

EVALUACIÓN DOCUMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE BATERÍAS LI-ION APLICACIONES ENERGÉTICAS

Aarón Kalid Cortez Barajas¹, Jorge Alberto Cárdenas Magaña² Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula

Resumen - El objetivo de este estudio es analizar comparativamente las químicas de baterías de ion-litio LFP, NMC y NCA, considerando sus propiedades técnicas, mecanismos de degradación, estabilidad térmica, aplicaciones y presencia en el mercado global. Se empleó una metodología de revisión documental sistemática, que incluyó la selección, clasificación y comparación de información proveniente de literatura científica, tesis, informes técnicos y bases de datos especializadas. Los resultados muestran que la química LFP presenta mayor estabilidad térmica y ciclos de vida más prolongados, lo que la hace adecuada para sistemas de almacenamiento estacionario y aplicaciones donde la seguridad es prioritaria. En contraste, las químicas NMC y NCA ofrecen mayores densidades energéticas y mejor relación peso-energía, características que favorecen su uso en movilidad eléctrica y dispositivos portátiles, aunque con mayor sensibilidad a la degradación térmica. Asimismo, el análisis de fabricantes evidencia una distribución tecnológica influenciada por factores industriales y regionales: China lidera la producción de LFP, mientras que Corea del Sur, Japón y Estados Unidos predominan en el desarrollo de NMC y NCA. En conjunto, los hallazgos confirman que la elección óptima de una química de batería depende del equilibrio entre seguridad, densidad energética, vida útil y aplicación final, proporcionando un marco de referencia útil para estudiantes, técnicos y profesionales del sector energético.

Palabras clave: realidad aumentada, educación, herramientas digitales, aprendizaje, innovación pedagógica

Abstract- The objective of this study is to conduct a comparative analysis of the lithium-ion battery chemistries LFP, NMC, and NCA, focusing on their technical properties, degradation mechanisms, thermal stability, applications, and global market presence. A systematic documentary review methodology was applied, which included the selection, classification, and comparison of information from scientific literature, theses, technical reports, and specialized databases. The results show that LFP exhibits greater thermal stability and longer cycle life, making it suitable for stationary energy storage systems and applications where safety is a priority.

Documento enviado el 26 de noviembre de 2025.

Autores: 1. Aarón Kalid Cortez Barajas, estudiante afiliado al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. Tamazula de Gordiano, Jalisco, 49650. correo: tm220110395@tamazula.tecmm.edu.mx

2. Jorge Alberto Cárdenas Magaña, profesor investigador afiliado al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Tamazula. Tamazula de Gordiano, Jalisco, 49650. correo: Jorge.cardenas@tamazula.tecmm.edu.mx

In contrast, NMC and NCA offer higher energy densities and improved energy-to-weight ratios, characteristics that favor their use in electric mobility and portable devices, although they present greater sensitivity to thermal degradation. Additionally, the analysis of manufacturers reveals a technological distribution influenced by industrial and regional factors: China leads the production of LFP, while South Korea, Japan, and the United States dominate the development of NMC and NCA. Overall, the findings confirm that the optimal selection of a battery chemistry depends on the balance between safety, energy density, lifespan, and final application, providing a useful reference framework for students, technicians, and professionals in the energy sector.

Keywords: Lithium-ion batteries, Energy storage systems, LFP, NMC, NCA, Energy management, Electrochemical battery behavior

I. INTRODUCCIÓN

La transición hacia sistemas energéticos más sostenibles ha impulsado una rápida expansión de tecnologías basadas en energías renovables. No obstante, la intermitencia de fuentes como la solar y la eólica sigue representando un desafío para garantizar estabilidad, continuidad y eficiencia en la red eléctrica. En este escenario, los sistemas de almacenamiento de energía se convierten en componentes esenciales para equilibrar la oferta y la demanda. Según Jabbar et al. (2024), el avance de estos sistemas ha fortalecido modelos energéticos más inteligentes y flexibles, mientras que Kwade et al. (2023) destacan que las baterías de iones de litio son actualmente la solución más madura y ampliamente implementada.

El crecimiento acelerado de la demanda ha incrementado el interés por comprender las diferencias entre las principales químicas utilizadas en la fabricación de baterías Li-ion, particularmente LFP (litio-ferrofosfato), NMC (níquel-manganeso-cobalto) y NCA (níquel-cobalto-aluminio). Cada una de estas variantes presenta características propias en términos de densidad energética, estabilidad térmica, ciclos de vida, costos de fabricación y niveles de seguridad. Sin embargo, para usuarios, estudiantes o incluso responsables de la toma de decisiones, no siempre es evidente cuál alternativa resulta más adecuada para una aplicación específica, lo que justifica la necesidad de una comparación clara y fundamentada.

