

Universidad Técnica Federico Santa María  
Departamento de ingeniería Química y Ambiental  
Valparaíso - Chile



## **Evaluación de materiales catódicos para baterías comerciales de ion litio.**

Memoria presentada por:  
**Sergio Nicolas Reinoso Aguirre**

Profesores Patrocinantes:  
**Dra. Karem Tello Araya**  
**Ing. Daniel Ramírez Livingston**

Profesor Co-referente:  
**Dr. Robinson Constanzo Rojas**

21/10/2024

## Resumen

El análisis presentado examina de manera exhaustiva la evolución, importancia y futuro de las baterías de ion litio, con un enfoque particular en los materiales catódicos empleados en su fabricación. Estas baterías son reconocidas como componentes fundamentales en la transición hacia tecnologías más sostenibles, desempeñando un papel crucial en aplicaciones que abarcan desde dispositivos electrónicos hasta herramientas eléctricas y sistemas de almacenamiento de energía, destacando su relevancia en el ámbito de la electro movilidad.

El objetivo principal de este estudio es llevar a cabo un análisis comparativo de los diferentes materiales catódicos utilizados en las baterías de ion litio, evaluando tanto su rendimiento técnico como su viabilidad económica para establecer un ranking basado en los costos de producción en la fabricación de vehículos eléctricos. Se exploran en detalle los componentes críticos de las baterías, incluidos el ánodo, el cátodo, el electrolito y el separador, así como su influencia en la eficiencia y seguridad del sistema energético. Además, se destaca el creciente interés de empresas como SQM en el desarrollo de estas tecnologías de baterías y materiales catódicos, los cuales dependen en gran medida de materias primas estratégicas como el carbonato de litio (LC) y el hidróxido de litio (LH), ambos producidos en Chile. Este interés subraya la importancia de la innovación en esta área para maximizar el valor de las materias primas nacionales y potenciar su rol en la cadena global de producción de baterías.

En este contexto, se implementan diversos métodos de síntesis para los materiales catódicos, tales como la síntesis en estado sólido, co-precipitación, sol-gel, hidrotermal y combustión. Estas técnicas se evalúan en términos de su capacidad para producir materiales de alta calidad, enfatizando la homogeneidad, pureza y propiedades electroquímicas. Asimismo, se abordan técnicas de mejora como el dopaje y el recubrimiento, orientadas a optimizar las propiedades de los materiales catódicos, incrementando su capacidad, estabilidad y vida útil.

Los resultados del análisis técnico evidencian comparaciones entre los materiales catódicos LCO (óxido de cobalto y litio), LMO (óxido de manganeso y litio), LFP (óxido de hierro y litio) y NMC (óxido de níquel, manganeso, cobalto y litio). Tras 100 ciclos, el LCO recubierto con FePO<sub>4</sub> exhibe una eficiencia del 97 % y una capacidad específica de 187 mAh/g, mientras que el LMO dopado con Mg-F presenta una eficiencia del 96 % y una capacidad específica de 125 mAh/g. Por su parte, el LFP recubierto con carbono/grafeno logra una eficiencia del 94 % y una capacidad específica de 175 mAh/g, y el NMC dopado con Al muestra una eficiencia del 95 % y una capacidad específica de 210 mAh/g. Desde el punto de vista económico, el análisis realizado mediante el software BAT-PAC determina que el material catódico más rentable para la fabricación de baterías de vehículos eléctricos es el NMC dopado con aluminio, con un costo total del paquete de baterías de \$11,533 dólares. Este hallazgo resalta la viabilidad del NMC no solo en términos de rendimiento técnico, sino también en su aplicación práctica en el mercado de la electromovilidad.

## **Agradecimientos**

Quiero tomar un momento para expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental de mi vida en este recorrido.

A mi familia, que siempre ha estado ahí para mí, apoyándome sin condiciones y sin pedir nada a cambio. En especial, a mi mamá, por ser mi roca en los momentos más difíciles. Gracias por tu amor infinito, por la fortaleza que me transmitiste cuando sentía que no podía más, y por levantarme una y otra vez con tus palabras de aliento. No estaría aquí sin todo lo que has hecho por mí.

A mis amigos, por haber compartido tantas risas, noches interminables de estudio y hasta momentos de crisis que logramos sobrellevar juntos. Gracias por hacer este camino más llevadero y por darme esa energía que solo ustedes saben transmitir.

A mi pareja, gracias por cada día que me has acompañado, por tu amor incondicional y por la paciencia que tuviste cuando yo no paraba de hablar de mi tesis. Has sido mi apoyo en los días más duros, mi confidente en las dudas y mi felicidad en los logros. Creíste en mí incluso cuando yo dudaba, y estuviste presente en cada triunfo y en cada tropiezo. Todo este proceso fue mucho más fácil de enfrentar con tu compañía.

Y, por supuesto, a mis profes, gracias por su dedicación y por compartir su conocimiento de manera tan generosa. Cada uno de ustedes dejó una marca en mi formación y me ayudó a crecer no solo profesionalmente, sino también como persona. Sus enseñanzas y su guía fueron clave para que pudiera cumplir este sueño.

Este logro no es solo mío. Es de todos ustedes, que me apoyaron, me motivaron y, sobre todo, creyeron en mí cuando las cosas se ponían cuesta arriba. Gracias por todo, de verdad

# Índice

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
1.1 CONTEXTO HISTÓRICO DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO .....	10
1.2 IMPORTANCIA Y APLICACIÓN DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO.....	12
1.3 CHILE: EPICENTRO DEL ORO BLANCO .....	13
1.4 EL FUTURO Y EL INCREMENTO EN LA DEMANDA.....	14
1.5 CONTEXTO INDUSTRIAL EN CHILE Y CADENA DE VALOR DEL LITIO.....	14
1.5.1 Sales utilizadas en baterías de ion litio .....	15
1.5 OBJETIVO DEL ANÁLISIS COMPARATIVO .....	16
1.5.1 Objetivo Principal .....	16
1.5.2 Objetivos Secundarios .....	16
<b>II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO .....	17
2.2 COMPONENTES PRINCIPALES DE LA BATERÍA Y SU PAPEL.....	18
2.2.1 Ánodo .....	19
2.2.2 Cátodo .....	19
2.2.3 Electrolito .....	20
2.2.4 Separador .....	21
2.2.5 Conexión.....	21
2.3 MATERIALES CATÓDICOS: DESCRIPCIÓN GENERAL.....	21
2.4 CARACTERÍSTICAS DESEABLES EN UN MATERIAL CATÓDICO.....	23
2.4.1 Alta Capacidad Específica .....	23
2.4.2 Alta Estabilidad Cíclica: .....	24
2.4.3 Amplio Potencial de Voltaje:.....	24
2.4.4 Buena Conductividad Iónica y Electrónica: .....	24
2.4.5 Estabilidad Térmica y Química:.....	25
2.4.6 Facilidad de Síntesis y Escalabilidad: .....	25
2.4.7 Compatibilidad con Electrolitos: .....	25
2.5 MATERIALES CATÓDICOS ANALIZADOS .....	26
2.5.1 Óxido de cobalto y litio ( $\text{LiCoO}_2$ ).....	26
2.5.2 Óxido de manganeso y litio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) .....	27
2.5.3 Óxido de hierro y litio ( $\text{LiFePO}_4$ ).....	29
2.5.4 Óxido de níquel, manganeso y cobalto ( $\text{Li}(\text{Ni}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33})\text{O}_2$ ) .....	30
2.6 TIPOS DE SÍNTESIS.....	32
2.6.1 Método Estado Sólido.....	32
2.6.2 Método Co-Precipitación .....	33
2.6.3 Método Sol-Gel.....	34
2.6.4 Método Hidrotermal.....	35
2.6.5 Método Combustión.....	37

2.6.6. Método de Secado Pulverizado .....	38
2.7 TÉCNICAS DE MEJORAS .....	41
2.7.1. Dopaje .....	41
2.7.2. Recubrimiento.....	42
<b>III. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....</b>	<b>44</b>
<b>IV. RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
4.1. MATERIAL CATÓDICO LCO .....	46
4.3. MATERIAL CATÓDICO LFP.....	51
4.4. MATERIAL CATÓDICO NMC .....	53
4.5. MATERIALES DOPANTES Y RECUBIERTOS SELECCIONADOS .....	55
4.5.1 <i>Análisis microestructural y efectos de los dopantes</i> .....	56
4.5.2 <i>Impacto económico de los elementos dopantes</i> .....	56
<b>V. EVALUACIÓN ECONÓMICA .....</b>	<b>58</b>
5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DISEÑO DE BATERÍAS .....	59
5.2 COSTO DE FABRICACIÓN .....	60
5.2.1 <i>Enfoque</i> .....	60
5.2.2 <i>Planta de fabricación de referencia</i> .....	61
5.3 COSTOS DE INVERSIÓN EN PLANTA.....	63
5.4 COSTO BASE.....	63
5.5 GASTOS FIJOS.....	64
5.6 BENEFICIOS Y GARANTÍA .....	65
5.7 RESULTADOS .....	65
<b>VI. CONCLUSIONES .....</b>	<b>69</b>
<b>VII. REFERENCIAS.....</b>	<b>71</b>
<b>IX. ANEXOS.....</b>	<b>80</b>
9.1 CÁTODO LCO DOPADO .....	80
9.2 CÁTODO LCO RECUBIERTO. ....	82
9.3 CÁTODO LMO DOPADO. ....	84
9.4 CÁTODO LMO RECUBIERTO. ....	85
9.5 CÁTODO LFP DOPADO. ....	87
9.6 CÁTODO LFP RECUBIERTO. ....	89
9.7 CÁTODO NMC DOPADO.....	90
9.8 CÁTODO NMC RECUBIERTO. ....	92
9.9 DISEÑO CELDA.....	94
9.10 DISEÑO MÓDULO. ....	96
9.11 DISEÑO DE BASTIDOR DE MÓDULOS. ....	99
9.12 DISEÑO PAQUETE.....	102

9.13 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA BATERÍA.....	103
9.13.1 Unidad de desconexión de batería (BDU) y electrónica de potencia .....	107
9.13.2 Interface entre sistemas electrónicos .....	108
9.13.3 Electrónica del módulo.....	108
9.14 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN TÉRMICA. ....	109
9.14.1 Generador de calor durante el funcionamiento .....	110
9.14.2 Transferencia de calor desde el ambiente.....	112
9.14.3 Potencia de bombeo.....	112
9.14.4 Cálculo de la temperatura de la celda .....	113
9.15 COSTO DE MATERIALES ESPECÍFICOS DE LA BATERÍA. ....	114
9.15.1 Costos de artículos comprados.....	115
9.16 COSTOS DE INTEGRACIÓN DEL PAQUETE. ....	116
9.17 PROCESAMIENTO DE ELECTRODOS. ....	117
9.17.1 Preparación y mezcla de materiales .....	117
9.17.2 Revestimiento del electrodo.....	117
9.17.3 Calandrado.....	118
9.17.4 Muestras .....	118
9.17.5 Secado al vacío de electrodos .....	119
9.17.6 Corte de electrodos.....	119
9.17.7 Apilamiento de celdas.....	119
9.17.8 Soldadura del colector de corriente .....	120
9.17.9 Inspección por rayos X.....	120
9.17.10 Inserción de celda en contenedor.....	120
9.17.11 Llenado de electrolitos y sellado de celda.....	120
9.17.12 Ciclo de formación .....	120
9.17.13 Montaje del módulo .....	121
9.17.14 Montaje del paquete .....	121
9.17.15 Almacén .....	122
9.17.16 Sistema de construcción y soporte.....	122
9.17.17 Recuperación del disolvente aglutinante.....	122
9.17.18 Laboratorio de control .....	123
9.18 FLUJO DE CAJA.....	124
9.18.1 Producción Anual.....	124
9.18.2 Ingresos Anuales.....	124
9.18.3 Costos Variables.....	124
9.18.4 Costos Fijos .....	125
9.18.5 Depreciación .....	125
9.18.6 Garantía.....	125
9.18.7 Flujo de Caja Neto .....	125

## Índice de Tablas

Tabla 1: Valores de potencial redox respecto a la densidad de energía en relación a los distintos electrodos. ....	22
Tabla 2: Desempeño de los materiales catodicos. ....	32
Tabla 3: Principales características de los métodos de síntesis de materiales catódicos.....	40
Tabla 4: Materiales catódicos con mejor rendimiento al ser dopados y recubiertos.....	55
Tabla 5: Tasas de fabricación en planta base. ....	61
Tabla 6: Mano de obra, capital y área de planta para cada paso del proceso en la planta base. ....	61
Tabla 7: Costo unitario del paquete de baterías.....	64
Tabla 8: Parámetros fijos para los materiales catódicos seleccionados.....	65
Tabla 9: Características del electrodo positivo en los materiales catódicos.....	66
Tabla 10: Resultados finales para cada batería con diferentes materiales catódicos.....	67
Tabla 11: Material LCO Dopado.....	80
Tabla 12: Material LCO Recubierto.....	82
Tabla 13: Material LMO Dopado.....	84
Tabla 14: Material LMO Recubierto.....	85
Tabla 15: Material LFP Dopado.....	87
Tabla 16: Material LFP Recubierto.....	89
Tabla 17: Material NMC Dopado.....	90
Tabla 18: Material NMC Recubierto.....	92
Tabla 19: Costos de referencia de los componentes de la unidad de gestión de baterías...	105
Tabla 20: Costos referenciales de los componentes de la unidad de desconexión y de la electrónica de la batería. ....	107
Tabla 21:Costos de referencia para determinar el costo base del contactor principal.....	108
Tabla 22: Costos de referencia de la electrónica de interfaz. ....	108
Tabla 23: Costo de referencia de la electrónica del módulo.....	109
Tabla 24: Costos de los principales materiales en BatPac.....	114
Tabla 25: Ecuaciones de costos para artículos comprados.....	115
Tabla 26: Costo de integración del paquete.....	117
Tabla 27: Tarifa pertinente y factor utilizados para escalar la mano de obra, el costo de bienes de capital y área en proceso de fabricación. ....	123

## Índice de Figuras

Figura 1: Línea del tiempo de los avances de las baterías (elaboración propia). .....	12
Figura 2: Demanda de uso de litio en el año 2023 [11]. .....	13
Figura 3: Principales países productores de litio en el año 2023 [11]. .....	14
Figura 4: Esquema del funcionamiento en descarga en el cátodo LCO de una batería de ion litio [15]. .....	18
Figura 5: Estructura funcional de grafito y grafeno [17]. .....	19
Figura 6: Estructura de un material catódico en una batería de ion litio [19]. .....	20
Figura 7: Electrolito polimérico en Baterías de ion litio [21]. .....	20
Figura 8: Comparación de materiales catódicos en función del potencial (V) frente $Li/Li +$ y capacidad específica (mAh/g) [34]. .....	23
Figura 9: Estructura cristalina del material catódico LCO [42]. .....	26
Figura 10: Estructura cristalina del material catódico LMO [44]. .....	28
Figura 11: Estructura cristalina del material catódico LFP [46]. .....	29
Figura 12: Estructura cristalina del material catódico NMC [48]. .....	31
Figura 13: Proceso de síntesis con método estado sólido [50]. .....	33
Figura 14: Proceso de síntesis con método co-precipitación [52]. .....	34
Figura 15: Proceso de síntesis Sol-Gel en material catódico NMC [54]. .....	35
Figura 16: Proceso de síntesis hidrotérmal [56]. .....	37
Figura 17: Proceso de síntesis por combustión en material catódico NMC [58]. .....	38
Figura 18: Proceso de síntesis por método secado pulverizado [60]. .....	39
Figura 19: Dopaje en material catódico NMC [64]. .....	41
Figura 20: Recubrimiento en material catódico LFP [68]. .....	43
Figura 21: Metodología de trabajo (elaboración propia). .....	45
Figura 22: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LCO Dopado (elaboración propia). .....	46
Figura 23: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LCO recubierto (elaboración propia). .....	47
Figura 24: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LMO Dopado (elaboración propia). .....	49
Figura 25: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LMO Recubierto (elaboración propia). .....	50
Figura 26: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LFP Dopado. ....	51
Figura 27: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LFP Recubierto. ....	52
Figura 28: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo NMC Dopado. ....	53
Figura 29: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo NMC Recubierto (elaboración propia). .....	54
Figura 30: Flujo de entrada y salida para determinar el costo total de la batería (Elaboración propia). .....	59

Figura 31: Piezas dentro de las baterías como celda, módulo, bastidor y pack [69].	60
Figura 32: Esquema del diseño de una celda [69].	94
Figura 33: Desglose de los componentes del módulo en la batería [69].	97
Figura 34: Esquema interno del módulo [69].	99
Figura 35: Desglose de los componentes que tiene bastidor de módulos [69].	100
Figura 36: Vista de perfil, frontal y lateral del bastidor de módulos [69].	100
Figura 37: Componentes principales en el paquete de batería [69].	102
Figura 38: Perfil y vista frontal del paquete de batería [69].	103
Figura 39: Flujo de refrigerante en el paquete de baterías BatPac [69].	110
Figura 40: Flujo de caja de baterías con material catódico LCO (elaboración propia).	125
Figura 41: Flujo de caja de baterías con material catódico LMO (elaboración propia).	126
Figura 42: Flujo de caja de baterías con material catódico LFP (elaboración propia).	126
Figura 43: Flujo de caja de baterías con material catódico NMC (elaboración propia).	126

# I. INTRODUCCIÓN

La energía es un componente crucial del avance humano y tecnológico. La energía ha sido la base de nuestra evolución desde los primeros tiempos de la humanidad, cuando dependíamos únicamente de la energía del sol y del fuego, hasta el presente, cuando buscamos soluciones sostenibles y transportables para satisfacer nuestras crecientes necesidades. Como fuente de energía portátil y recargable que ha transformado la forma en que alimentamos nuestros dispositivos, las baterías de iones de litio (Li-ion) son un punto de inflexión en este proceso evolutivo.

Además de marcar el comienzo de dispositivos más pequeños y potentes, las baterías de iones de litio también están sirviendo como piedra angular de la transición hacia una economía baja en carbono al suministrar energía a los automóviles eléctricos y almacenar energía renovable [1]. Su importancia es tal que desempeñan un papel crucial en el desarrollo de campos tecnológicos más amplios, como los vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía a gran escala, además de alimentar dispositivos comunes como teléfonos inteligentes y computadoras portátiles.

En este contexto, se podría preguntar: ¿qué hace que estas baterías sean tan eficientes y versátiles? La respuesta radica en su diseño y composición. Al igual que otras baterías, las baterías de iones de litio generan electricidad mediante una serie de reacciones químicas que permiten el flujo de electrones [2]. El material del cátodo utilizado es lo que distingue a las baterías de iones de litio, y es el factor el que afecta qué tan bien se desempeñan y cuánto durarán.

