicadores clave de la eficacia de una batería en términos de almacenamiento de energía a largo plazo. Considerando la Ecuación 4, el factor de degradación de la capacidad es  $\delta = 0.01$  para la batería de ion-litio y  $\delta = 0.02$  para la batería de plomo-ácido. La capacidad inicial de la batería de ion-litio es de  $200\text{ Ah}$ , mientras que la capacidad inicial de la batería de plomo-ácido es de  $150\text{ Ah}$ . A medida que avanza el tiempo, estas diferencias en la degradación se traducen en una mayor reducción de la capacidad para las baterías de plomo-ácido, Figura 4.

La Figura 5a muestra que las baterías de ion-litio tienen un promedio de  $3.0\text{ kWh}$ , mientras que las de plomo-ácido almacenan en promedio  $1.8\text{ kWh}$ . Esta diferencia en la capacidad y la energía almacenada subraya la importancia de las baterías de ion-litio para aplicaciones que requieren mayor capacidad de almacenamiento.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Comparación de la capacidad promedio de las baterías.



a) Comparación energía almacenada promedio.

b) Resistencia interna promedio.

Fuente: elaboración propia

Figura 5 Comparación de energía almacenada y resistencia interna promedio por batería.

De manera similar, las baterías de ion-litio mostraron una mayor capacidad energética promedio. Otra característica importante está asociada con la resistencia interna de la batería, la cual afecta directamente la eficiencia y el rendimiento de las baterías. A partir de la Ecuación 3, considerando una resistencia inicial de  $R_L(0) = 0.45 \text{ m}\Omega$  y una carga inicial de  $Q_L(0) = 200 \text{ Ah}$  para la batería de ion-litio, junto con una resistencia inicial de  $R_A(0) = 0.75 \text{ m}\Omega$  y una carga inicial de  $Q_A(0) = 150 \text{ Ah}$  para la batería de plomo-ácido, ambas sometidas a una temperatura de  $T = 298 \text{ K} = 25^\circ\text{C}$ , se observan diferencias significativas en la resistencia interna promedio entre ambos tipos de baterías, como se indica en la Tabla 3 y en la Figura 5b. Este fenómeno, claramente representado en la Figura 5b, muestra que las baterías de plomo-ácido presentan una resistencia interna promedio significativamente mayor en comparación con las de ion-litio, lo que implica potenciales pérdidas de energía más significativas durante el ciclo de vida de las baterías. Los resultados resaltan la importancia de considerar la resistencia interna al diseñar sistemas de almacenamiento energético que maximicen la eficiencia.

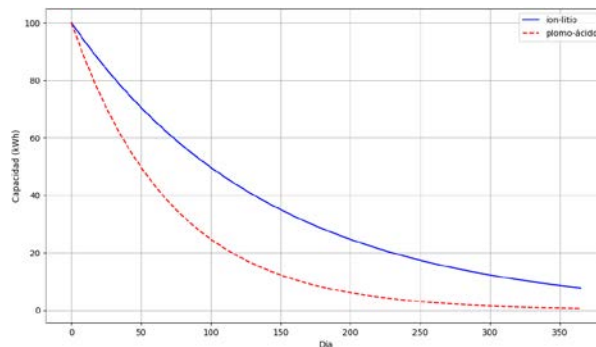
Tabla 3 Características promedio por tipo de batería.

Tipo de batería	Capacidad promedio (Ah)	Energía almacenada promedio (kWh)	Resistencia interna promedio (mΩ)
Ion-Litio	200	2.5	0.45
Plomo-Ácido	150	1.8	0.75

Fuente: elaboración propia.

### Análisis de durabilidad

Mediante la Ecuación 4, la simulación de un año de operación, con ciclos diarios de carga y descarga, reveló que las baterías de ion-litio mantuvieron aproximadamente el 93% de su capacidad original en kWh, mientras que las baterías de plomo-ácido descendieron hasta el 87% de su capacidad original en el mismo periodo. Como se observa en la Figura 6, la capacidad de las baterías de plomo-ácido disminuye a un ritmo más acelerado, lo que indica una vida útil más corta en comparación con las baterías de ion-litio. Este comportamiento sugiere que las baterías de ion-litio requieren reemplazos con menor frecuencia, lo que las hace más adecuadas para aplicaciones que demandan una durabilidad prolongada. En los primeros 100 días, las baterías de ion-litio mantienen alrededor del 98% de su capacidad original, mientras que las baterías de plomo-ácido ya han caído al 94%. Al finalizar el ciclo de 365 días, las baterías de ion-litio conservan aún un 93% de su capacidad, mientras que las de plomo-ácido están por debajo del 87%.