En este trabajo se desarrolla una revisión documental comparativa, con el propósito de identificar las ventajas, limitaciones y criterios técnicos que influyen en la selección de baterías Li-ion en función de su uso final. Para ello se recopiló y analizó información proveniente de literatura científica, informes técnicos, bases de datos de fabricantes y artículos recientes relacionados con tecnologías de almacenamiento. El análisis se centra en parámetros clave como densidad energética, vida útil, mecanismos de degradación, seguridad operativa y aplicaciones prácticas de cada química. Este estudio busca ofrecer una visión sólida y accesible sobre el comportamiento de las principales variantes de baterías de iones de litio, con el fin de apoyar procesos de aprendizaje, diseño y toma de decisiones dentro del ámbito de la ingeniería electromecánica. La estructura del documento se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 describe la metodología empleada; la Sección 3 presenta los resultados comparativos; la Sección 4 discute los principales hallazgos; y la Sección 5 expone las conclusiones generales del análisis.

II. ESTADO DEL ARTE

El almacenamiento de energía eléctrica se ha convertido en un componente estratégico para la integración masiva de fuentes renovables y la mejora de la calidad del suministro. Berenguer et al. analizan de forma general los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, destacando los retos históricos asociados a la conversión y conservación de la electricidad y la importancia de contar con tecnologías eficientes y confiables en este ámbito. De manera complementaria, Gil Ortega describe el funcionamiento básico de las celdas electroquímicas y el concepto de estado de carga, ofreciendo una visión introductoria sobre el cuidado y operación de las baterías de ion-litio en aplicaciones cotidianas. En la misma línea, Quintero (2021) presenta una síntesis de las características y aplicaciones de las baterías de ion-litio, subrayando su alta densidad energética, eficiencia y larga vida útil en comparación con otras tecnologías convencionales.

En el contexto de las energías renovables, Ceja Espinosa (2017) modela y analiza un arreglo fotovoltaico con inclusión de almacenamiento basado en baterías, mostrando cómo la incorporación de bancos de ion-litio contribuye a suavizar la intermitencia de la potencia generada mediante estrategias de control como el seguimiento del punto de máxima potencia y el uso de filtros para el suavizado de potencia. A nivel de revisión tecnológica, Ayabaca Landi et al. (2024) comparan las baterías de ion-litio con otras alternativas emergentes de almacenamiento, como sistemas térmicos e hidrógeno, evidenciando que, si bien las baterías dominan el mercado por su desempeño, las soluciones alternativas ofrecen ventajas en escalabilidad y sostenibilidad ambiental. Por su parte, Olfer (2024) discute los desafíos que enfrentan los sistemas de almacenamiento en el marco de redes inteligentes, resaltando la necesidad de una gestión más precisa de la energía, hardware especializado y esquemas de control que permitan integrar grandes volúmenes de recursos renovables sin comprometer la estabilidad del sistema. Desde una perspectiva regulatoria y económica, Llorens Allendes (2023) evalúa el impacto económico de restringir la capacidad de energía de los sistemas de almacenamiento cuando son considerados como activos de transmisión, mostrando cómo

las decisiones normativas influyen en la expansión y rentabilidad de los BESS a largo plazo.

En relación con el comportamiento interno y la degradación de las baterías, Pico et al. (2021) analizan cuantitativamente los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante un modelo teórico validado en laboratorio. Su estudio muestra la influencia de la temperatura, las tasas de carga/descarga y la profundidad de descarga en la vida útil, apoyándose en simulaciones en Matlab-Simulink contrastadas con datos experimentales. De forma complementaria, Fuenzalida Ramírez et al. (2014) realizan un análisis térmico detallado de bancos de baterías de ion-litio, evidenciando que variables como el espaciado entre celdas, la disposición geométrica y el caudal de refrigeración condicionan tanto el aumento de temperatura como la eficiencia global del sistema. A nivel de química avanzada, del Valle (2023) estudia baterías NMC/Si-Gr de próxima generación, identificando los mecanismos de degradación relacionados con las deformaciones del ánodo de silicio y proponiendo metodologías de carga que optimizan el compromiso entre tiempo de recarga y vida cíclica. En paralelo, Moore et al. (2024) desarrollan una herramienta de diseño para sistemas híbridos batería/supercondensador basada en un modelo físico-electroquímico de degradación (BaSiS), lo que permite evaluar el impacto de diferentes perfiles de operación sobre el envejecimiento y apoyar decisiones de diseño orientadas a la confiabilidad y la estabilidad de la red.