## 1.1 Contexto histórico de las baterías de ion litio

La evolución de las baterías, fundamentales para la vida moderna, ha sido un proceso que se ha desarrollado a lo largo de los siglos. Los primeros inventos fueron sencillos, pero con los avances tecnológicos, se transformaron hasta llegar a la creación de la batería de ion litio. Esta historia tuvo su punto de partida en 1800, con la invención de la batería de Volta por Alessandro Volta. Esta fue la primera fuente continua de electricidad, que utilizaba discos de zinc y cobre separados por cartones empapados en agua salada [3]. Fue un desarrollo innovador, pero su reutilización tenía algunas restricciones.

Este desafío fue abordado en 1859 por Gastón Planté con la invención de la primera pila recargable [4]. A diferencia de las pilas anteriores, el diseño de Planté, basado en plomo, permitía la recarga y reutilización múltiple, estableciendo el camino hacia las baterías modernas.

Sin embargo, la eficiencia energética siguió siendo una preocupación. La batería de níquel-cadmio fue inventada en 1899 por Waldemar Jungner, lo que fue una mejora significativa con respecto a las baterías de plomo-ácido [5]. Estas baterías recargables proporcionaban mayores densidades de energía y eran menos susceptibles al efecto memoria.

La demanda de baterías más eficaces aumentó a lo largo del siglo XX. Unión Carbide introdujo por primera vez la batería alcalina en esta situación [6]. Este invento ganó rápidamente popularidad entre los dispositivos electrónicos debido a su resistencia y durabilidad, convirtiéndose rápidamente en una opción popular para dispositivos electrónicos.

Los avances no se detuvieron allí. La batería de níquel e hidruro metálico fue patentada en 1986 por Stanford Ovshinsky [7]. Estas baterías eran menos tóxicas y tenían una vida útil más prolongada que las de níquel-cadmio, aunque compartían algunas de sus limitaciones. El gran salto vino en 1991 con la batería de ion litio presentada por Sony. Este diseño, que utilizaba litio, un metal altamente reactivo, fue una verdadera revolución energética. Eran más ligeras, con una densidad energética superior y, crucialmente, carecían del indeseable efecto de memoria [8]. Este diseño sería la base de una variante: las baterías de Li-ion polímero. Utilizando un electrolito polimérico, estas baterías ofrecían formas y tamaños más versátiles, adecuadas para dispositivos modernos de diseño delgado.

La importancia del ion litio en el almacenamiento de energía fue reconocida a nivel global en 2019 cuando John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham y Akira Yoshino fueron galardonados con el Premio Nobel de Química [9]. El trío fue honrado por sus contribuciones fundamentales al desarrollo de baterías de ion litio, un testimonio del impacto transformador de esta tecnología en la sociedad moderna.

Actualmente, mientras las baterías de ion litio siguen dominando, surgen nuevas tecnologías como las de aire litio. Estas baterías prometen densidades de energía aún mayores, usando oxígeno del aire como reactivo, lo que podría revolucionar, una vez más, la forma en que almacenamos y utilizamos la energía.

Este viaje desde la pila de Volta hasta las modernas baterías de aire-litio destaca la incesante búsqueda humana de fuentes de energía más eficientes (ver Figura 1). Cada innovación no solo representa un avance técnico, sino también la capacidad humana de superar desafíos y aspirar a un futuro más sostenible y energéticamente eficiente. El viaje que nos llevó a las baterías de ion litio, fundamentales en la actualidad, es rico y repleto de innovaciones. Estas baterías representan el punto culminante de siglos de esfuerzos para desarrollar fuentes de energía portátiles y eficientes.

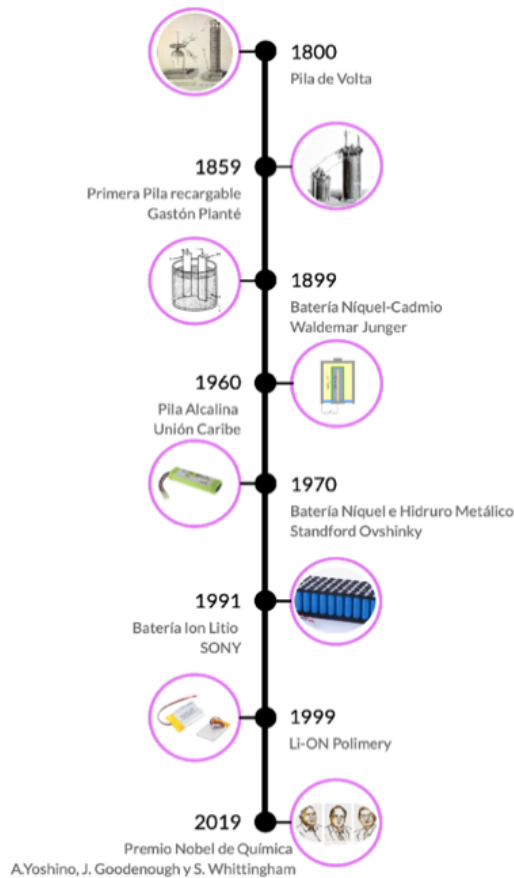


Figura 1: Línea del tiempo de los avances de las baterías (elaboración propia).

## 1.2 Importancia y aplicación de las baterías de ion litio

La aparición y consolidación de las baterías de iónLi en una amplia gama de aplicaciones ha sido una de las características definitorias de la revolución energética del siglo XXI. Este tipo de batería es necesaria para el diseño y funcionamiento de numerosos dispositivos y sistemas debido a su capacidad de almacenar grandes cantidades de energía en un área pequeña, las baterías de ión-Li tienen una amplia gama de aplicaciones [10], entre las que se pueden mencionar (ver Figura 2):

- Dispositivos electrónicos: debido a su eficacia, longevidad y capacidad de carga rápida, estas baterías se utilizan en una variedad de dispositivos, incluidos teléfonos inteligentes, computadoras portátiles, relojes inteligentes, entre otros.
- Herramientas eléctricas: la adaptabilidad de las baterías de ión-Li ha permitido que herramientas como taladros, sierras y otras herramientas manuales sean más potentes e independientes, permitiendo trabajos más largos y efectivos.

- Sistemas de almacenamiento: desempeñan un papel crucial en la instalación de fuentes de energía renovables, como la solar o la eólica, al ofrecer opciones de almacenamiento que permiten liberar energía cuando sea necesario.
- Electro movilidad: una Revolución en Marcha.

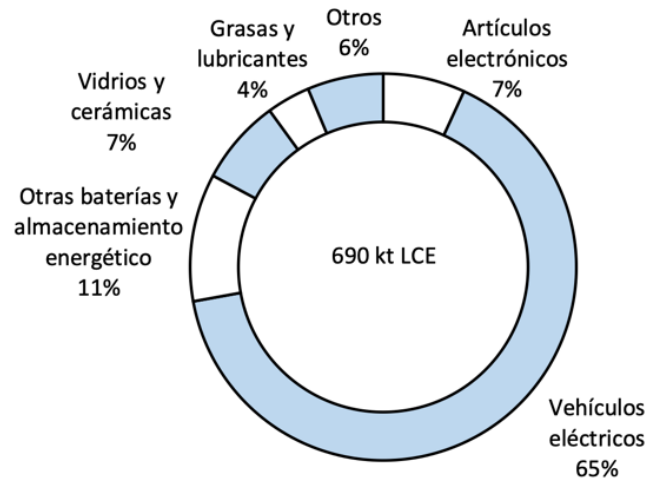


Figura 2: Demanda de uso de litio en el año 2023 [11].

Dentro de las aplicaciones mencionadas más arriba, la electro movilidad es la aplicación más revolucionaria [12]. Los vehículos eléctricos se promocionan como uno de los sustitutos más prácticos de los vehículos de combustión interna dada la urgente necesidad del mundo de reducir las emisiones de carbono y combatir el cambio climático.

Para el público en general, los vehículos eléctricos son ahora prácticos gracias a las baterías de ión-Li. Estos automóviles cuestan menos de mantener y operar y, al mismo tiempo, son más respetuosos con el medio ambiente. La creciente infraestructura de carga y las mejoras en la capacidad de estas baterías han permitido que los vehículos eléctricos sean una opción atractiva, accesible y práctica.

### 1.3 Chile: Epicentro del Oro Blanco

La creciente demanda de baterías de ion litio conduce inevitablemente a una mayor demanda de litio, el recurso clave para su fabricación. En este contexto, Chile se ha consolidado como uno de los principales productores mundiales de sales de litio gracias a sus vastas reservas, que se encuentran principalmente en el Salar de Atacama. La Figura 3 muestra que Chile es el segundo productor de litio del mundo aportando con un 34% de la producción. Chile se ha convertido en un participante clave en la cadena de suministro de la industria de baterías de

ión-Li a raíz del llamado "oro blanco". Sin embargo, la nación tiene el desafío y la oportunidad de innovar en tecnologías, procesos de extracción y procesamiento además de ser simplemente un proveedor de materias primas, fortaleciendo su posición en el mercado global.

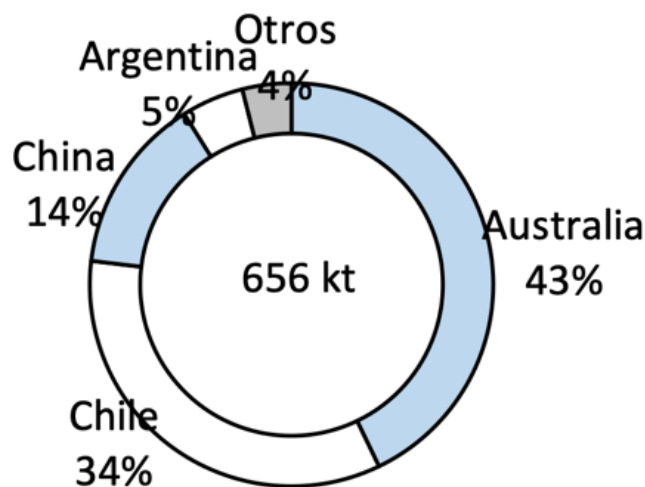


Figura 3: Principales países productores de litio en el año 2023 [11].

#### 1.4 El Futuro y el Incremento en la Demanda

Según las proyecciones, la demanda de baterías de ión-Li seguirá aumentando. Esta tendencia seguirá creciendo durante las próximas décadas a medida que aumente la adopción de vehículos eléctricos, se satisfagan las necesidades de almacenamiento de energía y aumente la cantidad de dispositivos electrónicos [13]. Se desarrollará una relación simbiótica entre Chile y el mercado global en el contexto del litio.

Chile está en una posición estratégica por este aumento de la demanda, pero también presenta dificultades. Será esencial garantizar prácticas de extracción sostenibles, minimizando el impacto ambiental y garantizando un uso equitativo de los recursos. Además, invertir en investigación y desarrollo permitirá que Chile no solo sea un exportador de litio, sino también un innovador en la industria.

#### 1.5 Contexto industrial en Chile y cadena de valor del litio

Chile es uno de los principales actores en la producción de litio a nivel mundial, siendo el segundo mayor productor después de Australia. La industria chilena del litio se encuentra concentrada principalmente en el Salar de Atacama, donde empresas como SQM extraen y procesan las salmueras para obtener carbonato de litio e hidróxido de litio, ambos componentes esenciales en la fabricación de baterías de ion litio. En el año 2023, SQM

reportó una capacidad de producción de aproximadamente 180.000 toneladas de carbonato de litio por año y 30.000 toneladas de hidróxido de litio por año.

El flujo de salmuera extraído en el Salar de Atacama alcanza aproximadamente 2.100 litros por segundo. Las salmueras contienen una mezcla de sales y minerales, entre los cuales destacan el cloruro de litio (LiCl), cloruro de potasio (KCl), cloruro de magnesio (MgCl<sub>2</sub>), y cloruro de sodio (NaCl). El proceso de concentración de litio mediante evaporación solar puede tomar entre 12 y 18 meses, dependiendo de las condiciones climáticas y la etapa específica del proceso de concentración. Durante este tiempo, las salmueras pasan por una serie de piscinas de evaporación donde se van eliminando las impurezas y concentrando el litio en su forma más pura.

La cadena de valor de estos productos abarca desde la extracción de salmueras ricas en litio, pasando por procesos de evaporación solar para la concentración del mineral, hasta su posterior conversión en carbonato e hidróxido de litio en plantas industriales. El carbonato de litio es utilizado mayoritariamente en la fabricación de materiales catódicos para baterías, mientras que el hidróxido de litio es preferido para aquellas que requieren mayor densidad energética, como las empleadas en vehículos eléctricos de alto rendimiento. En este contexto, SQM ha jugado un rol clave al aumentar su capacidad de producción en respuesta al crecimiento de la demanda global, consolidando a Chile como un proveedor estratégico dentro de la cadena de suministro de baterías a nivel mundial. Este desarrollo industrial ha permitido no solo generar valor agregado a partir de los recursos naturales del país, sino también posicionar a Chile como un actor clave en la transición energética global.

### **1.5.1 Sales utilizadas en baterías de ion litio**

Dependiendo de la aplicación, se emplean diferentes tipos de cátodos en las baterías de ion litio, cada uno compuesto por diferentes sales o materiales. Además, el tipo de sal de litio (hidróxido de litio o carbonato de litio) utilizado en la producción de estos cátodos varía según las características requeridas en cada tipo de batería:

- LCO, LMO y LFP utilizan carbonato de litio en la fabricación de sus cátodos.
- NMC utiliza hidróxido de litio en la fabricación de su cátodo, ya que optimiza la densidad energética y el rendimiento en ciclos de carga.

## **1.5 Objetivo del análisis comparativo**

### **1.5.1 Objetivo Principal**

Proponer un material catódico para fabricar baterías de ion litio que maximice la eficiencia de la batería y minimice el costo de producción.

### **1.5.2 Objetivos Secundarios**

1. Reunir y analizar antecedentes bibliográficos relacionados con el funcionamiento, características y variables relevantes de las baterías de ion litio. Enfocarse de manera detallada en los materiales catódicos, especialmente en LCO, LMO, LFP y NMC para comprender su influencia y comportamiento.
2. Evaluar el efecto del impacto estructural de los materiales catódicos LCO, LMO, LFP y NMC en los parámetros de rendimiento energético, tales como capacidad de carga, densidad energética, número de ciclos y voltaje de trabajo, para analizar su eficiencia.
3. Determinar el costo de fabricar los materiales catódicos seleccionados al ser dopados o recubiertos, con el objetivo de minimizar el costo de producción.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Funcionamiento general de las baterías de ion litio

Estas baterías han demostrado ser esenciales debido a su eficiencia y capacidad. En esta sección se explorará su funcionamiento interno, desde el intercambio de iones hasta las reacciones químicas en sus componentes.

A diferencia de las baterías tradicionales, como las de plomo-ácido o níquel-cadmio, que generan electricidad a través de procesos químicos irreversibles, las baterías de ion litio (LIBs) emplean un proceso de intercalación. Este mecanismo permite que los iones de litio se inserten y extraigan de las estructuras cristalinas del ánodo y el cátodo de manera reversible, lo que mejora significativamente la eficiencia y la vida útil de las baterías. Es este cambio en el mecanismo lo que marca una diferencia clave entre las tecnologías tradicionales y las LIBs, haciendo de estas últimas una solución más efectiva y duradera.

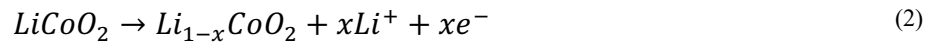
Para entender la operatividad de estas baterías, primeramente, se debe comprender el intercambio de iones que ocurre en su interior [14]. Una batería de ion litio funciona principalmente a través del movimiento de iones de litio entre un ánodo y un cátodo. Durante la descarga, los iones de litio se desplazan desde el ánodo hacia el cátodo a través de un electrolito, y durante la carga, el proceso se invierte (ver Figura 4). Es este flujo constante y reversible de iones lo que permite que la batería proporcione energía a los dispositivos y luego se recargue para su reutilización.

Simultáneamente a este movimiento iónico, los electrones también tienen un papel crucial. Sin embargo, estos electrones no viajan directamente entre el ánodo y el cátodo a través del electrolito, ya que un separador en medio de la batería previene tal flujo directo, evitando cortocircuitos. En su lugar, cuando se descarga la batería, los electrones salen del ánodo, fluyen a través del circuito externo (proporcionando energía al dispositivo) y regresan a la batería en el cátodo. Durante la carga, este flujo se revierte.

El flujo de iones es una serie de reacciones químicas en el ánodo y el cátodo. En el ánodo, la reacción dominante durante la descarga involucra la liberación de iones de litio hacia el electrolito. El grafito ( $C_6$ ) aloja estos iones de litio y la reacción puede representarse según la Ecuación (1):



Por otro lado, suponiendo que el cátodo corresponde óxido de cobalto y litio ( $LiCoO_2$ ), la reacción catódica dada por la Ecuación (2) muestra que se liberan iones de litio y electrones.



Durante el proceso de carga, estas reacciones se invierten, restableciendo la batería a su estado original y permitiendo su reutilización.

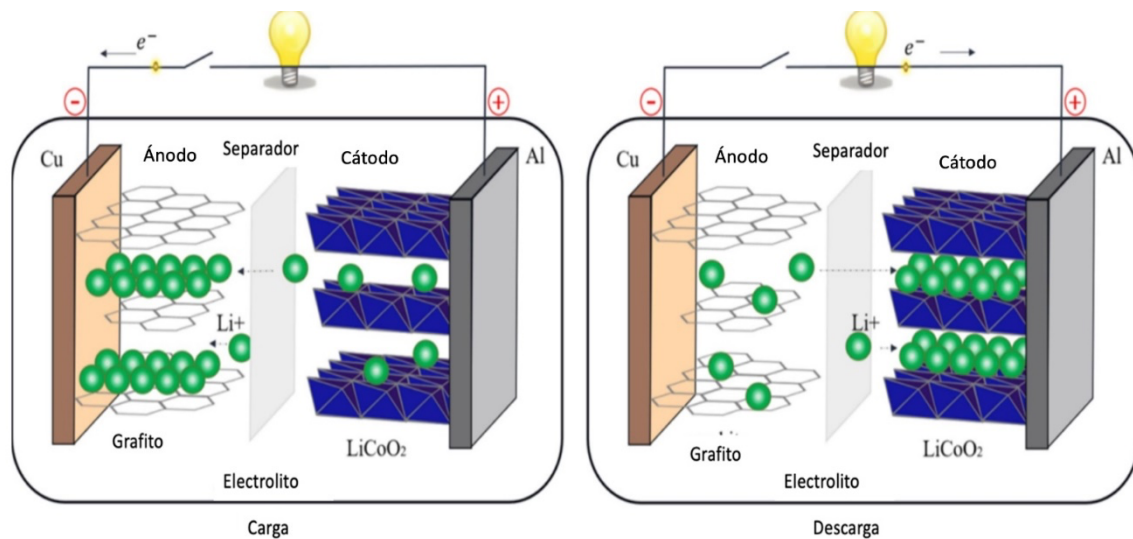


Figura 4: Esquema del funcionamiento en descarga en el cátodo LCO de una batería de ion litio [15].