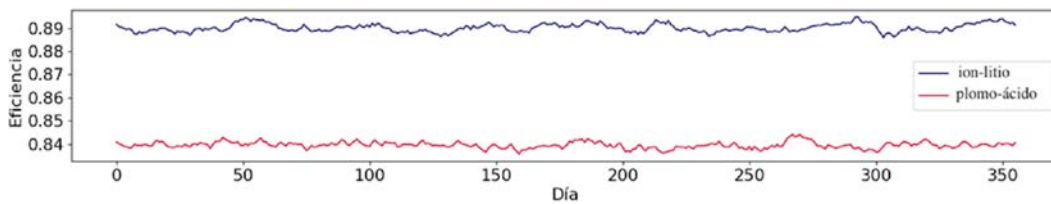
Fuente: elaboración propia

Figura 6 Durabilidad de las baterías tras un año de simulación.

### Eficiencia energética

Como se muestra en la Figura 7, la simulación del ciclo de vida revela un comportamiento valioso de las baterías de ion-litio y plomo-ácido bajo condiciones

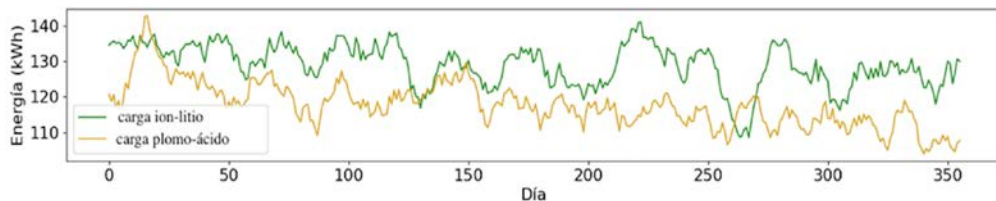
de uso continuo durante un año, evaluado según la Ecuación 5 y la Ecuación 6. Se consideraron factores como la capacidad restante inicial: 200 Ah para ion-litio y 150 Ah para plomo-ácido, así como la eficiencia de carga/descarga: 90% para ion-litio y 84% para plomo-ácido. Los resultados muestran una disminución gradual de la capacidad con el tiempo debido a la degradación natural, de acuerdo con las Ecuaciones 4 y 6. Las baterías de ion-litio conservaron un 93% de su capacidad original (186 Ah) tras 365 días, mientras que las baterías de plomo-ácido se mantuvieron por debajo del 87% (130.5 Ah).



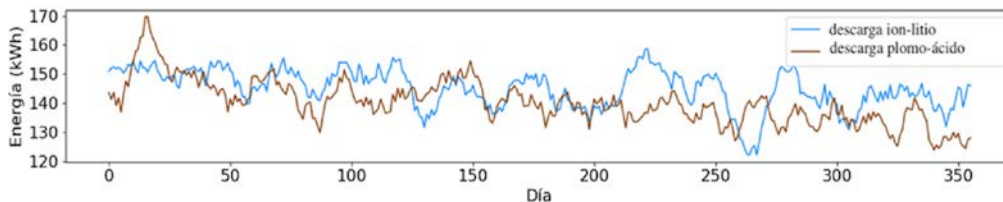
Fuente: elaboración propia

Figura 7 Comparación de la eficiencia media.

La eficiencia de carga y descarga mostró variaciones diarias debido a la influencia de la variabilidad en cada ciclo, Figura 8.



a) Energía de carga.



b) Energía de descarga.

Fuente: elaboración propia

Figura 8 Energía de carga y descarga en ambas baterías.

Las baterías de ion-litio presentaron una mayor eficiencia promedio, con una energía de carga diaria que varía entre 130 y 140 kWh, mientras que las de plomo-

ácido mostraron una energía de carga entre 110 y 125 *kWh*, reflejando una mayor estabilidad en las baterías de ion-litio. De manera similar, las baterías de ion-litio lograron una energía de descarga entre 140 y 170 *kWh*, mientras que las baterías de plomo-ácido tuvieron una energía de descarga entre 120 y 150 *kWh*. Estos valores fueron calculados utilizando las Ecuaciones 5 y 6, y reflejan cómo la energía cargada/descargada varía en función de la capacidad y la eficiencia.