La gestión y diagnóstico de los sistemas de almacenamiento también ha sido objeto de atención específica. Rosero García et al. (2022) proponen una metodología para evaluar la condición de sistemas de almacenamiento con baterías (BESS) mediante indicadores clave de desempeño (KPIs), integrados en una herramienta computacional denominada RENOBAT. Esta propuesta permite a empresas y operadores monitorear el estado del sistema a lo largo de su ciclo de vida y tomar decisiones informadas sobre operación, mantenimiento y reemplazo. En el ámbito del sistema de gestión de baterías (BMS), de la Vega et al. (2025) comparan tres algoritmos de balanceo pasivo de celdas NMC en una batería de ion-litio configurada 14S1P, analizando su impacto en la capacidad utilizable, el nivel de balanceo y la energía disipada por ecualización. Sus resultados aportan criterios concretos para seleccionar estrategias de balanceo en aplicaciones como vehículos eléctricos. Finalmente, el cierre del ciclo de vida de las baterías de ion-litio ha motivado investigaciones orientadas al reciclaje y la recuperación de materiales críticos. Morina et al. (2024) plantean una experiencia de laboratorio centrada en el reciclaje de cátodos LiCoO₂, comparando procesos de lixiviación ácida con ácidos inorgánicos y orgánicos, y evaluando no solo el rendimiento de recuperación de metales críticos, sino también aspectos de costo, seguridad y gestión de residuos dentro de un enfoque de economía circular. En la misma línea, Porcel Padilla analiza la recuperación de litio a partir de baterías fuera de servicio, resaltando la importancia del reciclaje para disminuir la presión sobre los yacimientos primarios, mitigar impactos socioambientales y cerrar el ciclo de los materiales mediante procesos como el intercambio iónico y la adsorción con zeolitas. Estas contribuciones se articulan con los trabajos de revisión más amplios que señalan la necesidad de consolidar cadenas de valor circulares para las baterías de

ion-litio y fortalecer la regulación en torno a su recolección, tratamiento y segundo uso.

En conjunto, estos estudios muestran un panorama en el que las baterías de ion-litio se posicionan como la tecnología de referencia para el almacenamiento de energía, pero también evidencian desafíos relevantes en términos de degradación, gestión térmica, monitoreo de condición, integración económica en la red y sostenibilidad ambiental. El trabajo propuesto por el estudiante se inserta en este contexto, buscando aportar en el análisis y evaluación de sistemas de almacenamiento basados en baterías de ion-litio, apoyándose en modelos, metodologías de diagnóstico y consideraciones de ciclo de vida previamente reportadas en la literatura, pero adaptándolas a su caso de estudio específico.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló mediante una revisión documental comparativa orientada a analizar las características técnicas, ventajas y limitaciones de las principales químicas de baterías de ion-litio empleadas en aplicaciones energéticas, específicamente LFP, NMC y NCA. El objetivo metodológico fue recopilar, organizar y comparar información proveniente de fuentes confiables para identificar criterios que permitan seleccionar la química más adecuada según la aplicación.

1. Tipo de investigación. La investigación se clasifica como documental y descriptiva, ya que se basa en la recopilación sistemática de información disponible en literatura científica, informes técnicos, fichas de fabricantes y documentos institucionales. No se realizaron experimentos de laboratorio ni pruebas físicas en celdas; el análisis se centró exclusivamente en datos reportados por estudios previos y fabricantes reconocidos.

2 Procedimiento de búsqueda y recolección de información. La búsqueda de información se llevó a cabo entre enero y octubre de 2024 en bases de datos digitales y repositorios especializados. Se consultaron artículos, revisiones, informes técnicos, tesis y documentos institucionales. Las principales fuentes incluyeron:

- Bases de datos científicas: **IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Scopus, Google Scholar.**
- Información de fabricantes: **CATL, BYD, LG Chem, Panasonic, Samsung Energy, Tesla.**
- Informes y análisis sectoriales: **IEA, NREL, Fraunhofer ISE.**

Se utilizaron combinaciones de palabras clave como: “lithium-ion batteries”, “LFP”, “NMC”, “NCA”, “battery degradation”, “energy storage systems”, “battery cycle life”, “thermal stability”, “electrochemical performance”.

3. Criterios de inclusión y exclusión. Para asegurar la relevancia y la calidad de la información analizada, se establecieron criterios específicos de selección de fuentes. Se incluyeron documentos publicados entre 2014 y 2024 que presentaran datos cuantitativos sobre ciclo de vida, densidad energética, rendimiento térmico o mecanismos de degradación, así como publicaciones que describieran con

claridad la química de las baterías evaluadas e informes oficiales o fichas técnicas de fabricantes con información verificable. Por el contrario, se excluyeron trabajos sin fuente confiable, documentos con información incompleta o insuficiente, publicaciones que no especificaran el tipo de celda o los parámetros de operación, y material divulgativo que careciera de sustento técnico.