El material del cátodo es crucial para determinar no solo la capacidad de la batería sino también su tensión y su durabilidad. Materiales como el óxido de cobalto y litio ( $LiCoO_2$ ) han sido populares en la industria debido a sus propiedades favorables como su alta capacidad de carga y alta densidad energética, pero cada material tiene sus ventajas y desventajas, siendo el motivo de investigación y mejora constante.

A pesar de su eficiencia, las baterías de Li-ión no están exentas de desafíos. La eficacia del intercambio iónico, por ejemplo, puede verse afectada por el llamado "efecto memoria", que se refiere a la reducción de la capacidad de la batería si no se descarga completamente antes de volver a cargarse. Además, hay problemas de seguridad; el litio es reactivo, y si el separador entre el ánodo y el cátodo se rompe, puede causar un cortocircuito y potencialmente una ignición.

## 2.2 Componentes principales de la batería y su papel

Dentro del universo de la electroquímica, las baterías de ion litio (Li-ion) emergen como pilares esenciales para un amplio espectro de aplicaciones tecnológicas. Estas baterías, más allá de su aparente simplicidad exterior, encierran en su estructura interna una serie de

componentes altamente especializados y técnicamente avanzados que colaboran en conjunto para el almacenamiento y liberación de energía. Para comprender su eficacia y característica, es fundamental analizar detenidamente cada uno de estos componentes y su intrincada sinergia.

### 2.2.1 Ánodo

El electrodo negativo de una celda de iones de litio, conocido como ánodo (ver Figura 5), suele estar fabricado de silicio, grafeno o grafito laminar [16]. La capacidad de intercalar iones de litio entre las capas del material es un punto fuerte de estos materiales. Para garantizar la reversibilidad electroquímica y, en consecuencia, la re-cargabilidad de la batería, es fundamental que la estructura cristalina del grafito ofrezca suficientes espacios intersticiales para aceptar estos iones sin provocar que el material se expanda excesivamente. La selección y optimización de los ánodos son cruciales porque tienen un impacto directo en la densidad de energía, la vida útil y la tasa de carga/descarga de la batería.

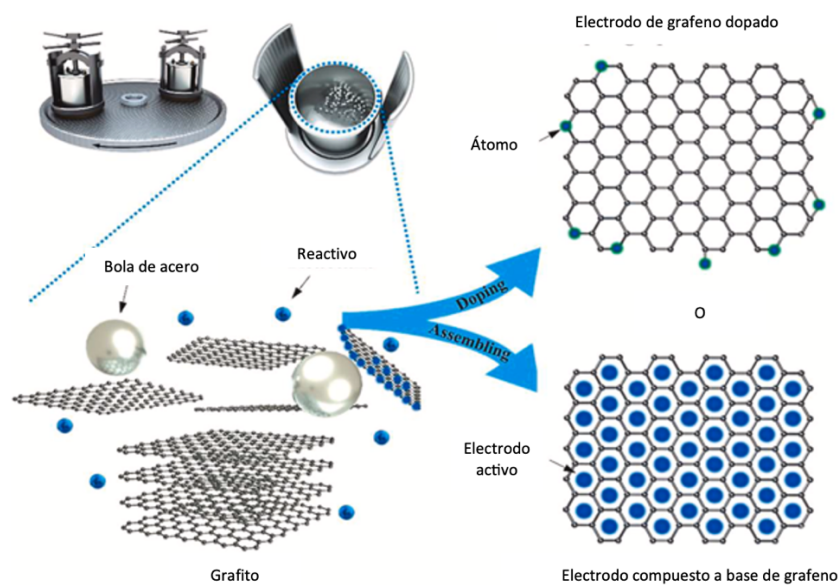


Figura 5: Estructura funcional de grafito y grafeno [17].

### 2.2.2 Cátodo

El electrodo positivo en baterías Li-ion, desempeña un papel primordial en definir la tensión y capacidad de la celda. Compuestos como  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiFePO}_4$  y NMC (ver Figura 6) son empleados dada su alta capacidad gravimétrica y potencial redox. El rendimiento electroquímico del cátodo deriva de su habilidad para aceptar y liberar iones de litio durante los ciclos de carga y descarga. La elección del material catódico determina factores como el potencial de voltaje, resistencia térmica, y estabilidad cíclica, haciendo esencial su estudio y selección [18].

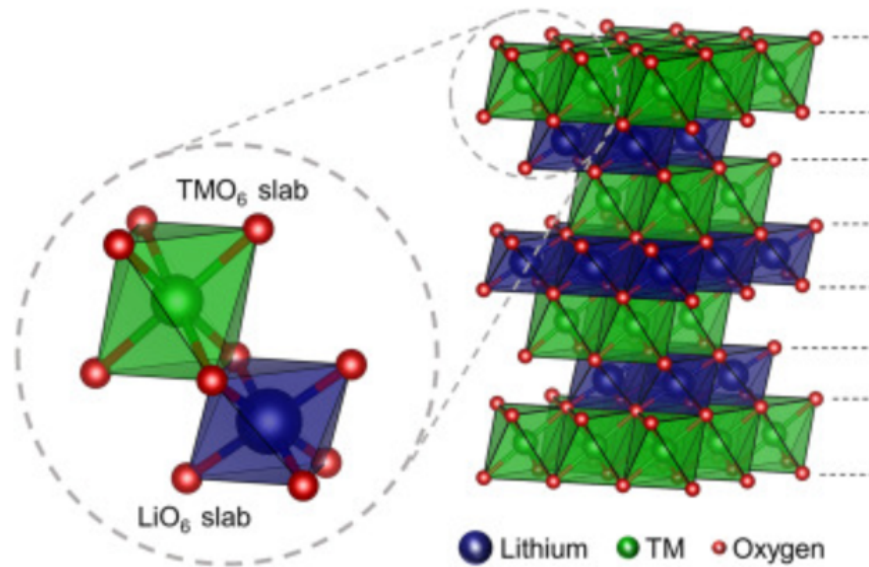


Figura 6: Estructura de un material catódico en una batería de ion litio [19].

### 2.2.3 Electrolito

Los iones de litio pueden moverse entre el cátodo y el ánodo gracias al electrolito (ver Figura 7), que es un medio conductor. Las sales de litio, como LiPF<sub>6</sub>, se disuelven en disolventes orgánicos como Di metil éter (DME) u óxido de etileno (EO) [20]. La optimización del electrolito es crucial para garantizar una conductividad iónica adecuada, estabilidad electroquímica y, lo más importante, prevenir la formación de dendritas, de litio que pueden provocar cortocircuitos. Un electrolito es eficaz si posee ventanas electroquímicas, baja resistencia iónica y alta compatibilidad con otros componentes.

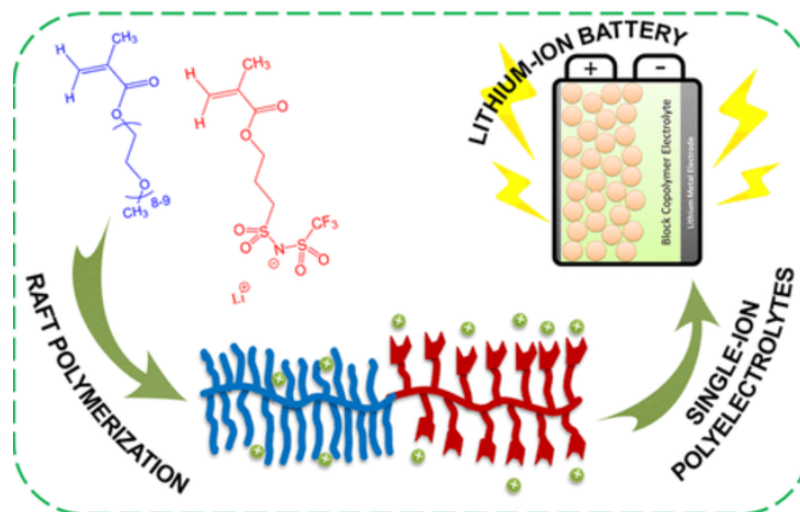


Figura 7: Electrolito polimérico en Baterías de ion litio [21].

### **2.2.4 Separador**

El separador, posicionado entre el ánodo y cátodo, es esencial para prevenir cortocircuitos, pero al mismo tiempo permitir el paso de iones de litio. Este fabricado generalmente con polímeros micro porosos. Su diseño debe garantizar permeabilidad iónica, resistencia química y estabilidad térmica. Además, debe poseer una estructura porosa adecuada que maximice la conductividad iónica y minimice la resistencia interna de la batería [22].

### **2.2.5 Conexión**

La carcasa, que garantiza la seguridad física y la integridad estructural de la celda, suele estar hecha de aluminio o acero inoxidable, materiales resistentes y livianos. Para evitar la contaminación y adaptarse a la expansión térmica, su diseño debe ser hermético. Por otro lado, las conexiones, normalmente hechas de níquel o cobre, ofrecen una interfaz eficaz para la transmisión de corriente eléctrica. El calibre y el diseño de estas conexiones garantizan una baja resistencia y, en consecuencia, un rendimiento energético eficaz de la batería [23].

## **2.3 Materiales Catódicos: Descripción General**

El cátodo, un elemento crucial de las celdas electroquímicas de las baterías de iones de litio, es donde tienen lugar la mayoría de las reacciones redox asociadas a los procesos de carga y descarga dentro de la batería. El cátodo, es el polo positivo de la celda que está a cargo relacionado de la capacidad, la densidad de energía y la estabilidad cíclica de la batería.

Desde el punto de vista electroquímico, el cátodo sirve como aceptor de electrones durante la descarga de la batería. Cuando los iones de litio pasan del ánodo al cátodo a través del electrolito, esto también ocurre al mismo tiempo. La reacción redox que tiene lugar es una reducción, lo que denota que los átomos de la estructura catódica aceptan electrones. La capacidad y la eficiencia de la batería dependen en gran medida de la rapidez y eficacia de estas reacciones redox.

El cátodo exhibe una estructura cristalina que permite la inserción (intercalación) y extracción (desintercalación) de iones de litio. La naturaleza de esta estructura cristalina es de suma importancia porque la intercalación y desintercalación eficiente de iones de litio garantiza una alta reversibilidad del proceso, lo cual es crucial para la longevidad de la batería y la minimización del deterioro [24].

La tensión nominal de la celda está determinada por el potencial redox intrínseco del cátodo en comparación con el del ánodo. En concreto, se refiere al potencial eléctrico que, en condiciones típicas de funcionamiento, existe entre el cátodo y el ánodo. Se prefiere un

potencial redox alto porque da como resultado una mayor densidad de energía y voltaje de celda, como se puede ver Tabla 1.

Tabla 1: Valores de potencial redox respecto a la densidad de energía en relación a los distintos electrodos.

<b>Material</b>	<b>Potencial Redox</b> <b>V vs Li/Li<sup>+</sup></b>	<b>Densidad de Energía</b> <b>Wh/Kg</b>	<b>Ref.</b>
<b>Ánodo - Grafito</b>	0,2	N/A	[25]
<b>Ánodo - Grafeno</b>	0,2	N/A	[26]
<b>Cátodo - LCO</b>	4,2	250	[27]
<b>Cátodo - LMO</b>	3,2	150	[28]
<b>Cátodo - LFP</b>	3,4	160	[29]
<b>Cátodo - NMC</b>	3,7	200	[30]

La estabilidad del cátodo es necesaria desde el punto de vista termodinámico. Es fundamental que el cátodo no experimente cambios de fase no deseados o reacciones parásitas que podrían poner en peligro la integridad estructural y la funcionalidad del material durante ciclos repetidos de carga y descarga [31]. Estas transformaciones de fases pueden deberse a interacciones desfavorables con el electrolito u otros componentes de la batería, o pueden ser el resultado de la expansión y contracción volumétrica provocadas por la intercalación y desintercalación de iones. Por ejemplo, en materiales de cátodo como el óxido de níquel, manganeso y cobalto (NMC), se ha observado que, durante la intercalación de iones de litio, el material experimenta una expansión volumétrica significativa. Esto puede llevar a cambios de fase no deseados, como la transición de una estructura cristalina a otra, lo que resulta en una pérdida de capacidad y una reducción en la vida útil de la batería. Además, estas transformaciones pueden inducir la formación de micro fisuras en el material, lo que facilita la exposición del cátodo al electrolito y, por lo tanto, aumenta el riesgo de reacciones parásitas que comprometen aún más la estabilidad del cátodo [32].

La conductividad electrónica del material del cátodo es otro factor importante. Aunque la mayoría de los materiales catódicos no son buenos conductores eléctricos por naturaleza, es fundamental que permitan un flujo eficaz de electrones para respaldar la reacción redox. La pérdida de energía, el calentamiento de las celdas y una disminución general de la eficiencia de la batería pueden deberse a resistencias internas producidas por una conductividad insuficiente.

## 2.4 Características deseables en un material catódico

El cátodo es un pilar crucial en las baterías de ion litio, siendo determinante en el rendimiento, la seguridad y la vida útil de la batería. A continuación, se profundizará en sus características, su importancia, variables de medición y problemas asociados:

### 2.4.1 Alta Capacidad Específica

La capacidad específica es un indicador del almacenamiento energético por unidad de masa. Cuanto mayor sea la propiedad, mayor será la energía que la batería puede ofrecer, permitiendo la fabricación de dispositivos más duraderos o vehículos eléctricos con mayor autonomía. La unidad de medida es Amperios-hora por gramo (Ah/g). Algunos de los problemas más frecuentes que experimentan las baterías Li-ión son desvanecimiento de la capacidad específica debido a la formación de películas aislantes en el cátodo o desajustes estructurales en el material. Estos problemas ocurren debido a reacciones parásitas o inestabilidades químicas del material. Se ha demostrado que la aplicación de recubrimientos protectores en el cátodo puede prevenir la formación de películas aislantes [33].

La Figura 8 muestra una comparación gráfica entre diferentes materiales catódicos en términos de potencial (V) frente a  $\text{Li}/\text{Li}^+$  y capacidad específica (mAh/g), destacando sus estructuras cristalinas y cómo estas afectan las propiedades de los materiales.

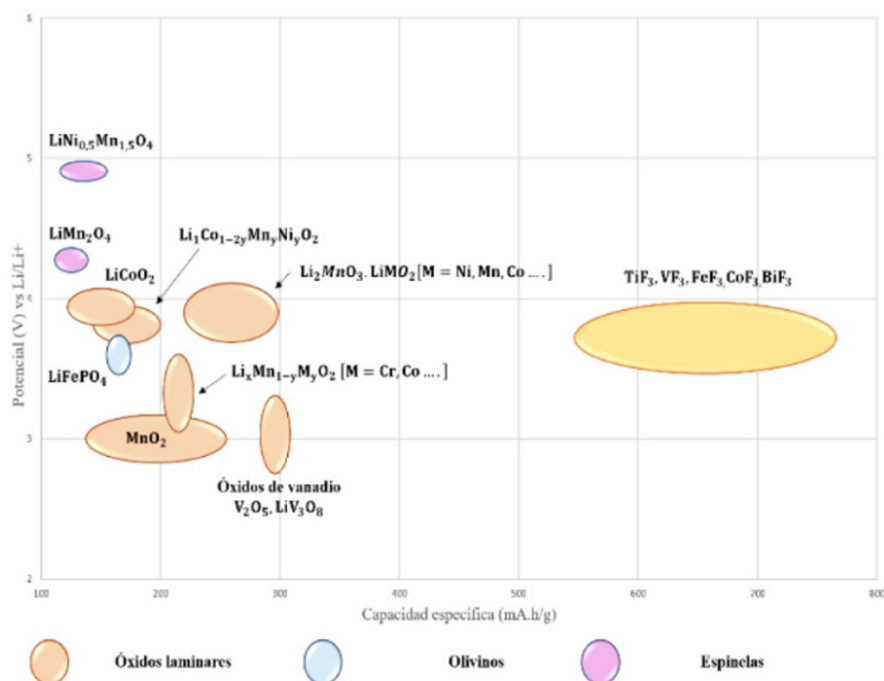


Figura 8: Comparación de materiales catódicos en función del potencial (V) frente  $\text{Li}/\text{Li}^+$  y capacidad específica (mAh/g) [34].

#### **2.4.2 Alta Estabilidad Cíclica:**

Una batería con buena estabilidad cíclica puede ser cargada y descargada repetidamente sin una pérdida significativa de rendimiento, maximizando la vida útil del dispositivo y reduciendo los residuos. Se mide a través del número de ciclos antes de que la capacidad se reduzca a un porcentaje específico de su valor inicial. Desafortunadamente la degradación estructural del cátodo, así como la expansión y contracción durante ciclos, puede comprometer su integridad, resultando en un menor número de ciclos efectivos. Se han planteado diversas formas de solucionar este problema. Por ejemplo, se puede mejorar la integridad estructural del cátodo a través de tratamientos térmicos o modificaciones estructurales, al ser dopado, puede ayudar a resistir la expansión y contracción [35]. Los aditivos en el electrolito también pueden mejorar la interfaz cátodo-electrolito, reduciendo la degradación [36].

#### **2.4.3 Amplio Potencial de Voltaje:**

El voltaje en una celda de batería es crucial porque amplifica la energía total entregada, lo que mejora la densidad energética y, en consecuencia, la eficiencia del dispositivo. Esta variable se mide en voltios (V). Sin embargo, un voltaje elevado puede intensificar el estrés químico en el electrolito, lo que podría provocar reacciones indeseables y una degradación prematura de la batería. Para mitigar estos problemas, es recomendable utilizar electrolitos estables a altos potenciales y aplicar recubrimientos protectores en el cátodo, lo que reduce el estrés químico y las reacciones parásitas. Además, es beneficioso investigar nuevas tecnologías químicas de electrolitos que sean intrínsecamente estables a mayores voltajes, para mejorar la durabilidad y el rendimiento de la batería [37].

#### **2.4.4 Buena Conductividad Iónica y Electrónica:**

Es esencial tener una buena conductividad en una celda de batería, ya que asegura que los iones y electrones se muevan libremente, lo que facilita un proceso de carga y descarga rápida y eficiente. Esta conductividad se mide en Siemens por metro (S/m) para la conductividad eléctrica y para la conductividad iónica. Sin embargo, la pérdida de conductividad puede ser un problema frecuente, originado por la degradación del material, la formación de películas aislantes o la presencia de contaminantes en el cátodo. Para abordar estos desafíos, la incorporación de aditivos conductores o la creación de composites con materiales conductores puede mejorar la conductividad. Además, el diseño nanoestructurado puede facilitar caminos más cortos para la conducción, optimizando así el rendimiento general de la batería [38].