#### **4. Discusión**

Las baterías de ion-litio han demostrado una capacidad significativamente mayor en comparación con las de plomo-ácido. Esta mayor capacidad se traduce en una mayor densidad energética, lo que es crucial para aplicaciones donde el espacio y el peso son limitantes. Además, la mayor eficiencia de carga y descarga observada en las baterías de ion-litio implica una mejor utilización de la energía almacenada, reduciendo las pérdidas y mejorando el rendimiento general del sistema. La eficiencia energética superior de las baterías de ion-litio también contribuye a una mayor sostenibilidad, ya que se requiere menos energía para alcanzar la misma capacidad de carga útil.

Las simulaciones mostraron que las baterías de plomo-ácido tienen una mayor resistencia interna en comparación con las de ion-litio. Una mayor resistencia interna resulta en mayores pérdidas de energía durante los procesos de carga y descarga, lo cual puede generar calor adicional y reducir la vida útil de la batería. Esta desventaja limita la eficiencia de las baterías de plomo-ácido, especialmente en aplicaciones de alta demanda energética.

Uno de los hallazgos más destacados es la superioridad de las baterías de ion-litio en términos de durabilidad. A lo largo de un año de simulaciones de ciclos de carga y descarga diarios, las baterías de ion-litio mantuvieron una mayor proporción de su capacidad original en comparación con las de plomo-ácido. Esta durabilidad se traduce en una menor frecuencia de reemplazo y, por ende, en una reducción de costos operativos y de mantenimiento a largo plazo. La menor tasa de degradación de las baterías de ion-litio las hace más adecuadas para aplicaciones donde la fiabilidad y la longevidad son esenciales.

Es importante señalar algunas limitaciones del estudio. Las simulaciones se realizaron bajo condiciones controladas que pueden no replicar todas las variables y desafíos encontrados en aplicaciones del mundo real. Además, el análisis se centró en parámetros específicos de rendimiento, por lo que futuros estudios podrían explorar otros factores como el impacto de temperaturas extremas, ciclos de carga/descarga rápida, y la integración con otras tecnologías de almacenamiento de energía. Las investigaciones futuras también podrían beneficiarse de estudios experimentales complementarios para validar los resultados de las simulaciones y proporcionar una comprensión más completa del rendimiento de las baterías en condiciones operativas diversas.

## **5. Conclusiones**

El presente estudio ha evaluado exhaustivamente el rendimiento de baterías de ion-litio y plomo-ácido, utilizando simulaciones detalladas para medir parámetros clave como la capacidad, eficiencia de carga y descarga, resistencia interna, y durabilidad. Las baterías de ion-litio demostraron un rendimiento superior en términos de capacidad de almacenamiento, eficiencia de carga y descarga, y durabilidad en comparación con las baterías de plomo-ácido. En cuanto al impacto del convertidor bidireccional AC-DC, este introduce pequeñas pérdidas energéticas durante el proceso de conversión, lo que afecta ligeramente la eficiencia de ambos tipos de baterías. Sin embargo, las baterías de ion-litio muestran menores pérdidas en comparación con las baterías de plomo-ácido, reforzando su idoneidad en aplicaciones donde la eficiencia operativa es clave. Este estudio abre la puerta a futuras investigaciones que consideren factores adicionales, como el impacto de temperaturas extremas, ciclos de carga/descarga rápida, y la integración en sistemas fotovoltaicos interconectados.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Alcaide-Godínez I., Bai F., & Castellanos R., (2022). Simulation based FFR Requirement Identification Approach for Battery Energy Storage System.