4 Organización y análisis de la información. Una vez recopilados los documentos, la información se organizó en cinco categorías principales: características electroquímicas incluyendo materiales de cátodo, estructura cristalina y densidad energética; ciclo de vida y mecanismos de degradación como profundidad de descarga, temperatura y tasas de carga y descarga; estabilidad térmica y seguridad considerando riesgo de fuga térmica y comportamiento ante sobrecargas; aplicaciones recomendadas vehículos eléctricos, almacenamiento estacionario y dispositivos portátiles; y fabricantes junto con tendencias del mercado, relacionadas con producción global y evolución tecnológica. El análisis comparativo se efectuó identificando patrones, rangos de valores recurrentes, coincidencias entre estudios y diferencias relevantes entre las químicas evaluadas. Para ello se elaboraron tablas comparativas y descripciones sintéticas basadas en los parámetros reportados en la literatura especializada.

3.5 Síntesis del procedimiento metodológico. El desarrollo metodológico del estudio se estructuró en cinco etapas consecutivas. En primer lugar, se realizó una revisión documental sistemática que incluyó la búsqueda de literatura científica, informes técnicos y fichas de fabricantes en diversas bases de datos académicas. Posteriormente, se llevó a cabo la selección y clasificación de la información con base en criterios de inclusión previamente definidos, organizando los documentos conforme a variables como densidad energética, ciclos de vida, estabilidad térmica, mecanismos de degradación y aplicaciones típicas. En la tercera etapa se efectuó la extracción y organización de los datos relevantes reportados en las fuentes seleccionadas, generando un registro comparativo de parámetros clave. La cuarta etapa consistió en un análisis estructurado que permitió identificar tendencias, diferencias y coincidencias entre las químicas LFP, NMC y NCA. Finalmente, se integró toda la información en una síntesis interpretativa mediante tablas, descripciones comparativas y gráficos que facilitan la comprensión de los resultados y permiten evaluar de manera fundamentada el comportamiento de cada química. Este proceso garantiza la validez del análisis y proporciona una base sólida para la comparación de las tecnologías de baterías de ion-litio en aplicaciones modernas de almacenamiento de energía.

El diagrama de la figura 1 representa las cinco etapas empleadas en el estudio: (1) revisión documental sistemática, (2) selección y clasificación de la información, (3) extracción y organización de datos, (4) análisis comparativo para identificar tendencias y diferencias entre las químicas LFP, NMC y NCA, y (5) síntesis e integración de resultados mediante tablas, descripciones y representaciones gráficas.



Figura 1. Diagrama metodológico del proceso de revisión documental comparativa.

IV. RESULTADOS

El análisis documental permitió comparar de manera estructurada las propiedades técnicas más relevantes de las químicas LFP, NMC y NCA empleadas en sistemas de almacenamiento de energía. Los resultados se organizaron según los parámetros clave identificados durante la revisión: densidad energética, vida útil, estabilidad térmica, mecanismos de degradación y aplicaciones típicas. Esta organización facilitó la identificación de los patrones más consistentes entre los estudios analizados y permitió establecer criterios comparativos entre las tres tecnologías.

1 Comparación técnica general de las químicas. Los documentos revisados coinciden en que las químicas NMC y NCA presentan mayores densidades energéticas en comparación con LFP. Los valores reportados muestran que la química LFP se sitúa generalmente en rangos medios, adecuados para aplicaciones estacionarias y sistemas donde el espacio no es una limitante crítica. Por su parte, NMC y NCA alcanzan densidades energéticas superiores que favorecen su uso en aplicaciones de movilidad eléctrica y dispositivos portátiles. Esta diferencia energética se asocia con la composición química del cátodo y con la mayor capacidad específica de los materiales ricos en níquel. La figura 2 muestra los valores de densidad reportados en la literatura.

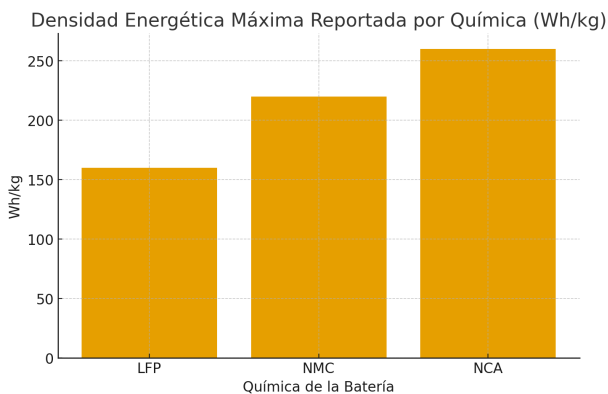


Figura 2. Gráfica comparativa de densidad energética de las químicas LFP, NMC y NCA.