#### **2.4.5 Estabilidad Térmica y Química:**

Un cátodo estable es crucial para reducir el riesgo de fallos catastróficos, como explosiones o incendios, y garantizar una operación segura incluso en condiciones adversas. Las variables clave para medir la estabilidad del cátodo incluyen la temperatura de descomposición y el calor de reacción. Sin embargo, algunos materiales catódicos pueden descomponerse a altas temperaturas, liberando gases y calor, lo que podría desencadenar reacciones en cadena peligrosas. Para mitigar estos riesgos, es recomendable optar por materiales catódicos inherentemente estables o modificar químicamente el cátodo para mejorar su estabilidad. Además, el uso de sistemas de gestión térmica en dispositivos y vehículos es esencial para mantener las baterías dentro de un rango de temperatura segura, asegurando así un funcionamiento fiable y duradero [39].

#### **2.4.6 Facilidad de Síntesis y Escalabilidad:**

Para que una batería sea comercialmente viable, es fundamental que sus componentes, incluido el cátodo, puedan ser fabricados a gran escala y a costos razonables. Las variables claves para evaluar esta viabilidad incluyen el costo por gramo, el tiempo de síntesis y la complejidad del proceso. Sin embargo, uno de los problemas frecuentes es que la síntesis de algunos materiales avanzados puede requerir condiciones extremas o reactivos caros, lo que limita su adopción a gran escala. Para superar estos desafíos, es necesario investigar rutas de síntesis alternativas que dependan menos de condiciones extremas o reactivos costosos. Además, la automatización y la optimización del proceso de fabricación pueden contribuir significativamente a reducir costos y tiempos de producción, haciendo que las baterías sean más accesibles y competitivas en el mercado [40].

#### **2.4.7 Compatibilidad con Electrolitos:**

La interacción eficiente entre el cátodo y el electrolito es crucial para el rendimiento y longevidad de una celda electroquímica. La estabilidad electroquímica del cátodo en presencia del electrolito es una métrica clave en esta interacción. La incompatibilidad entre ambos puede inducir reacciones parásitas, consumiendo el electrolito y reduciendo la vida útil de la batería. La selección de electrolitos modificados o diseñados es esencial para asegurar compatibilidad electroquímica con el cátodo, al igual que lo es la aplicación de recubrimientos protectores en la superficie del cátodo para mitigar reacciones adversas y garantizar un desempeño electroquímico estable [41].

## 2.5 Materiales Catódicos Analizados

### 2.5.1 Óxido de cobalto y litio (LiCoO<sub>2</sub>)

Uno de los materiales catódicos más destacados es el óxido de cobalto y litio (LiCoO<sub>2</sub> o LCO). Este material, introducido en la década de 1980, sigue siendo ampliamente utilizado debido a sus propiedades únicas y rendimiento confiable [42]. El LCO tiene una estructura cristalina (Figura 9) tipo "roca de sal" basada en el empaquetamiento hexagonal cerrado de aniones de oxígeno. En esta estructura, los iones de litio se desplazan entre las capas de óxido de cobalto durante los procesos de carga y descarga. La estabilidad estructural proporcionada por la disposición hexagonal es una de las razones por las que el LCO ha sido una opción popular para los cátodos de LIBs. Posee 7.6 % Li, 64.5% Co y 35% O.

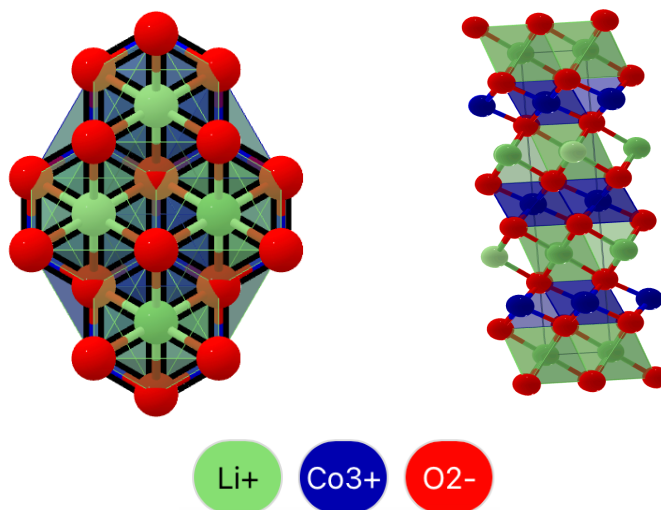


Figura 9: Estructura cristalina del material catódico LCO [43].

#### Parámetros de Rendimiento

1. **Número de Ciclos:** Las baterías con cátodo de LCO ofrecen entre 500 y 1000 ciclos antes de que la capacidad se degrade al 80% de su valor original, dependiendo de las condiciones operativas y de diseño específicas.
2. **Capacidad Específica:** El LCO tiene una capacidad específica en el rango de 135-140 mAh/g, lo que lo convierte en una opción eficiente en términos de capacidad por peso.

3. **Potencia:** Si bien el LCO es conocido por su alta capacidad específica, no es necesariamente el material catódico más potente disponible. Sin embargo, con optimizaciones adecuadas en el diseño de la batería, puede ofrecer un rendimiento de potencia satisfactorio.
4. **Voltaje:** Las baterías basadas en LCO operan con un voltaje nominal de 3,7 V, con voltajes máximos que se acercan a 4,2 V.
5. **Densidad de Energía:** Gracias a su alta capacidad específica y voltaje operativo, el LCO puede ofrecer densidades de energía superiores a 200 Wh/kg, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos, como en dispositivos electrónicos portátiles.

Desde su introducción, el óxido de cobalto y litio ha sido un pilar en la industria de las baterías de iones de litio. Su estructura cristalina, que favorece tanto la difusión de iones de litio como la estabilidad estructural, combinada con su alta capacidad específica y densidad de energía, lo hacen ideal para una variedad de aplicaciones. Aunque hay preocupaciones sobre la sostenibilidad y el costo del cobalto, y existen alternativas emergentes que buscan ofrecer un rendimiento similar o incluso superior, el LCO sigue siendo una referencia en la tecnología LIB y probablemente seguirá siendo un material relevante en la industria durante muchos años más.

### 2.5.2 Óxido de manganeso y litio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )

Dentro del vasto panorama de los materiales catódicos utilizados en baterías de ion-litio, el óxido de manganeso y litio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  o LMO) emerge como una opción relevante por una serie de características y ventajas que presenta, a pesar de algunos retos inherentes a su naturaleza. En el siguiente análisis, abordaremos profundamente las propiedades generales del LMO, haciendo énfasis en su estructura cristalina, composición elemental y parámetros clave de rendimiento [44]. El LMO posee una estructura cristalina tipo espinela (Ver Figura 10). Este arreglo permite una rápida difusión de iones de litio, gracias a un sistema de canales 3D. Esta estructura, además de facilitar la cinética de inserción y extracción de litio, proporciona un alto grado de estabilidad estructural al material, incluso después de múltiples ciclos de carga y descarga. Posee 3.7 % Li, 58.7% Mn y 37.6% O.

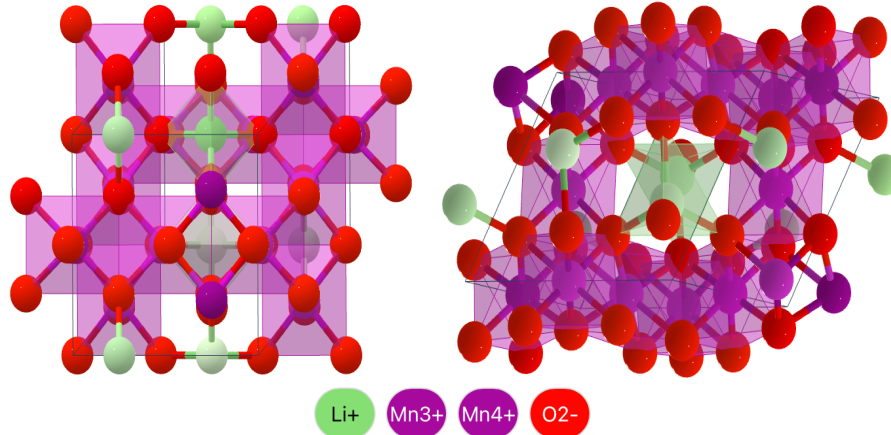


Figura 10: Estructura cristalina del material catódico LMO [45].

### Parámetros de Rendimiento

1. **Número de Ciclos:** LMO ha demostrado una vida útil moderada, ofreciendo alrededor de 300-1000 ciclos dependiendo de las condiciones de operación, antes de que su capacidad se degrade al 80% de la original.
2. **Capacidad Específica:** El LMO ofrece una capacidad específica en el rango de 100-120 mAh/g. Este valor es competitivo en comparación con otros materiales catódicos, pero puede ser inferior a algunas de las alternativas más modernas.
3. **Potencia:** Gracias a la rápida difusión de iones de litio en su estructura tipo espinela, el LMO ofrece una excelente potencia, haciéndolo adecuado para aplicaciones que requieren descargas rápidas.
4. **Voltaje:** Las baterías basadas en LMO operan en un voltaje nominal de alrededor de 4,0 V, aunque pueden alcanzar voltajes máximos de 4,3 V dependiendo de las condiciones específicas.
5. **Densidad de Energía:** Aunque la densidad de energía del LMO puede ser menor que la de algunos otros materiales catódicos, todavía ofrece valores en el rango de 100-130 Wh/kg. Este rango es adecuado para muchas aplicaciones, aunque quizás no para aquellas que requieren la máxima densidad de energía posible.

El óxido de manganeso y litio es una elección sólida en el ámbito de los materiales catódicos para baterías de ion-litio. Su estructura tipo espinela y la inherente rapidez de difusión de iones de litio le otorgan propiedades deseables en términos de potencia y estabilidad cíclica. Aunque puede no tener la mayor densidad de energía o la vida útil más larga en comparación con algunos otros materiales, el LMO sigue siendo un pilar en la industria, especialmente cuando se consideran factores como costos y disponibilidad. Como con todos los materiales,

es esencial equilibrar las ventajas y desventajas del LMO en función de la aplicación específica y las demandas del mercado.

### 2.5.3 Óxido de hierro y litio ( $\text{LiFePO}_4$ )

Las baterías de iones de litio han transformado la industria energética con su capacidad para alimentar desde pequeños dispositivos electrónicos hasta vehículos eléctricos. Una de las variantes más prometedoras y sostenibles de estos dispositivos es el cátodo basado en el compuesto óxido de hierro y litio ( $\text{LiFePO}_4$  o LFP). Veamos en detalle este material catódico y sus características [46].  $\text{LiFePO}_4$  pertenece a la familia de materiales olivino (ver Figura 11), tomando su nombre de su estructura cristalina que se asemeja a la del mineral olivino. La estructura olivino de  $\text{LiFePO}_4$  proporciona canales unidimensionales, lo que permite la rápida difusión de iones de litio durante la carga y descarga. Esta estructura es especialmente estable, lo que contribuye a la durabilidad y seguridad del material. Posee 3.7% Li, 29.7%Fe, 16.5%P y 34.1%O.

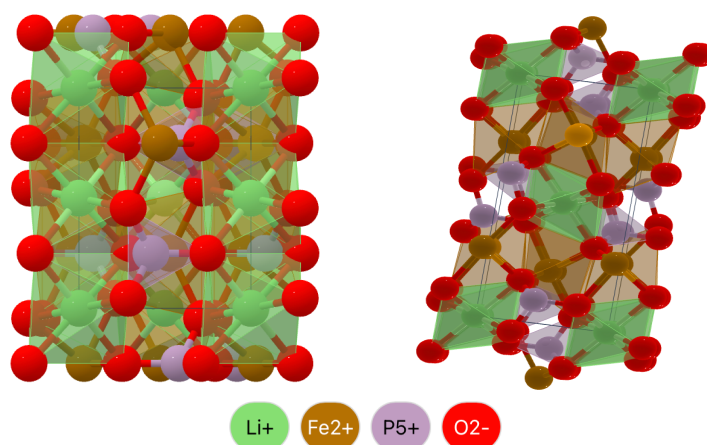


Figura 11: Estructura cristalina del material catódico LFP [47].

#### Parámetros de Rendimiento

1. **Número de Ciclos:** Una de las ventajas significativas de las baterías LFP es su longevidad. Pueden soportar entre 2000 y 3000 ciclos de carga y descarga antes de que su capacidad se reduzca al 80% de su capacidad original.
2. **Capacidad Específica:**  $\text{LiFePO}_4$  tiene una capacidad específica de aproximadamente 170 mAh/g. Aunque no es tan alto como algunos otros materiales catódicos, su robustez y seguridad compensan esta diferencia en aplicaciones específicas.

3. **Potencia:** Las baterías LFP son conocidas por su excelente capacidad para entregar potencia de alta corriente, lo que las hace adecuadas para aplicaciones como vehículos eléctricos y herramientas eléctricas.
4. **Voltaje:**  $\text{LiFePO}_4$  opera a un voltaje nominal más bajo en comparación con otros cátodos de iones de litio, alrededor de 3,2 V.
5. **Densidad de Energía:** Aunque su densidad de energía, en el rango de 90-120 Wh/kg, no es tan alta como la de otros materiales catódicos, su seguridad y longevidad son ventajas compensatorias.

La estructura cristalina estable de  $\text{LiFePO}_4$  lo hace inherentemente seguro, con una resistencia superior a las temperaturas extremas en comparación con otros cátodos. Además, el hierro es abundante, barato y no tóxico, lo que da ventajas en términos de costo y sostenibilidad.

#### 2.5.4 Óxido de níquel, manganeso y cobalto ( $\text{Li}(\text{Ni}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33})\text{O}_2$ )

Dentro del amplio espectro de materiales catódicos utilizados en baterías de iones de litio, el óxido de níquel, manganeso y cobalto (NMC) se han establecido como una opción predilecta por su equilibrio entre rendimiento, durabilidad y seguridad. Las baterías NMC han encontrado aplicaciones en una amplia variedad de campos, desde vehículos eléctricos hasta almacenamiento de energía en redes eléctricas. A continuación, se presentan las características generales de este prominente material catódico.

Las baterías NMC tienen una estructura cristalina de tipo lámina (ver Figura 12). Esta estructura permite la intercalación y desintercalación de iones de litio durante los procesos de carga y descarga, esencial para el funcionamiento de la batería. La estructura laminar ofrece canales abiertos que facilitan el movimiento de iones de litio, mejorando la velocidad de carga y descarga [48]. El material NMC se compone de tres metales: níquel, manganeso y cobalto. La relación entre estos tres elementos puede variar según las necesidades específicas de la aplicación. Comúnmente, se encuentran relaciones como NMC111 (33% de cada metal), NMC622 (60% níquel, 20% manganeso, 20% cobalto) y NMC811 (80% níquel, 10% manganeso, 10% cobalto), entre otras. La variación en las proporciones afecta tanto al rendimiento como a la longevidad y seguridad del cátodo.

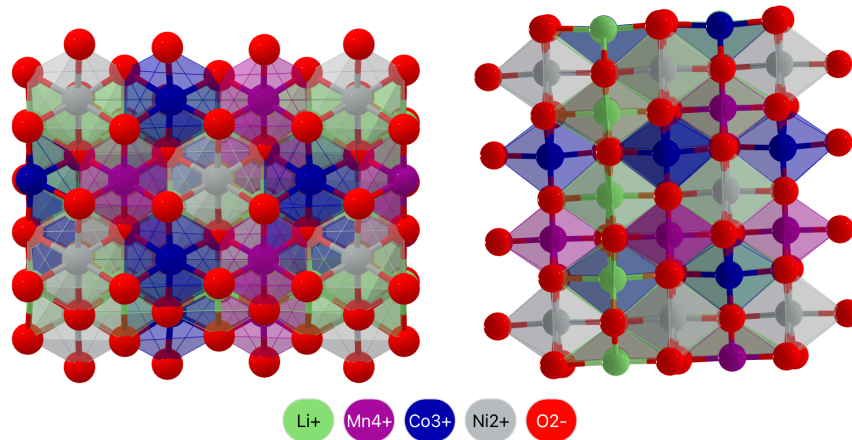


Figura 12: Estructura cristalina del material catódico NMC [49].

### Parámetros de Rendimiento

1. **Número de Ciclos:** Las baterías NMC, en función de su composición exacta y uso, pueden soportar entre 1000 y 2000 ciclos de carga y descarga antes de que su capacidad se reduzca significativamente. Las versiones con mayor contenido de níquel tienden a tener una vida útil más corta debido a la menor estabilidad térmica del níquel.
2. **Capacidad Específica:** La capacidad específica de las baterías NMC varía según la composición, pero suele oscilar entre 140 y 200 mAh/g, siendo las versiones con mayor contenido de níquel las que presentan una capacidad superior.
3. **Potencia:** Al tener una resistencia interna relativamente baja, las baterías NMC pueden ofrecer una alta potencia, adecuada para aplicaciones como vehículos eléctricos que requieren aceleraciones rápidas.
4. **Voltaje:** El voltaje nominal de las baterías NMC es de aproximadamente 3,7 V, lo que contribuye a su alta densidad energética y eficiencia.
5. **Densidad de Energía:** La densidad energética de las baterías NMC es una de las más altas entre las baterías de iones de litio, oscilando entre 150 y 220 Wh/kg, dependiendo de la composición específica y otros factores de diseño.

Las baterías NMC ofrecen un equilibrio óptimo entre capacidad, vida útil y seguridad. Su versatilidad les permite ser utilizadas tanto en vehículos eléctricos (donde la densidad energética y la potencia son cruciales) como en sistemas de almacenamiento de energía a gran escala (donde la durabilidad y la seguridad son primordiales). Con el aumento en la proporción de níquel, las baterías NMC pueden alcanzar una densidad energética más alta,

lo que es beneficioso para vehículos eléctricos, ya que permite una mayor autonomía. Sin embargo, esto a menudo se logra a expensas de la estabilidad térmica y la vida útil.

A continuación, se presenta la Tabla 2 comparativa con los parámetros más específicos de los distintos materiales catódicos, destacando aspectos clave como la estructura cristalina, capacidad específica, densidad de energía, número de ciclos y voltaje nominal. Esta comparación permite evaluar las fortalezas y limitaciones de cada material para aplicaciones específicas.

Tabla 2: Desempeño de los materiales catódicos.