- 2022 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC) 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/iSPEC54162.2022>.
- [2] Bello, K. A., et al., (2024). Digital twin modeling for smart car battery. In 2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG) (pp. 1–9). Omu-Aran, Nigeria.  
<https://doi.org/10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629956>.
- [3] Chehab, M. H., Salah, C. B., Falama, R. Z., Tlija, M., y Rabhi, A., (2023). Comparative Analysis of Energy Storage Technologies for Microgrids. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 1–12.  
<https://doi.org/10.1155/2023/6679740>.
- [4] Chen T., Jin Y., Lv H., Yang A., Liu M., Chen B., Xie Y., y Chen Q., (2020). Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems. *Transactions of Tianjin University* 26(3) 208–217.  
<https://doi.org/10.1007/s12209-020-00236-w>.
- [5] Doe J., (2020). El futuro del almacenamiento de energía: Baterías de ion-litio vs. plomo-ácido. Primera edición. Editorial Energía Renovable, Ciudad de México, México. ISBN: 978-3-16-148410-0.
- [6] Hannan M. A., Wali S. B., Ker P. J., Rahman M. S. A., Mansor M., Ramachandaramurthy V. K., Muttaqi K. M., Mahlia T. M. I., y Dong Z. Y., (2021). Battery energy-storage system: A review of technologies optimization objectives constraints approaches and outstanding issues. *Journal of Energy Storage* 42 103023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103023>.
- [7] He, Z., Huang, Y., Liu, H., Geng, Z., Li, Y., Li, S., Deng, W., Zou, G., Hou, H., & Ji, X., (2024). Anode materials for fast-charging sodium-ion batteries. *Nano Energy*, 129(Part A), 109996. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109996>.
- [8] Khanahmadi, A., Mozaffarilegha, M., Manthouri, M., & Ghaffarpour, R., (2021). A novel economic method of battery modeling in stand-alone renewable energy systems to reduce life cycle costs. *Journal of Energy Storage*, 44(Part B), 103422. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103422>.
- [9] Ko, G., Jeong, S., Park, S., Lee, J., Kim, S., Shin, Y., Kim, W., & Kwon, K., (2023). Doping strategies for enhancing the performance of lithium nickel

- manganese cobalt oxide cathode materials in lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 60, 102840. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.102840>.
- [10] Naderi, M., Palmer, D., Smith, M. J., Ballantyne, E., Stone, D. A., Foster, M., Gladwin, D., Khazali, A., Al-Wreikat, Y., Cruden, A. J., y Fraser, E., (2024). Techno-Economic Planning of a Fully Renewable Energy-Based Autonomous Microgrid with Both Single and Hybrid Energy Storage Systems. *Energies*, 17(4), 788. <https://doi.org/10.3390/en17040788>.
- [11] Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G., (2015). Li-ion battery materials: Present and future. *Materials Today*, 18(5), 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>.
- [12] Njeh K., Zdiri M. A., Ben Ammar M., Rabhi A., y Ben Salem F., (2023). Energy Management of an Autonomous Photovoltaic System under Climatic Variations. *Engineering Technology and Applied Science Research* 13(1) 9849–9854. <https://doi.org/10.48084/etasr.5375>.
- [13] Makola, C., Le Roux, P. L., y Jordaan, J., (2023). Comparative Analysis of Lithium-Ion and Lead–Acid as Electrical Energy Storage Systems in a Grid-Tied Microgrid Application. *Applied Sciences*, 13(5), 3137. <https://doi.org/10.3390/app13053137>.
- [14] Walkowiak, S., Baraniak, M., Wachsmann, M., & Lota, G., (2024). Effect of absorptive glass mat soaking method on electrical properties of VRLA batteries. *Energy*, 296, 131124. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131124>.
- [15] Sarker, Md. T., Mohammed, H. S. M. H., Shern, S. J., Ramasamy, G., y Farid, F. A., (2024). Second-Life Electric Vehicle Batteries for Home Photovoltaic Systems: Transforming Energy Storage and Sustainability. *Energies*, 17(10), 2345. <https://doi.org/10.3390/en17102345>.
- [16] Scrosati B. , Garche J., (2016). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419-2430. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048>.
- [17] Shi, N., Chen, Z., Niu, M., He, Z., Wang, Y., y Cui, J., (2022). State-of-charge estimation for the lithium-ion battery based on adaptive extended Kalman filter

- using improved parameter identification. *Journal of Energy Storage* 45 103518. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103518>.
- [18] Solomon, M., (2016). Energy Storage Systems for Renewable Energy Integration. *Journal of Renewable Energy* 11(3) 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.030>.
- [19] Yudhistira, R., Khatiwada, D., y Sanchez, F., (2022). A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 131999. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131999>.
- [20] Zhang, Z., Ramadass, P., (2012). Lithium-Ion Battery Systems and Technology. In: Meyers, R.A. (eds) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3\\_663](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_663).
- [21] Zhao, Q., Xu, T., Liu, K., Du, H., Zhang, M., Wang, Y., Yang, L., Zhang, H., Wang, X., & Si, C., (2024). Biomass-based functional materials for rechargeable Zn-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 71, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103605>.