La gráfica muestra que las químicas NMC y NCA presentan los valores de densidad energética más altos, mientras que LFP se mantiene en rangos intermedios. Esta diferencia

permite identificar la idoneidad de NMC y NCA para aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos, tales como vehículos eléctricos y dispositivos portátiles.

La Tabla 1 presenta una comparación técnica integral de las químicas LFP, NMC y NCA, incluyendo parámetros fundamentales como voltaje nominal, densidad energética, ciclos de vida, temperatura de operación, aplicaciones típicas y características operativas. Esta síntesis permite identificar de manera clara las diferencias estructurales y funcionales entre cada tipo de batería, proporcionando una base sólida para el análisis detallado presentado en las siguientes subsecciones.

Tabla 1. Comparación técnica de los tres tipos principales de baterías de ion-litio.

Tipo	Química	Voltaje nominal	Densidad energética	Ciclos de vida	Temperatura de operación	Aplicaciones	Ventajas
LFP (LiFeO ₄)	LiFePO ₄	3,2–3,3	90–160	3.000–10.000	–20 ta 60 °C	Alta seguridad y larga vida	Menor energía
NMC (LiNiMnCoO ₂)	Níquel–Mangan–Cobalto	3,6–3,7	150–220	1.000–3.000	–20 ta 55 °C	Balanceado de energía y rendimiento	Riesgo de incendio
NCA (LiNiCoAlO ₂)	Níquel–Cobalto–Aluminio	3,6–3,7	200–260	1.000–2.000	–20 ta 55 °C	Alta densidad de energía	Alta estabilidad térmica

2. Ciclos de vida y degradación. Los estudios coinciden en que la química LFP destaca por su vida útil prolongada, especialmente bajo perfiles de uso profundo y repetitivo. Se reporta que LFP mantiene una alta estabilidad estructural y menor degradación por efecto de temperatura y profundidad de descarga. En contraste, las químicas NMC y NCA, aunque eficientes energéticamente, presentan mayor sensibilidad a condiciones exigentes, particularmente a temperaturas elevadas y altas tasas de carga y descarga. Los estudios consultados atribuyen esta degradación acelerada a inestabilidades en la estructura del cátodo y a reacciones parasitarias que afectan la integridad del electrolito.

La Figura 3 presenta los rangos típicos de ciclos de vida reportados para cada química. El análisis muestra que LFP es la química con mayor durabilidad, alcanzando entre 3,000 y 10,000 ciclos antes de una degradación significativa. NMC se sitúa en rangos intermedios, entre 1,000 y 3,000 ciclos, mientras que NCA presenta un comportamiento más limitado, con valores entre 1,000 y 2,000 ciclos. Estas diferencias se explican por la estabilidad estructural del material LFP, que reduce la degradación por efecto de temperatura y profundidad de descarga, en contraste con las químicas ricas en níquel, que muestran mayor susceptibilidad a reacciones parasitarias y expansión estructural del cátodo.

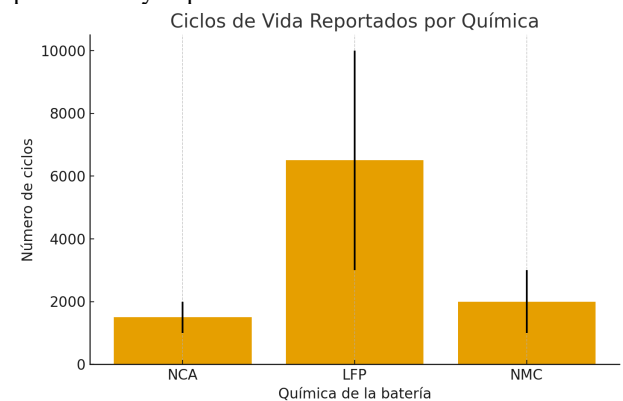


Figura 3. Ciclos de vida reportados para las químicas NCA, LFP y NMC.

La gráfica muestra los rangos típicos de ciclos de vida reportados en la literatura para cada química. LFP presenta la

mayor durabilidad (3,000–10,000 ciclos), mientras que NMC se ubica en rangos intermedios (1,000–3,000 ciclos) y NCA en el rango más bajo (1,000–2,000 ciclos), lo cual coincide con sus características estructurales y mecanismos de degradación.

3. Estabilidad térmica y seguridad. En cuanto a seguridad, LFP es consistentemente identificada como la química más estable. Su estructura cristalina reduce el riesgo de fuga térmica, incluso bajo sobrecarga o impactos. Las químicas NMC y NCA requieren sistemas de gestión térmica más estrictos debido a su mayor susceptibilidad a la degradación térmica y al comportamiento menos estable del cátodo en condiciones extremas. Esta diferencia es uno de los factores determinantes en su selección para aplicaciones estacionarias o móviles.