Material Catódico	Estructura Cristalina	Capacidad Específica (mAh/g)	Densidad de Energía (Wh/kg)	Número de Ciclos	Voltaje Nominal (V)
<i>LiCoO<sub>2</sub></i> (LCO)	Hexagonal	135-140	>200	500-1000	3,7
<i>LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub></i> (LMO)	Espinel	100-120	100-130	600-1000	4
<i>LiFePO<sub>4</sub></i> (LFP)	Olivino	110-140	90-120	2000-3000	3,2
NMC	Laminar	140-200	180-220	1000-2000	3,7

## 2.6 Tipos de síntesis

### 2.6.1. Método Estado Sólido

La síntesis en estado sólido es una técnica fundamental en la fabricación de materiales catódicos para baterías de iones de litio, valorada por su eficiencia y la calidad superior de los productos finales. Este método tradicional se caracteriza por su relativa sencillez y costos operativos bajos, lo que lo hace atractivo para la producción a gran escala.

El proceso comienza con la selección cuidadosa de precursores sólidos de alta pureza (ver Figura 13), como sales o compuestos de los elementos requeridos. Estos precursores se trituran y mezclan hasta alcanzar una composición homogénea. Posteriormente, la mezcla se somete a un tratamiento térmico, donde ocurren las reacciones químicas necesarias para formar el compuesto catódico [50].

Las variables críticas en este proceso incluyen la elección de precursores, la temperatura de calcinación, la atmósfera de calcinación y el tiempo de trituración. Una selección adecuada de estos factores es crucial para garantizar la eficiencia del proceso y la calidad del material catódico resultante. Los materiales catódicos producidos mediante este método incluyen óxidos de cobalto y litio ( $\text{LiCoO}_2$ ), óxidos de manganeso y litio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), óxidos de hierro y litio ( $\text{LiFePO}_4$ ), y combinaciones más complejas como el óxido de níquel, manganeso y cobalto (NMC).

En cuanto a los costos de producción, la síntesis en estado sólido ofrece una excelente relación costo-beneficio, especialmente para la fabricación a gran escala. Los costos asociados incluyen la materia prima, la energía requerida para el tratamiento térmico, la mano de obra para la supervisión del proceso y la inversión inicial en equipos como hornos y trituradoras.

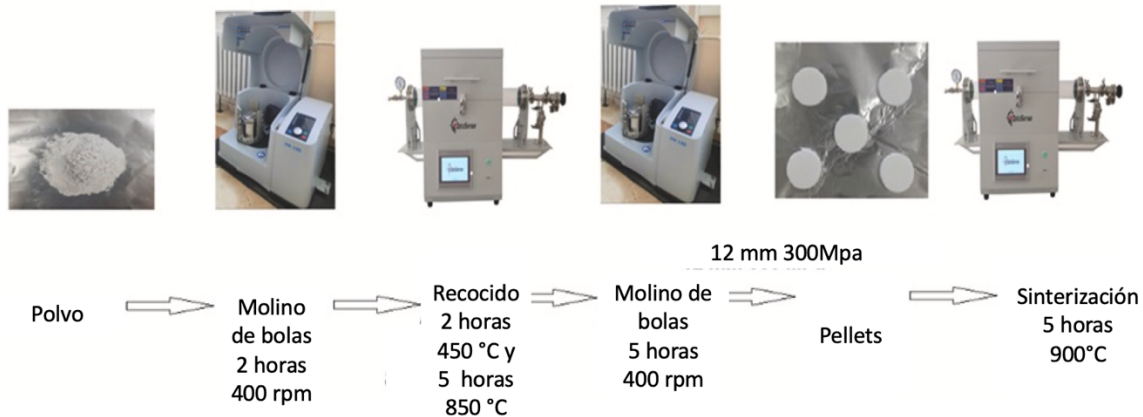


Figura 13: Proceso de síntesis con método estado sólido [51].

## 2.6.2. Método Co-Precipitación

El método de co-precipitación es una técnica avanzada para la síntesis de materiales catódicos en baterías de iones de litio, basada en la precipitación simultánea de varios componentes desde una solución. Este proceso implica modificar condiciones como pH, concentración de iones y temperatura para inducir la formación de un precipitado sólido que contiene los cationes deseados. El precipitado se separa, lava y calcina para producir el material catódico. La concentración de la solución es clave para asegurar la co-precipitación efectiva de todos los componentes. Los agentes precipitantes seleccionados afectan la homogeneidad y morfología del precipitado. La temperatura influye en la tasa y homogeneidad de la precipitación, y el pH es crucial ya que algunos compuestos precipitan en rangos específicos de pH.

El proceso comienza con la preparación de una solución que contiene los cationes necesarios (ver Figura 14), seguido del ajuste de temperatura para la co-precipitación. Se añade el agente precipitante mientras se agita la solución, y se controla el pH durante la precipitación. El precipitado se separa por filtración o centrifugación, se lava para eliminar impurezas y se seca antes de la calcinación final para obtener el material catódico [52].

Los materiales catódicos producidos por co-precipitación incluyen óxidos de níquel, manganeso y cobalto (NMC) y óxidos de níquel, manganeso y aluminio (NMA). Los costos de producción involucran la materia prima, energía para las etapas de secado y calcinación, mano de obra para el monitoreo del proceso y equipamiento especializado para filtración, lavado y calcinación. A pesar de los costos iniciales asociados con los reactivos de alta pureza, la capacidad del método de co-precipitación para producir materiales homogéneos y de alta calidad justifica la inversión, particularmente en la búsqueda de materiales catódicos de alto rendimiento.

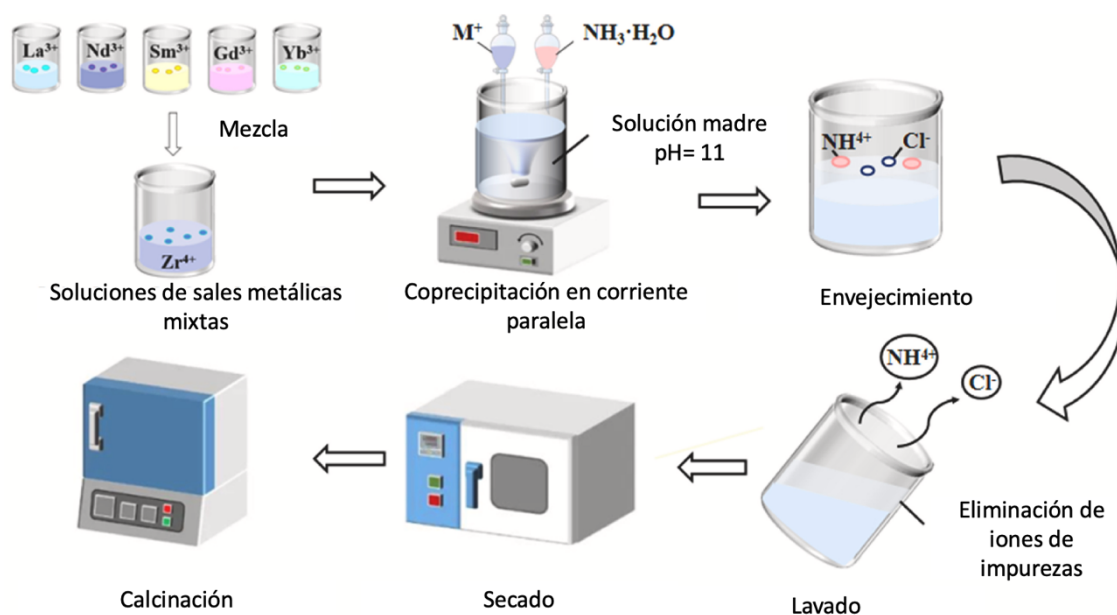


Figura 14: Proceso de síntesis con método co-precipitación [53].

### 2.6.3. Método Sol-Gel

El método sol-gel es una técnica altamente efectiva y versátil para la síntesis de materiales catódicos en baterías de iones de litio. Este proceso implica la transformación de una solución (sol) en una red tridimensional (gel), que luego de un tratamiento térmico, produce el material catódico deseado. El proceso comienza con la formación de un sol a partir de precursores como alcóxidos metálicos o sales inorgánicas (ver Figura 15). Estos precursores se hidrolizan y polimerizan bajo condiciones específicas para formar un gel. A medida que el solvente se evapora, el gel se seca y luego se somete a calcinación para obtener el material catódico final [54].

La selección de precursores es crucial, ya que deben ser capaces de hidrolizarse y polimerizarse eficientemente. El pH influye en la velocidad de hidrólisis y polimerización,

mientras que la concentración afecta la homogeneidad del material. La temperatura de calcinación juega un papel importante en la formación del gel y en la estructura final del material. Además, se pueden utilizar agentes gelificantes para controlar la morfología del gel. El método incluye la preparación del sol, adición de un catalizador para controlar el pH y la velocidad de reacción, formación del gel, envejecimiento del gel, secado y calcinación.

El método sol-gel se ha utilizado para sintetizar diversos materiales catódicos como óxido de níquel, manganeso y cobalto (NMC), óxido de hierro y litio (LiFePO<sub>4</sub>) y óxido de níquel, manganeso y aluminio (NMA). Los costos de producción incluyen la materia prima, energía para la calcinación, mano de obra y equipamiento. Aunque los alcóxidos metálicos pueden ser costosos, la cantidad requerida es menor en comparación con otros métodos.

Esta técnica ofrece la ventaja de producir materiales catódicos de alta calidad y homogeneidad, permitiendo una mayor flexibilidad en la síntesis al incorporar diferentes elementos en la estructura del material de manera controlada.

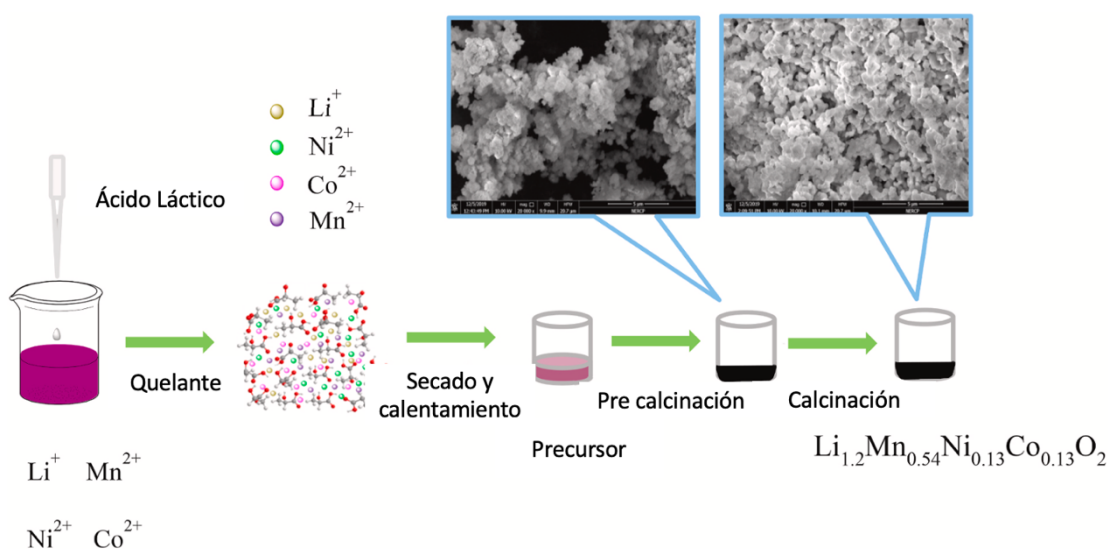


Figura 15: Proceso de síntesis Sol-Gel en material catódico NMC [55].

#### 2.6.4. Método Hidrotermal

Este proceso consiste en la reacción de precursores en un medio acuoso dentro de un autoclave sellado, lo que genera condiciones óptimas para la formación de materiales nanoestructurados con morfologías y tamaños de partícula controlados. El proceso opera en un rango de temperatura entre 120°C y 250 °C y de presión de 2MPa y 20 MPa. La selección de precursores solubles en agua es crucial para una reacción completa (ver Figura 16). Las condiciones de temperatura y presión deben controlarse cuidadosamente y mantenerse constantes durante la reacción, afectando el tamaño de partícula, la morfología y la

cristalinidad del producto final. El pH de la solución también puede influir en la cinética de la reacción y en la formación del producto.

El proceso hidrotermal comienza con la disolución de precursores en agua destilada o desionizada, seguido de la transferencia de la solución a un autoclave, donde se sella y calienta a la temperatura deseada. La temperatura y la presión se mantienen por un tiempo de reacción especificado, después del cual el autoclave se enfría a temperatura ambiente, y el producto precipitado se recoge, lava, seca y, si es necesario, se calcina para obtener el material catódico deseado [56].

Los materiales catódicos producidos por este método incluyen óxido de hierro y litio ( $\text{LiFePO}_4$ ) con morfologías nanoestructuradas y óxido de manganeso y litio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) con tamaños de partícula controlados. También es útil para la síntesis de compuestos complejos como el óxido de níquel, manganeso y cobalto (NMC) cuando se busca una estructura cristalina específica. En cuanto a costos de producción, los de la materia prima pueden aumentar por la necesidad de precursores de alta pureza, y el proceso hidrotermal puede ser intensivo en energía por las altas temperaturas y presiones involucradas. La supervisión constante y el manejo seguro del autoclave requieren personal capacitado, y los autoclaves, especialmente aquellos diseñados para altas presiones, pueden ser costosos.

A pesar de los costos iniciales potencialmente altos, el método hidrotermal puede ser más económico a largo plazo, especialmente considerando los beneficios de producir materiales de alta calidad con propiedades controladas. El método ofrece una ruta de síntesis versátil y controlable para la producción de materiales catódicos avanzados para baterías de iones de litio, y la optimización continua y la adaptación del método a diferentes sistemas de materiales garantizarán su relevancia en el desarrollo futuro de baterías de alto rendimiento.

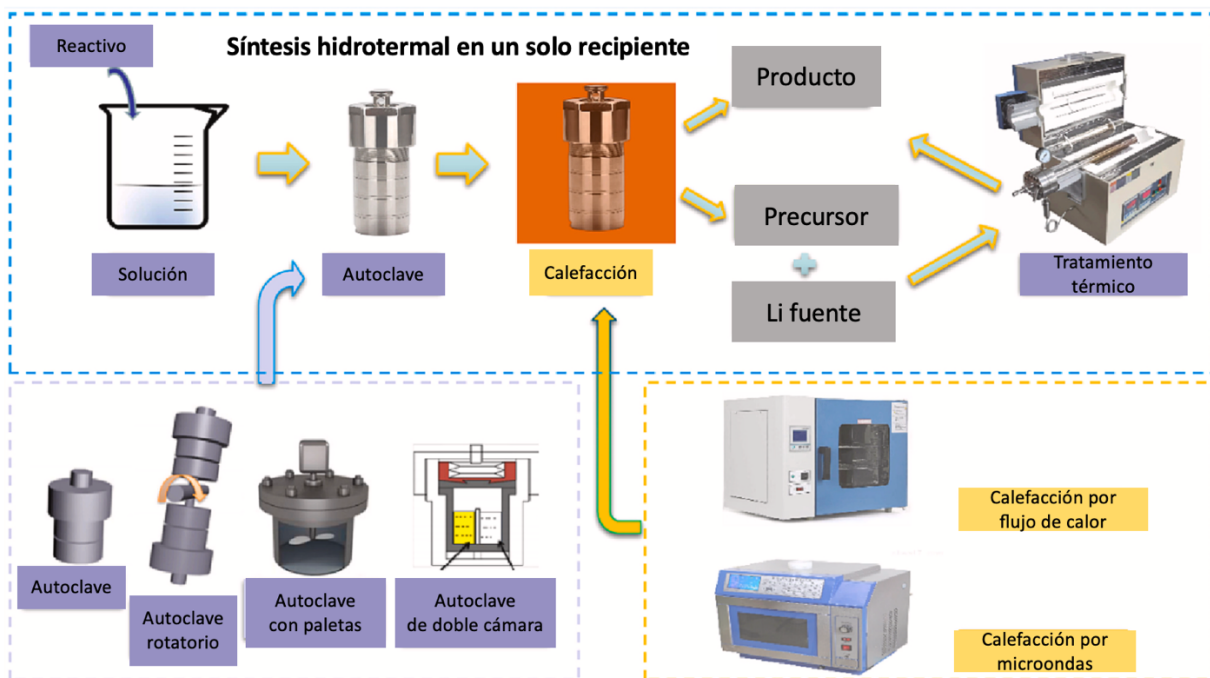


Figura 16: Proceso de síntesis hidrotermal [57].

### 2.6.5. Método Combustión

El método de combustión es eficiente para la producción de materiales catódicos nanoestructurados como  $Li(Ni_{0,6}Co_{0,2}Mn_{0,2})O_2$  (NCM) a partir de baterías de iones de litio recicladas. Este proceso consiste en una reacción exotérmica auto-sostenida entre un precursor oxidante y un agente reductor, liberando calor rápidamente para sintetizar los materiales deseados (ver Figura 17). Aunque la reacción puede comenzar a temperatura ambiente, la temperatura interna alcanza niveles elevados debido a la naturaleza exotérmica de la combustión.

Para lograr una combustión eficiente, es fundamental seleccionar precursores específicos. El ácido oxálico se utiliza como oxidante, mientras que agentes reductores como el ácido cítrico o la mezcla de CTAB (bromuro de cetiltrimetilamonio) y PVP (polivinilpirrolidona) controlan la morfología y el tamaño de las partículas finales. La correcta proporción entre el oxidante y el reductor es crucial para asegurar una combustión completa.

El proceso comienza con la disolución de precursores metálicos en ácido nítrico ( $HNO_3$ ), seguido de la adición del agente reductor. Al calentar la mezcla, se inicia la reacción de combustión, lo que puede manifestarse en una llamarada cuando se usan combustibles como CTAB o ácido cítrico. Tras la combustión, el polvo resultante se calcina para obtener el material catódico, que se muele y procesa según sea necesario [58].

Este método permite regenerar materiales catódicos como el NCM con alta calidad cristalina y mejores propiedades electroquímicas, aunque se requiere supervisión constante debido a la naturaleza exotérmica de la reacción. Los costos pueden aumentar por la necesidad de reactivos de alta pureza y energía para la calcinación, así como por el equipo de laboratorio necesario para garantizar la seguridad del proceso.

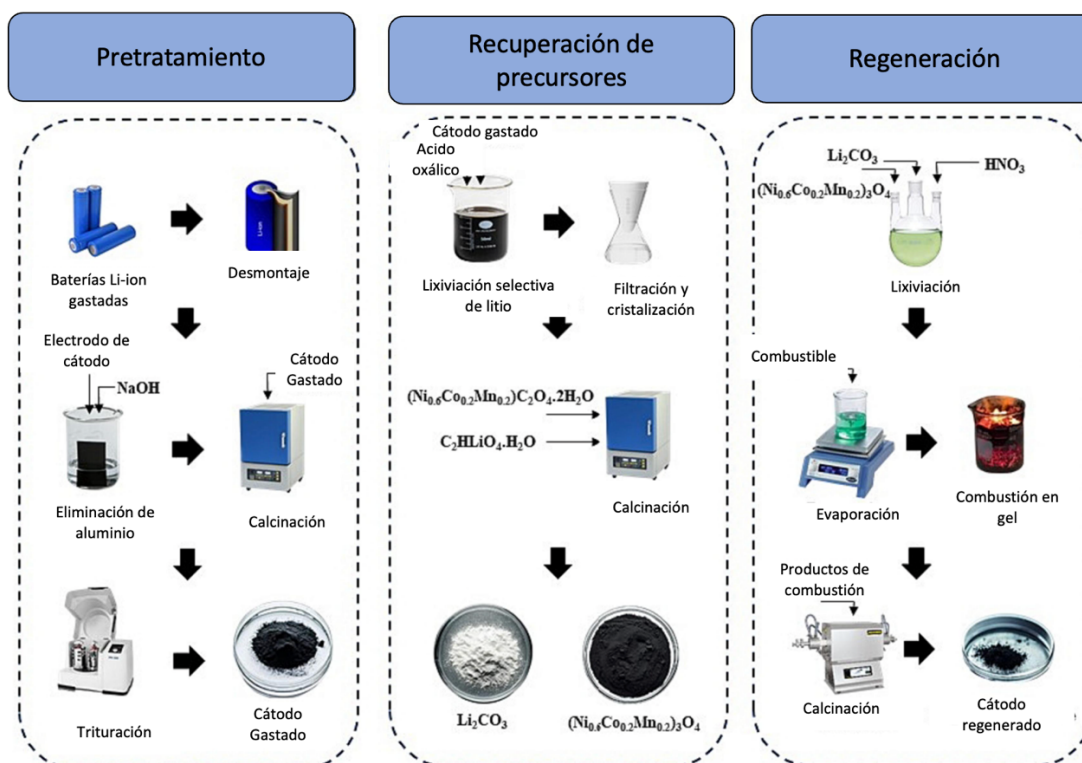


Figura 17: Proceso de síntesis por combustión en material catódico NMC [59].

## 2.6.6. Método de Secado Pulverizado

Este método se basa en la síntesis de compuestos en soluciones acuosas a altas temperaturas, que pueden alcanzar hasta los 200-300°C y presiones que oscilan entre 10 y 50 MPa. Este proceso implica reacciones de precursores en un medio acuoso dentro de un autoclave sellado, creando condiciones óptimas para la formación de materiales nanoestructurados con morfologías y tamaños de partícula controlados.

El proceso comienza con la disolución de precursores en agua destilada o desionizada, seguido de la transferencia de la solución a un autoclave, donde se sella y calienta a temperaturas entre 180-250°C durante un periodo de reacción entre 12 y 24 horas (ver Figura 18), después del cual el autoclave se enfría a temperatura ambiente, y el producto precipitado se recoge, lava, seca y, si es necesario, se calcina para obtener el material catódico deseado [60]. Los materiales catódicos producidos por este método incluyen óxido de hierro y litio

(LiFePO<sub>4</sub>) con morfologías nanoestructuradas y óxido de manganeso y litio (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) con tamaños de partícula controlados. También es útil para la síntesis de compuestos complejos como el óxido de níquel, manganeso y cobalto (NMC) cuando se busca una estructura cristalina específica.

En cuanto a costos de producción, los de la materia prima pueden aumentar por la necesidad de precursores de alta pureza, y el proceso hidrotérmal puede ser intensivo en energía por las altas temperaturas y presiones involucradas. La supervisión constante y el manejo seguro del autoclave requieren personal capacitado, y los autoclaves, especialmente aquellos diseñados para altas presiones, pueden ser costosos.

Aunque los costos iniciales pueden ser elevados, el método hidrotérmal puede resultar más rentable a largo plazo debido a los beneficios de obtener materiales de alta calidad con propiedades bien controladas. Se estima que los costos operativos de este proceso pueden reducirse entre un 15% y 20% en comparación con métodos convencionales, gracias a su eficiencia en la manipulación precisa de la morfología y el tamaño de las partículas. Este enfoque proporciona una vía de síntesis versátil y ajustable para la producción de materiales catódicos avanzados destinados a baterías de iones de litio. Con la continua optimización y adaptación a distintos sistemas de materiales, se prevé que este método mantenga su competitividad en el desarrollo de baterías de alto rendimiento, especialmente en aplicaciones que requieren características como mayor densidad energética y ciclos de vida.

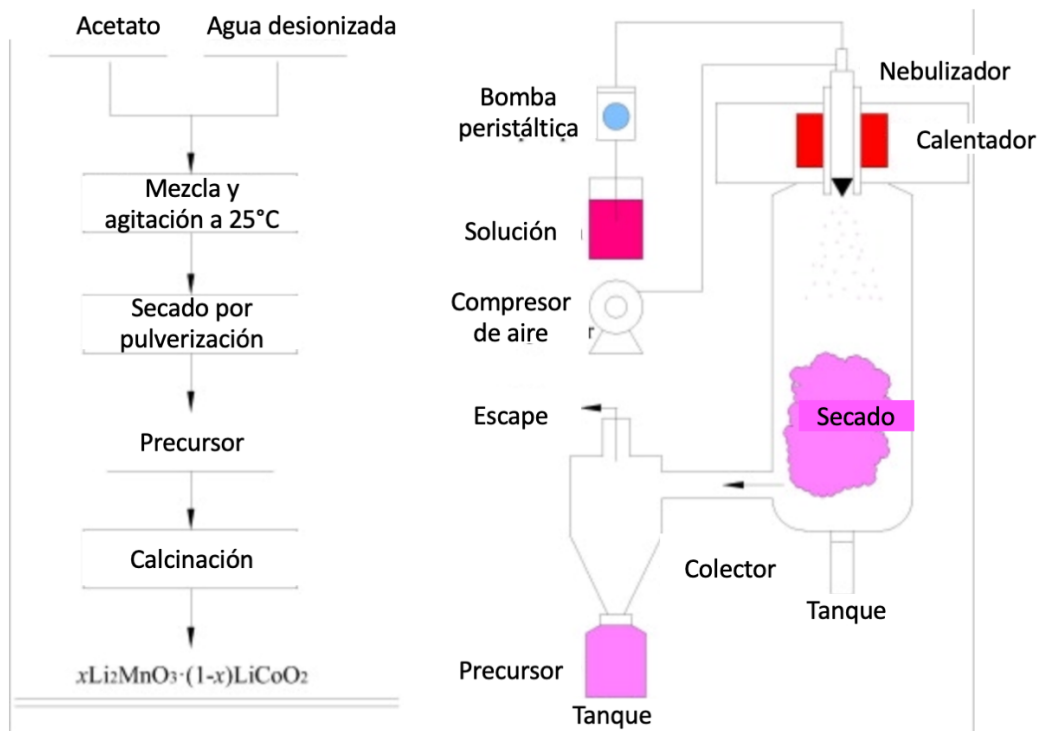


Figura 18: Proceso de síntesis por método secado pulverizado [61]

Tabla 3: Principales características de los métodos de síntesis de materiales catódicos.

Método de síntesis	Principales Precursores	Temperatura de Proceso °C	Tiempo de Proceso horas	Ventajas	Desventajas	Aplicación
Estado sólido	Sales Metálicas.	700 a 1000	12 a 24	Bajo costo, adecuado para producción en masa, simplicidad del equipo.	Requiere altas temperaturas, no siempre garantiza homogeneidad perfecta.	LCO, LMO, NMC y LFP
Co-precipitación	Sales Metálicas en solución.	80 a 100	2 a 6	Alta homogeneidad, control de tamaño y morfología de partículas, mayor rendimiento electroquímico	Requiere activos de alta pureza y costos iniciales elevados	NMC
Sol-gel	Alcóxidos metálicos o sales inorgánicas.	400 a 800	5 a 10	Buena homogeneidad, control preciso de morfología, mayor flexibilidad para incorporar elementos	Precusores costosos, necesita calcinación adicional para eliminar impurezas.	NMC y LFP
Hidrotermal	Sales solubles en agua.	120 a 250	12 a 24	Control de tamaño de partículas, buena cristalinidad, adecuada para materiales nanoestructurados.	Equipos especializados (autoclave) y control de presión y temperatura precisos.	LFP, LMO y NMC
Combustión	Sales metálicas y agentes reductores.	Inicia a T° ambiente	Reacción rápida (minutos)	Alta velocidad de síntesis y uso eficiente de energía.	Reacción exotérmica requiere monitoreo cuidadoso y difícil control de morfología.	NMC
Secado Pulverizado	Sales Metálicas en solución.	180 a 250	12 a 24	Control preciso de morfología, proceso a alta presión y temperatura.	Necesidad de precursores de alta pureza, intensivo en energía y equipamiento.	LFP, LMO y NMC

## 2.7 Técnicas de mejoras

### 2.7.1. Dopaje

El dopaje en baterías de iones de litio, especialmente en materiales catódicos, es un proceso crucial para optimizar sus propiedades electroquímicas. El dopaje implica la introducción controlada de átomos o iones en la estructura cristalina del material catódico, lo que afecta significativamente su comportamiento y rendimiento. Este proceso puede mejorar la capacidad, la estabilidad térmica y la vida útil de las baterías (ver Figura 19).

En materiales catódicos como el óxido de manganeso y litio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) y el fosfato de hierro y litio ( $\text{LiFePO}_4$ ), la incorporación de nuevos elementos puede aumentar la conductividad eléctrica y mejorar la estabilidad estructural del material. Por ejemplo, la introducción de manganeso (Mn) en los cátodos ricos en níquel (Ni) aumenta la estabilidad térmica y estructural, reduciendo la exposición directa de Ni altamente reactivo en la superficie del material catódico, mitigando así las reacciones secundarias que causan la pérdida de capacidad reversible [62].

El dopaje puede realizarse durante la síntesis del material catódico o mediante tratamientos posteriores. Por ejemplo, el dopaje con elementos como cromo (Cr) y fósforo (P) puede mejorar la capacidad de descarga y la estabilidad de ciclo de materiales catódicos ricos en litio [63]. Además, el dopaje de zinc (Zn) en  $\text{LiFePO}_4$  puede mejorar su rendimiento electroquímico sin destruir su estructura de red cristalina.

También es posible modificar las propiedades de los cátodos de NMC ( $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ). Por ejemplo, al añadir halógenos como flúor (F), azufre (S) y cloro (Cl) puede mejorar la estabilidad térmica y vida útil del material, así como reducir la degradación estructural. No obstante, estas modificaciones también pueden disminuir la conductividad iónica, lo que afectaría en la capacidad de descarga rápida y la eficiencia del ciclo, revelando así características dependientes de la distancia entre los átomos en la estructura cristalina [64].

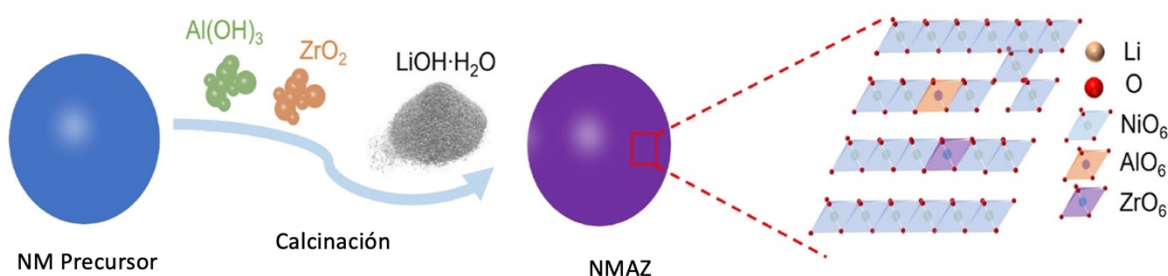


Figura 19: Dopaje en material catódico NMC [65].

## 2.7.2. Recubrimiento

El recubrimiento en materiales catódicos de baterías de iones de litio es un proceso crucial para la mejora de sus propiedades electroquímicas y la estabilidad a largo plazo. Esta técnica implica la aplicación de una capa protectora sobre la superficie del material catódico, lo cual previene la degradación durante los ciclos de carga y descarga, incrementa la conductividad y mejora tanto la estabilidad térmica como la vida útil de la batería. Esto se puede ilustrar en la Figura 20, en donde se aplica una capa protectora como  $Li_3PO_4$ , sobre partículas de LZTO (Litio titanio óxido de zinc). Este proceso reduce la aglomeración y protege el material de ataques químicos, como el causado por HF, mejorando la estabilidad estructural y facilitando el transporte de iones de litio ( $Li^+$ ), lo que optimiza el rendimiento electroquímico. Este enfoque también se utiliza en materiales como  $LiFePO_4$  y  $LiMn_2O_4$ , que se benefician de una mayor estabilidad y capacidad de descarga gracias al recubrimiento.

A continuación, se detallan algunos puntos clave:

### a. Recubrimientos Superficiales

Los recubrimientos superficiales en materiales catódicos pueden mejorar significativamente la vida útil y la capacidad de carga de las baterías de iones de litio. Estos recubrimientos se dividen en configuraciones como recubrimientos rugosos, estructuras de núcleo-cáscara y películas ultrafinas. Estos métodos han demostrado ser eficaces para mejorar el rendimiento del cátodo al proporcionar una barrera protectora que previene la degradación del material [66].

### b. Prevención de Degradación

La degradación del material catódico durante los ciclos de carga es uno de los principales desafíos para las baterías de alta energía. Las estrategias de recubrimiento pueden prevenir las transiciones de fase y las grietas en las partículas del cátodo, mejorando la retención de capacidad y la estabilidad en condiciones de alta temperatura [67].

### c. Recubrimientos Híbridos

Los recubrimientos híbridos, que combinan diferentes materiales y técnicas, pueden proporcionar mejoras sinérgicas en las propiedades electroquímicas. Estos recubrimientos híbridos ofrecen una alta capacidad reversible y una excelente retención de capacidad durante ciclos prolongados. Este enfoque también puede simplificar el procedimiento técnico y reducir los costos, haciendo viable su aplicación a gran escala [68].

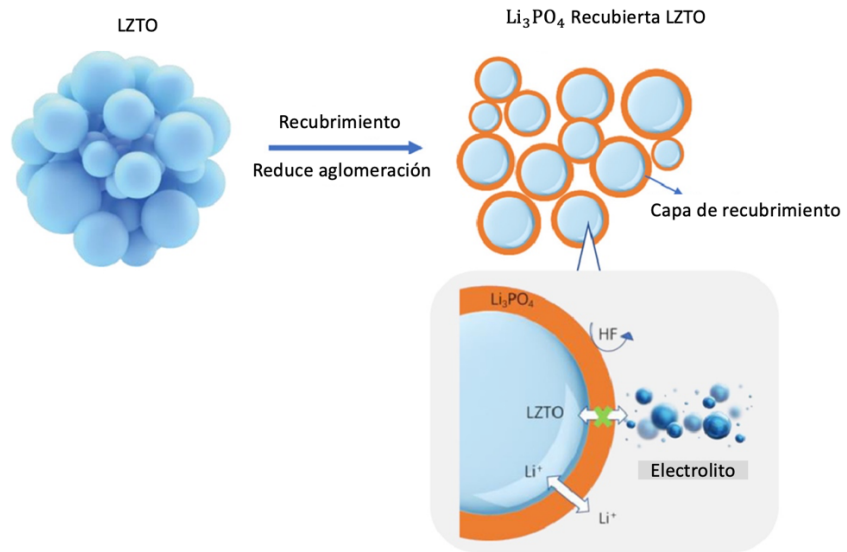


Figura 20: Recubrimiento en material catódico LFP [69].

### III. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para realizar el estudio de esta memoria, en primer lugar se analizó el funcionamiento, las características y las variables relevantes de las baterías de ion litio, revisando un total de 27 artículos científicos ( [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [35], [36], [37], [38], [39], [40] y [41]).

En el caso de los materiales catódicos, se investigaron 12 artículos sobre LCO ( [42], [43], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78] y [79] ), 12 sobre LMO ( [44], [45], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86] y [87]), 8 sobre LFP ( [46], [47], [88], [89], [90], [91], [92] y [93] ) y 10 sobre NMC ( [48], [49], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100] y [101] ). En este análisis, se consideraron la estructura cristalina, la capacidad de carga, la densidad energética, el número de ciclos, la eficiencia y, por último, los efectos de dopar y recubrir los distintos materiales catódicos.

Para el análisis de los costos de fabricación, se utilizó el software BAT-PAC. Los criterios de selección incluyeron el tipo de electrodo, el diseño de la batería, el sistema de gestión térmica, los requisitos de energía y almacenamiento, así como los costos de fabricación.

Finalmente, la metodología de trabajo se esquematizó a través de un diagrama de flujo, el cual presenté en la Figura 21.

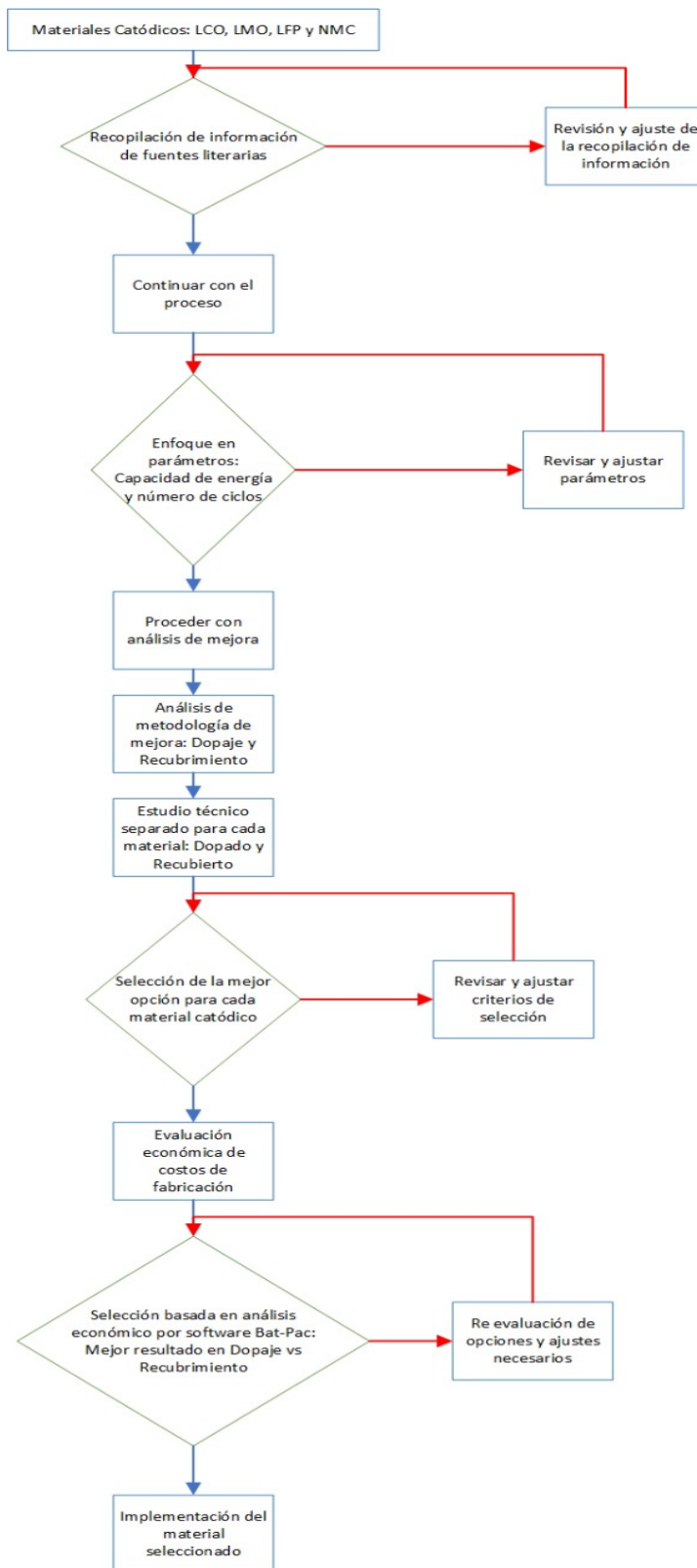


Figura 21: Metodología de trabajo (elaboración propia).