4. Aplicaciones recomendadas. Los resultados permiten establecer una relación directa entre las características técnicas de cada química y sus aplicaciones más adecuadas. LFP se recomienda principalmente para sistemas estacionarios, almacenamiento residencial, microrredes y aplicaciones donde la seguridad y la vida útil son prioritarias. NMC y NCA, por su mayor densidad energética, se orientan hacia vehículos eléctricos, herramientas industriales y dispositivos portátiles. Las decisiones de fabricantes también respaldan esta tendencia: empresas asiáticas como CATL y BYD impulsan fuertemente LFP para ESS, mientras que fabricantes como LG, Panasonic y Tesla continúan optimizando NMC y NCA en el sector automotriz. La tabla 2 muestra esas aplicaciones típicas.

Tabla 2. Aplicaciones típicas de las químicas LFP, NMC y NCA según la literatura consultada.

Química	Aplicaciones típicas
LFP	Sistemas estacionarios. Almacenamiento residencial. Microrredes. Dispositivos portátiles
NMC	Vehículos eléctricos. Microrredes. Herramientas industriales. Dispositivos portátiles
NCA	Vehículos eléctricos. Microrredes. Aeroespacial. Dispositivos portátiles

5. Fabricantes y tendencias del mercado. El análisis de la información recopilada permitió identificar la distribución global de fabricantes de baterías de ion-litio, así como las químicas predominantes en cada región. La Tabla 3 presenta una síntesis de los principales fabricantes de baterías de ion-litio a nivel mundial, junto con los tipos de baterías que producen, sus aplicaciones predominantes y características destacadas. Esta información permite contextualizar la distribución del mercado y comprender cómo las decisiones tecnológicas de cada fabricante se alinean con sectores específicos, como almacenamiento estacionario, movilidad eléctrica o aplicaciones industriales.

Tabla 3. Mayores fabricantes de baterías.

Fabricante	País	Tipo(s) de baterías	Aplicaciones	Características destacadas
CATL (Contemporary Amperex Technology Co. Ltd.)	China	LFP, NMC	ESS, vehículos eléctricos, ev	Líder mundial en volumen
			ESS, automotriz, residencial	Pionera en sistemas Blade Battery
BYD	China	NMC, NCA	ESS, automotriz, residencial	Alta densidad y eficiencia
LG Energy Solution	Corea del Sur	NMC, LFP	ESS industriales	Alta densidad y fiable
Parasung SDI	Japón	NMC, LFP	Tesla, ESS	Fuerte resiliencia en largas
Tesla Energy	EE. UU.	LFP	Integración ESS con red	Integración control digital
Siemens Energy	China	LFP	ESS y industrialidad	Fuerte crecimiento en alta escala

La Figura 4 muestra que China concentra el mayor número de productores, seguida por Corea del Sur y Japón, mientras que Estados Unidos y Alemania presentan una participación menor pero estratégica en sectores como la movilidad eléctrica y aplicaciones de alto desempeño.

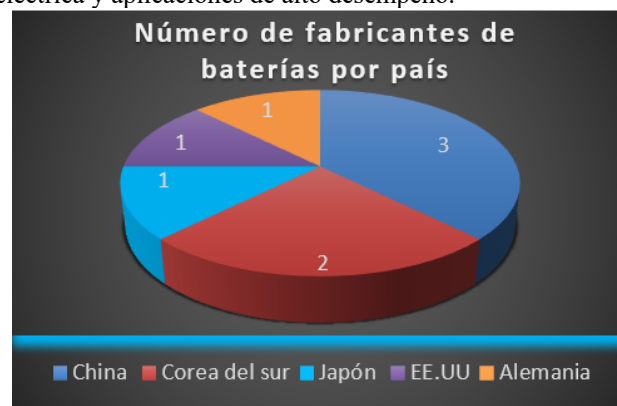


Figura 4. Número de fabricantes de baterías por país.

Asimismo, la Figura 5 presenta la distribución de químicas fabricadas por país, destacándose una fuerte presencia de LFP en China, mientras que Corea del Sur y Japón mantienen una mayor producción de celdas NMC y NCA. Esta distribución refleja decisiones industriales basadas en costos, densidad energética, seguridad y proyección de mercado en los sectores automotriz y estacionario.