## IV. RESULTADOS

En esta sección, se ha reunido un análisis exhaustivo de los resultados óptimos de los materiales catódicos. Se comparará el material en su forma pura con aquel que ha sido dopado o recubierto con diferentes sustancias. El objetivo es determinar el impacto que tiene el dopaje o recubrimiento en la mejora de parámetros como capacidad de carga, capacidad energética, capacidad térmica, número de ciclos o densidad energética. Con esta información, se seleccionará el material con las propiedades más destacadas para, posteriormente, realizar una evaluación económica.

### 4.1. Material catódico LCO

La Figura 22 presenta el efecto del número de ciclos de carga-descarga en la capacidad específica del material catódico LCO con diferentes elementos (ver **Tabla 11**). Se puede observar que la capacidad específica se reduce con el número de ciclos para cualquier elemento de dopaje, pero que al agregar Al-Zr o Sr la capacidad específica se mantiene relativamente constante, alcanzando eficiencias del 96 % y 94% respectivamente. Dada la promesa que muestra el dopante Al-Zr, tanto  $184 \frac{mAh}{g}$ , así como a su capacidad específica tras 150 ciclos de  $176 \frac{mAh}{g}$ , se ha optado por profundizar en su estudio.

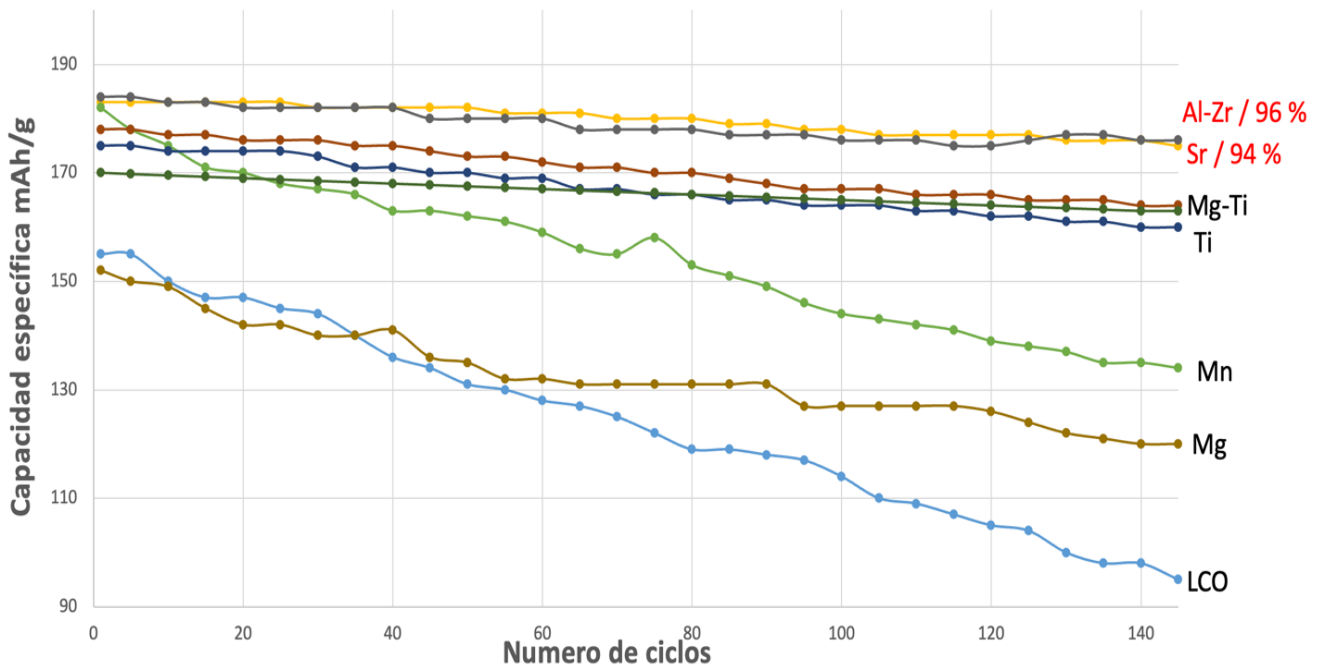


Figura 22: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LCO Dopado (elaboración propia).

El dopaje del material catódico LCO con Al-Zr ofrece diversas ventajas importantes que mejoran su desempeño electroquímico. Una de las principales mejoras es la conversión de

micro a nanopartículas, lo que aumenta el área superficial efectiva. Este cambio estructural es beneficioso porque influye en la nucleación y el crecimiento de las partículas durante la síntesis, lo que facilita las reacciones de superficie y mejora la cinética de reacción gracias a la mayor área disponible para dichas interacciones.

Otra ventaja significativa es el incremento en la conductividad eléctrica. Al dopar con Al-Zr, se facilita el movimiento de electrones, lo cual es esencial para las reacciones redox durante los ciclos de carga y descarga. Además, el dopaje refuerza la estructura del material, haciéndola más resistente a las tensiones y mejorando la capacidad de retención, lo que contribuye a un mejor rendimiento y estabilidad a lo largo de los ciclos de operación [74].

La Figura 23 muestra el efecto del número de ciclos en la capacidad específica del material catódico LCO recubierto con distintos materiales (ver **Tabla 12**). El material recubridor que ha demostrado un rendimiento óptimo en términos de capacidad específica a lo largo de 100 ciclos es  $\text{FePO}_4$ , alcanzando una eficiencia del 97%. Dada la promesa que muestra este recubridor, tanto de  $190 \frac{\text{mAh}}{\text{g}}$ , así como a su capacidad específica al transcurrir 100 ciclos de  $187 \frac{\text{mAh}}{\text{g}}$ , se ha optado por profundizar en su estudio.

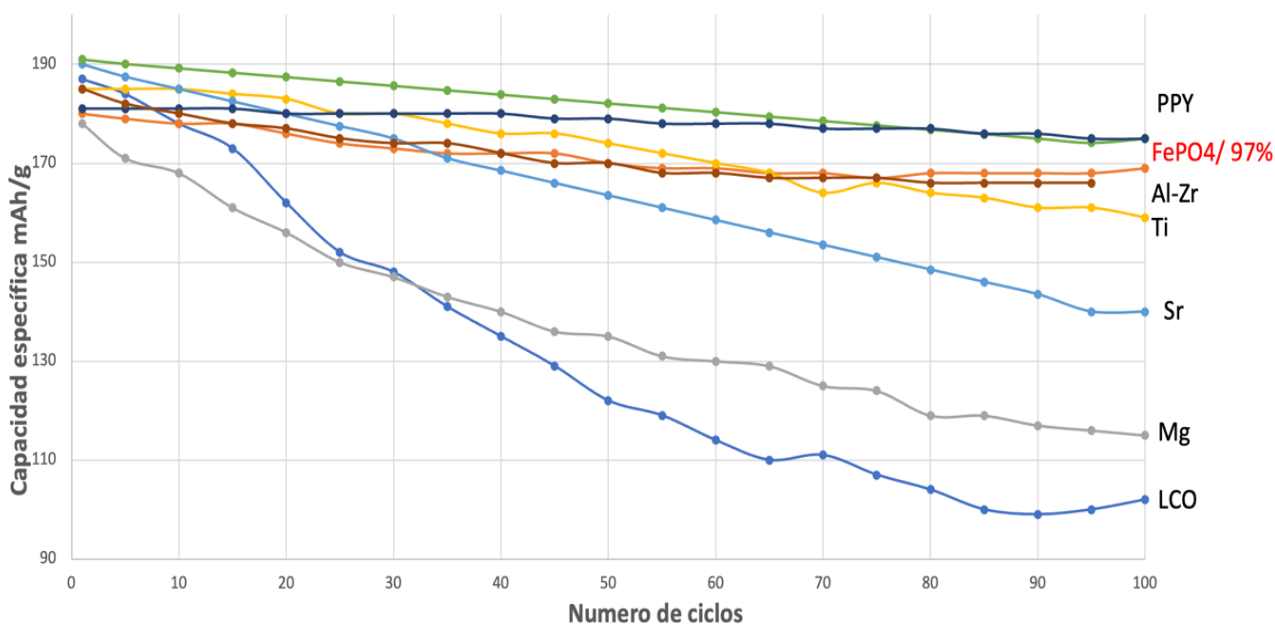


Figura 23: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LCO recubierto (elaboración propia).

El recubrimiento de un material catódico LCO con  $\text{FePO}_4$  proporciona múltiples ventajas que optimizan el rendimiento y la durabilidad del material. Una de las principales ventajas es la mejora en la retención de capacidad, lo cual se logra gracias a que el  $\text{FePO}_4$  es químicamente inactivo, pero electroquímicamente activo. Esto significa que, aunque no

participa en reacciones químicas perjudiciales, sí facilita la difusión de iones de litio, mejorando el rendimiento electroquímico general.

Otra ventaja importante es la preservación de la morfología del material. El recubrimiento asistido por microondas ayuda a mantener la estructura original del material catódico, lo que contribuye a la estabilidad durante los ciclos de carga y descarga. Además, este recubrimiento protege al material de ataques químicos, específicamente del electrolito, lo cual previene la disolución de iones de cobalto en el electrolito.

Por último, el recubrimiento de  $\text{FePO}_4$  contribuye a la reducción de la impedancia, ya que suprime el crecimiento de reacciones secundarias dañinas entre el material del cátodo y el electrolito. Esto se traduce en una menor resistencia interna y una mejor eficiencia de la batería, optimizando su rendimiento a largo plazo [78].

## 4.2. Material catódico LMO

La Figura 24 muestra el impacto del número de ciclos de carga-descarga sobre la capacidad específica del material catódico LMO dopado con distintos elementos (**ver Tabla 13**). Se observa una disminución en la capacidad específica a medida que aumentan los ciclos, independientemente del dopante utilizado. Sin embargo, la adición de Co-Ni y Mg-F mantiene la capacidad relativamente estable, con eficiencias del 94 % y 96 %, respectivamente. Dado el rendimiento prometedor del dopante Co-Ni, que presenta  $132 \frac{\text{mAh}}{\text{g}}$  y una capacidad específica de  $125 \frac{\text{mAh}}{\text{g}}$  tras 100 ciclos, se ha decidido continuar con estudios adicionales sobre este material.

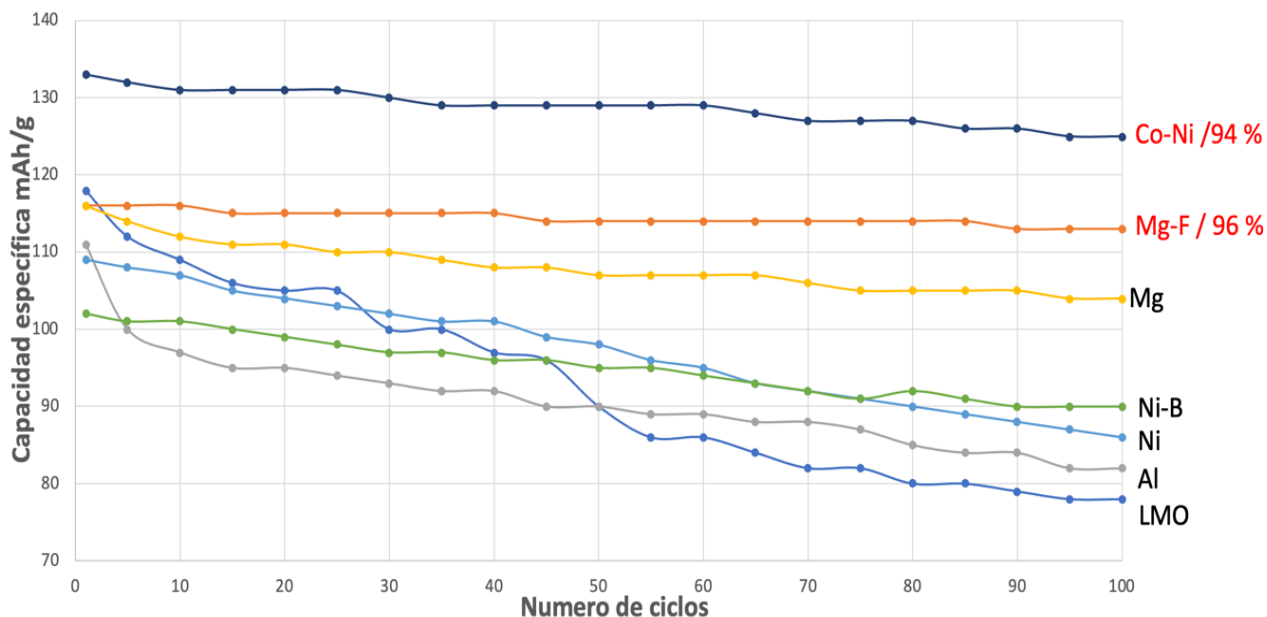


Figura 24: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LMO Dopado (elaboración propia).

El dopaje de un material catódico LMO con Mg-F proporciona varias ventajas clave que mejoran su rendimiento y estabilidad. Una de las principales mejoras es la estabilidad estructural. Esto se debe a que los iones de  $Mg^{2+}$  reemplazan parte de los iones de Mn, lo que mejora el promedio de valencia y estabiliza la estructura cúbica de la espinela, aumentando la resistencia del material durante los ciclos de carga y descarga.

Otra ventaja es la mejora en la distribución de las partículas. El dopaje con Mg contribuye a reducir la aglomeración y el tamaño de las partículas, lo que ayuda a limitar la formación de grandes conglomerados de polvo LMO. Esta distribución más uniforme de las partículas optimiza la superficie activa y favorece una mejor interacción electroquímica.

Por último, el dopaje con Mg-F suprime el efecto Jahn-Teller, que es conocido por causar distorsiones estructurales en los materiales de espinela. Este efecto se mitiga fortaleciendo el enlace Mn-O, lo que refuerza la estructura de la espinela y contribuye a la estabilidad del material durante su funcionamiento, mejorando así el rendimiento general del cátodo [102].

La Figura 25 ilustra el impacto del número de ciclos sobre la capacidad específica del material catódico LMO recubierto con diferentes materiales (ver **Tabla 14**). Los recubrimientos que han mostrado un rendimiento superior en términos de capacidad específica a lo largo de 100 ciclos son Al-P y La, con eficiencias del 94 % y 96 %, respectivamente. Dado el comportamiento del recubrimiento de La, que presenta una capacidad de  $120 \frac{mAh}{g}$  y mantiene  $115 \frac{mAh}{g}$  tras 100 ciclos, se ha decidido continuar con un estudio más detallado sobre este recubrimiento.

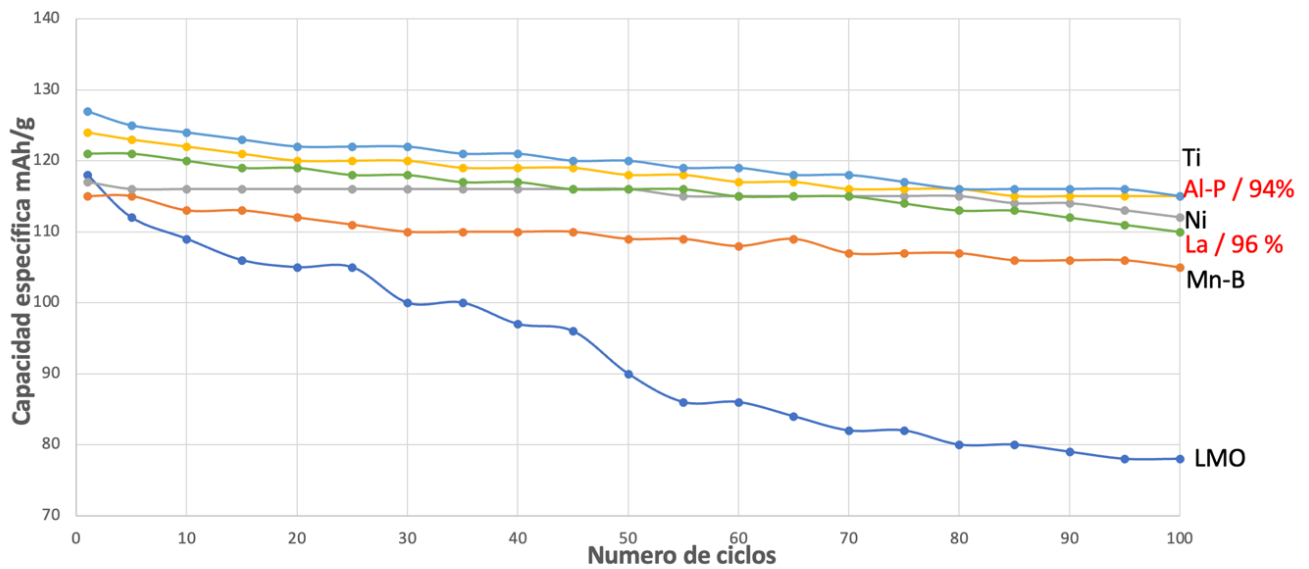


Figura 25: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LMO Recubierto (elaboración propia).

El recubrimiento de un material catódico LMO con Al-P ofrece varias ventajas que mejoran su desempeño, especialmente en condiciones exigentes. Una de las principales ventajas es la mejora en la capacidad de descarga y la retención. Este recubrimiento ayuda a mantener la capacidad del material incluso a altas temperaturas, lo que es crucial para la estabilidad y eficiencia de la batería en aplicaciones de alta demanda.