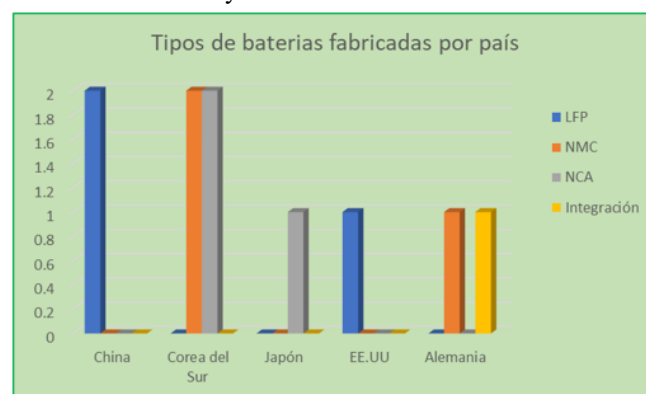


Figura 5. Tipos de baterías fabricadas por país.

V. DISCUSIÓN

El análisis documental permitió comparar de manera Los resultados obtenidos muestran diferencias claras entre las químicas LFP, NMC y NCA, tanto en su comportamiento electroquímico como en su presencia industrial. Estas diferencias no solo confirman lo reportado en la literatura,

sino que además permiten comprender por qué cada química se ha posicionado en sectores específicos del mercado.

En primer lugar, los rangos de densidad energética y ciclos de vida confirman que LFP ofrece la mayor estabilidad y durabilidad, mientras que NMC y NCA destacan por su mayor capacidad energética. Este comportamiento coincide con los mecanismos de degradación reportados en estudios recientes, donde LFP presenta menor susceptibilidad a altas temperaturas y profundidades de descarga elevadas, en contraste con las químicas ricas en níquel, cuya estructura cristalina tiende a degradarse con mayor rapidez. De esta forma, la superioridad de LFP en términos de vida útil no es simplemente un dato aislado, sino una consecuencia directa de su composición y estabilidad térmica.

Por otro lado, las gráficas sobre fabricantes y distribución por país evidencian que la disponibilidad y adopción tecnológica no dependen únicamente del desempeño electroquímico. China domina la producción global de LFP, lo que ha impulsado su uso masivo en ESS y aplicaciones de movilidad eléctrica de gama media. Corea del Sur y Japón, por su parte, continúan impulsando el desarrollo de celdas NMC y NCA, en línea con las necesidades de su industria automotriz y electrónica, donde la densidad energética es un factor crítico para autonomía y reducción de peso. Esta distribución refleja cómo las decisiones industriales y económicas influyen directamente en la selección tecnológica.

Asimismo, la comparación de ventajas y desventajas entre químicas muestra que la elección óptima depende del contexto operativo. LFP es superior en seguridad y vida útil, pero presenta menor densidad energética; NMC ofrece un equilibrio atractivo para vehículos eléctricos y sistemas industriales; mientras que NCA es especialmente útil en aplicaciones de alto rendimiento, como automóviles premium o equipos que requieren gran energía por unidad de masa. Esta diferenciación confirma que no existe una “mejor” química en términos absolutos, sino configuraciones más adecuadas dependiendo de las demandas del sistema.

Finalmente, el análisis integrado sugiere que las tendencias actuales del sector avanzan hacia una especialización tecnológica, donde LFP gana terreno en sistemas estacionarios y movilidad urbana, mientras que NMC y NCA continúan dominando el ámbito automotriz de mayor autonomía. Las decisiones regulatorias, la disponibilidad de materiales críticos, los costos de producción y la infraestructura industrial son factores que seguirán moldeando esta distribución en los próximos años.

En conjunto, la discusión confirma que la selección de una química de batería debe basarse en criterios técnicos, operativos y estratégicos, analizados en conjunto, y no únicamente en un parámetro aislado. Este estudio documental ofrece una base sólida para que estudiantes, técnicos y tomadores de decisiones comprendan las implicaciones técnicas y comerciales de cada alternativa.

VI. CONCLUSIONES

El análisis comparativo realizado permitió identificar diferencias técnicas y operativas significativas entre las químicas de baterías de ion-litio LFP, NMC y NCA. Los resultados muestran que LFP ofrece la mayor estabilidad térmica y el ciclo de vida más prolongado, lo que la posiciona como la opción más adecuada para sistemas estacionarios,

almacenamiento residencial y aplicaciones donde la seguridad y la durabilidad son prioritarias. En contraste, NMC y NCA presentan densidades energéticas superiores y un mejor desempeño en aplicaciones que requieren mayor autonomía y menor peso, como vehículos eléctricos y dispositivos portátiles, aunque con una mayor sensibilidad a la degradación térmica.

La revisión de fabricantes y tendencias de mercado evidencia que la disponibilidad y adopción de cada química están fuertemente influenciadas por factores industriales y estratégicos. China continúa liderando la producción de LFP, mientras que Corea del Sur, Japón y Estados Unidos mantienen un enfoque predominante hacia tecnologías NMC y NCA. Estas decisiones manufactureras reflejan prioridades específicas de cada región, alineadas con sus sectores productivos y tecnologías emergentes.

En conjunto, los hallazgos del estudio confirman que no existe una química universalmente superior; la selección debe basarse en las necesidades técnicas de la aplicación final, considerando aspectos como seguridad, costo, densidad energética, condiciones de operación y expectativas de vida útil. Este trabajo proporciona un marco comparativo sólido que puede servir como referencia para estudiantes, profesionales y desarrolladores interesados en la evaluación y selección de tecnologías de almacenamiento de energía basadas en baterías de ion-litio.

VII. AGRADECIMIENTOS

Extiendo un sincero reconocimiento al Dr. Jorge Alberto Cárdenas Magaña por su acompañamiento durante el desarrollo de la materia Taller de Investigación II. Su experiencia en el área de investigación y su orientación constante fueron fundamentales para definir el enfoque y la estructura de este análisis. Agradezco también el tiempo dedicado a la revisión y retroalimentación del trabajo, así como la guía que contribuyó a transformar un tema de interés en un documento académico formal.

VIII. REFERENCIAS

1. Acuña Landi, D. S., Arequipa Quishpe, E. R., Espinoza González, J. E., & Naranjo Cruz, J. J. (2024). *Almacenamiento de energía en sistemas renovables: Baterías versus alternativas emergentes*. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(5\)467](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(5)467)
2. Allendes, L. E. (2023). *Determinación del impacto económico de restringir la capacidad de energía en sistemas de almacenamiento definidos como activos de transmisión*. <https://doi.org/10.71700/dspace-memorias/65>
3. Alonso del Valle, J. (2023). *Baterías avanzadas de litio-ion con ánodo de grafito/silicio: Caracterización y propuesta de metodologías de carga* [Tesis doctoral, Universidad de Oviedo]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=326781>
4. Ayabaca Landi, D. S., Arequipa Quishpe, E. R., Espinoza González, J. E., & Naranjo Cruz, J. J. (2024). *Almacenamiento de energía en sistemas renovables: Baterías versus alternativas emergentes*. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(5\)467](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(5)467)
5. Berenguer, J. J., Galceran Arellano, S., & Villafáfila Robles, R. (s. f.). *Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2940486>
6. Brugnetti, R., Pianta, N., Binetti, S. O., & Ferrara, C. (2024). El reciclaje de baterías de iones de litio LiCoO₂: Equilibrio entre sostenibilidad y eficiencia. *ERIC*. <https://eric.ed.gov/?id=EJ1460223>
7. Ceja Espinosa, C. (2017). *Modelado y análisis de generación fotovoltaica con inclusión de almacenamiento de energía basado en baterías* [Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
8. De la Vega, R., Lamperti, A., Rossi, S., Spina, M., & Leegstra, R. (2025). Propuesta y comparación de algoritmos de balanceo pasivo de celdas NMC para una batería de iones de litio. *Revista Politécnica*, 55(1). <https://doi.org/10.33333/rp.vol55n1.08>
9. Fuenzalida Ramírez, S. E., Calderón Muñoz, W., Orchard Concha, M., & Reyes Marambio, J. (2014). *Análisis térmico de sistemas de*

almacenamiento energético basados en baterías de ion-litio. Universidad de Chile.

10. Gil Ortega, M. de los R. (2023). *Baterías de iones de litio*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9676257>
11. Moore, P., Alimi, O. A., & Abu-Siada, A. (2024). A design tool for battery/supercapacitor hybrid energy storage systems based on the physical-electrochemical degradation battery model BaSiS. *Energies*, 17(14), 3481. <https://doi.org/10.3390/en17143481>
12. Pico, H., Pazmiño, I., & Ponce, B. (2021). Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio. *Revista Energía*, 17(2). <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.432>
13. Porcel Padilla, A. M. (2024). *Recuperación del litio de las baterías de ion litio*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10097900>
14. Quintero, V. (2021). *Baterías de ion litio: Características y aplicaciones*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9486798>
15. Quintero, V., Che, O., Ching, E., Auciello, O., & De Obaldía, E. (s. f.). *Baterías de ion litio: Características y aplicaciones*. <https://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/339/3392002003/html/index.html>
16. Rosero García, J., García Sierra, R., Cerón, A. F., & Zúñiga, A. F. (2022). Una propuesta metodológica para la evaluación de la condición en sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS) utilizando KPIs. *Ingeniería y Desarrollo*, 40(2). <https://doi.org/10.14482/inde.40.02.627.001>
17. Vega, R. de la, Lamperti, A., Rossi, S., Spina, M., & Leegstra, R. (2025). Propuesta y comparación de algoritmos de balanceo pasivo de celdas NMC para una batería de iones de litio. *Revista Politécnica*, 55(1). <https://doi.org/10.33333/rp.vol55n1.08>