Otra ventaja significativa es el mejor rendimiento durante el ciclado. Esto se debe a que el recubrimiento de Al-P actúa como una barrera protectora entre los polvos de LMO y el electrolito, previniendo reacciones dañinas que puedan deteriorar el material catódico con el tiempo. Esta protección prolonga la vida útil del material y asegura un rendimiento constante durante múltiples ciclos de carga y descarga.

Por último, el recubrimiento con Al-P mejora la capacidad de tasa, permitiendo que el material exhiba altas capacidades incluso a elevadas tasas de carga y descarga. Esto significa que el material puede manejar de manera eficiente corrientes más intensas, lo que es esencial para aplicaciones que requieren una rápida entrega de energía sin comprometer el rendimiento [86].

### 4.3. Material catódico LFP

La Figura 26 muestra el impacto del número de ciclos de carga-descarga en la capacidad específica del material catódico LFP dopado con diversos elementos (ver **Tabla 15**). Se observa una disminución de la capacidad específica con el aumento de los ciclos para todos los elementos de dopaje. Sin embargo, al dopar con K-Mn, la capacidad específica se mantiene estable, logrando una eficiencia del 95 %. Considerando el rendimiento de este dopante, con una capacidad inicial de  $143 \frac{mAh}{g}$ , y una capacidad de  $136 \frac{mAh}{g}$ , tras 100 ciclos, se ha decidido profundizar en su investigación.

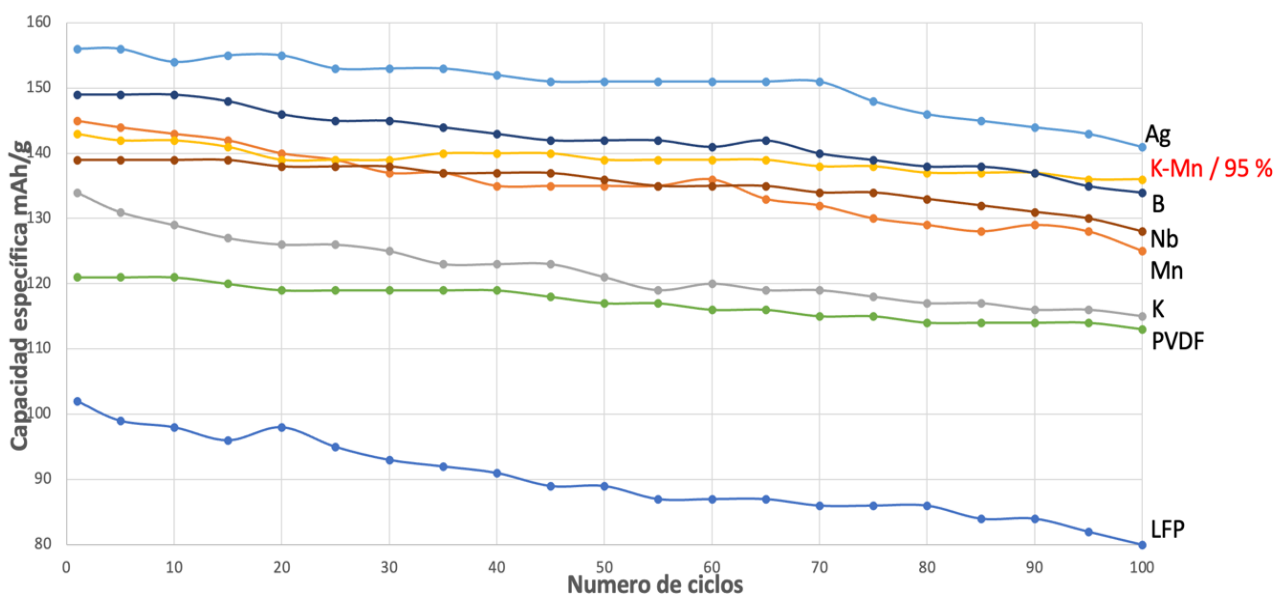


Figura 26: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LFP Dopado.

El dopaje de un material catódico LFP con K-Mn ofrece varias ventajas que mejoran significativamente su rendimiento electroquímico. Una de las principales mejoras es el aumento de la capacidad específica y la estabilidad del ciclo. Esto se logra mediante la modificación de la composición química y la estructura cristalina del LFP, lo cual permite una liberación más eficiente de iones de litio. Además, esta modificación contribuye a estabilizar la estructura cristalina, reduciendo la degradación del material a lo largo del tiempo y mejorando su durabilidad.

Otra ventaja importante es la mejora de la cinética de difusión y la reducción de la impedancia electroquímica. La modificación estructural resultante del dopaje disminuye la resistencia interna de la batería, lo que facilita una transferencia de carga más eficiente y optimiza el rendimiento general de la batería, especialmente durante ciclos de carga y descarga rápida.

Además, el co-dopaje con K-Mn amplía los canales de difusión de iones al aumentar el volumen de la red cristalina. Esto facilita un movimiento más libre y rápido de los iones dentro de la estructura, mejorando la capacidad del material para soportar corrientes más intensas sin sacrificar eficiencia [91].

La Figura 27 muestra el efecto del número de ciclos sobre la capacidad específica del material catódico LFPO recubierto con diversos materiales (ver **Tabla 16**). El recubrimiento de carbono/grafeno ha demostrado un rendimiento destacado en términos de capacidad específica durante 100 ciclos, con una eficiencia del 94 %. Considerando el desempeño del recubrimiento, que ofrece una capacidad inicial de  $186 \frac{mAh}{g}$  y mantiene  $175 \frac{mAh}{g}$  tras 100 ciclos, se ha decidido continuar con su análisis para investigaciones adicionales.

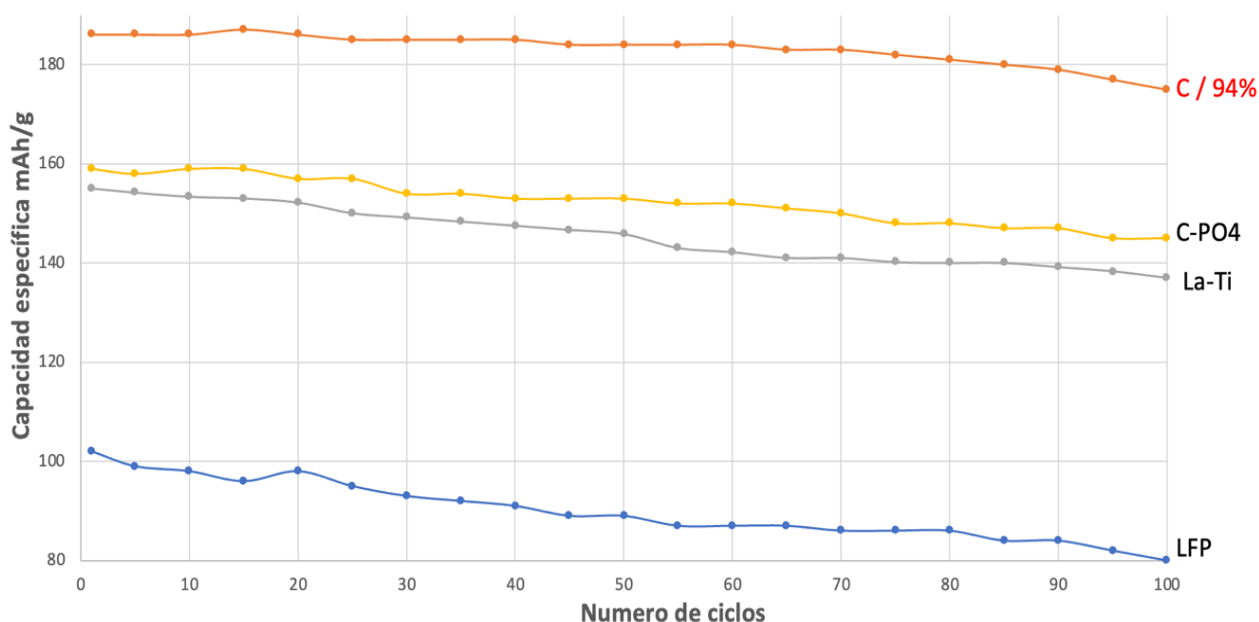


Figura 27: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo LFP Recubierto.

El recubrimiento de un material catódico LFO con carbono y grafeno proporciona importantes ventajas que mejoran su desempeño electroquímico. Una de las principales mejoras es la optimización de la conductividad eléctrica. La co-modificación con grafeno y una capa de carbono crea una red conductiva que facilita el movimiento de electrones, lo que resulta en un rendimiento electroquímico más eficiente.

Otra ventaja es el aumento de la capacidad específica. Este recubrimiento incrementa la capacidad de almacenamiento de iones de litio en el material, lo que se traduce en una mayor capacidad específica y un mejor desempeño de la batería.

Además, el uso de carbono y grafeno ayuda a reducir la aglomeración de partículas. Ambos materiales actúan como una barrera que previene la formación de conglomerados, lo que mantiene una alta superficie activa y asegura una distribución uniforme de las partículas. Esto optimiza la interacción electroquímica y contribuye a la estabilidad general del material catódico [92].

#### 4.4. Material catódico NMC

La Figura 28 presenta el efecto del número de ciclos de carga-descarga en la capacidad específica del material catódico NMC dopado con distintos elementos (ver **Tabla 17**). Se observa una disminución en la capacidad específica a medida que aumentan los ciclos para todos los dopantes. No obstante, al dopar con Al, la capacidad específica se mantiene estable, alcanzando una eficiencia del 95 %. Dado el desempeño de este dopante, con una capacidad inicial de  $222 \frac{mAh}{g}$  y  $210 \frac{mAh}{g}$  tras 100 ciclos, se ha decidido profundizar en su investigación.

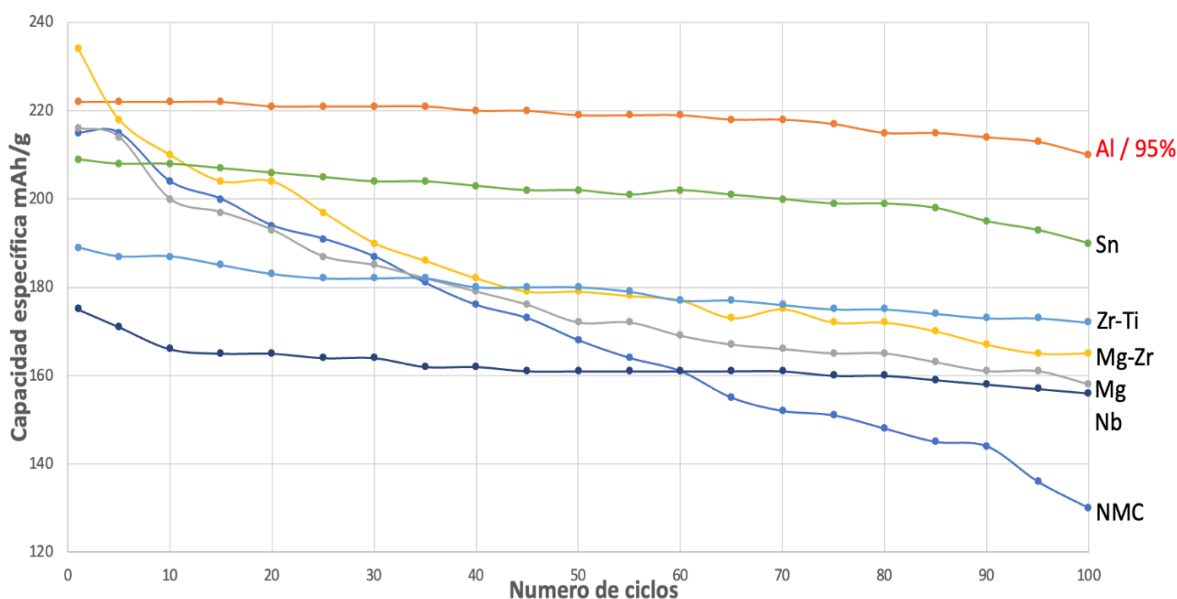


Figura 28: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo NMC Dopado.

El dopaje de un material catódico NMC con Al ofrece varias ventajas significativas que mejoran su rendimiento y estabilidad. Una de las principales ventajas es el alivio de los cambios abruptos durante el ciclado. Esto se debe a la capacidad del aluminio de estabilizar la estructura cristalina, aliviando los cambios anisotrópicos en la red y mitigando las variaciones de volumen que ocurren durante los ciclos de carga y descarga.

Otra mejora importante es la integridad estructural rígida, lo que optimiza las propiedades electroquímicas del material. Esto se logra al preservar un mayor grosor de las capas de LiO6 en estados de alta intercalación, lo que facilita una movilidad más eficiente de los iones de litio dentro del material, contribuyendo así a una mejor eficiencia energética.

Además, el dopaje con Al, mejora la estabilidad térmica de los cátodos estratificados ricos en níquel. Este dopaje retrasa las temperaturas de inicio de las transformaciones de fase durante el proceso de calentamiento, lo que incrementa la seguridad y estabilidad del material, especialmente en condiciones de alta temperatura. Esto es crucial para aplicaciones que requieren un rendimiento seguro y confiable [94].

La Figura 29 muestra el efecto del número de ciclos sobre la capacidad específica del material catódico NMC recubierto con distintos materiales (ver **Tabla 18**). El recubrimiento con Zr ha mostrado un rendimiento superior en términos de capacidad específica durante 100 ciclos, con una eficiencia del 82 %. Considerando el desempeño del recubrimiento, que presenta una capacidad inicial de  $203 \frac{mAh}{g}$  y mantiene  $167 \frac{mAh}{g}$  tras 100 ciclos, se ha decidido continuar con un análisis más detallado de este recubrimiento.

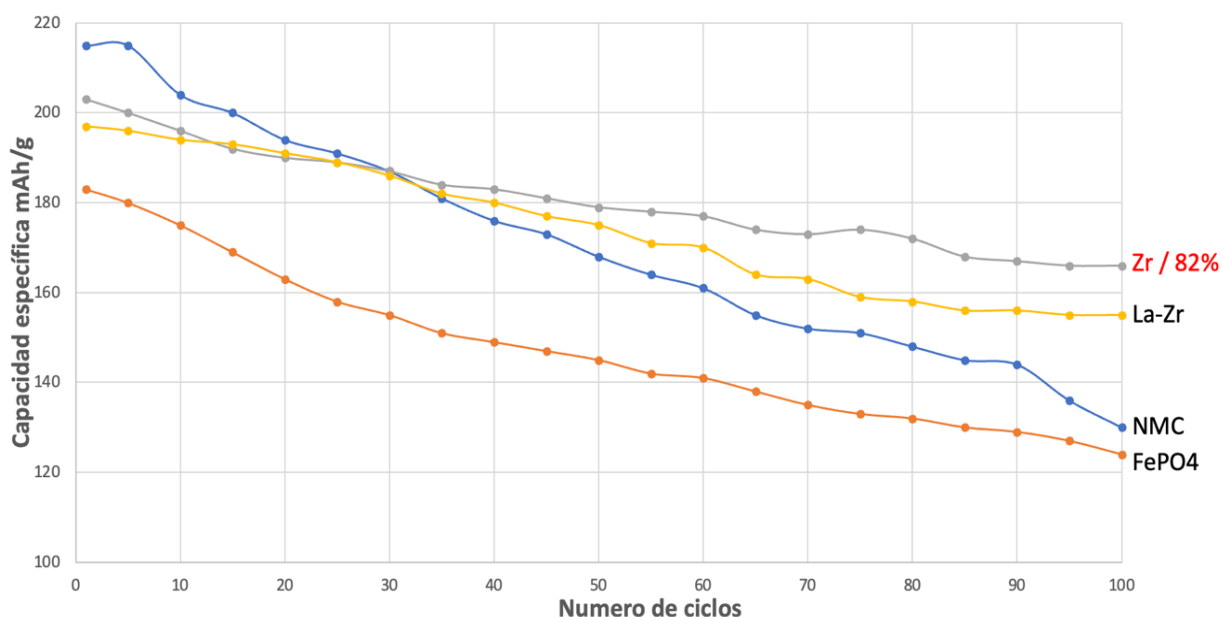


Figura 29: Capacidad específica vs número de ciclos en un Cátodo NMC Recubierto (elaboración propia).

El recubrimiento de un material catódico NMC con Zr proporciona importantes ventajas que contribuyen a un mejor rendimiento y estabilidad del material. Una de las principales mejoras es el aumento de la estabilidad estructural. Esto se debe a que los iones de Zr, al incorporarse en la estructura cristalina del cátodo, expanden los parámetros de la red, aumentando el espacio entre las capas y facilitando la difusión de los iones, lo cual mejora la eficiencia de las reacciones electroquímicas.

Otra ventaja es la estabilidad mejorada durante el ciclado y el rendimiento a altas tasas de carga. El recubrimiento de Zr forma una capa protectora en la superficie del cátodo, lo que reduce la interacción perjudicial entre el cátodo y el electrolito. Esto no solo mejora la

estabilidad del material a lo largo de múltiples ciclos de carga y descarga, sino que también permite un rendimiento más eficiente en condiciones de alta demanda.

Adicionalmente, el recubrimiento con Zr ayuda a reducir la aglomeración de partículas y garantiza una distribución uniforme de los elementos. Durante el proceso de sinterización, el Zr actúa para prevenir la formación de grandes aglomerados y asegura que las partículas se distribuyan de manera uniforme. Esto optimiza la superficie activa del material y contribuye a un rendimiento electroquímico más consistente y fiable [99].

#### 4.5. Materiales dopantes y recubiertos seleccionados

De los distintos materiales analizados para los distintos materiales catódicos los que mostraron menor reducción de la capacidad específica y mayor eficiencia ya sea al ser dopados o recubiertos se presentan en Tabla 4.

Tabla 4: Materiales catódicos con mejor rendimiento al ser dopados y recubiertos.

Material Catódico	Dopado		Recubierto			
	Tipo de material	Eficiencia %	Tipo de síntesis	Tipo de material	Eficiencia %	Tipo de síntesis
LCO	Al-Zr	94	Hidrotermal	FePO4	97	Hidrotermal
LMO	Mg-F	96	Sol-gel	Al-P	94	Co-precipitación
LFP	K-Mn	95	Solvotérmico	carbono/grafeno	94	Solvotérmico
NMC	Al	95	Co-precipitación	Zr	82	Co-precipitación

Por lo tanto, para proceder con el análisis económico, se selecciona para cada material catódico la técnica de dopaje o recubrimiento que presenta menor disminución en la capacidad específica tras 100 ciclos. De este análisis se concluye lo siguiente:

- Cátodo LCO recubierto con FePO4.
- Cátodo LMO dopado con Mg-F.
- Cátodo LFP recubierto con carbono/grafeno.
- Cátodo NMC dopado con Al.

#### **4.5.1 Análisis microestructural y efectos de los dopantes**

Desde una perspectiva microestructural, los elementos dopantes seleccionados, como el aluminio (Al), el zirconio (Zr), el magnesio (Mg) y el flúor (F), tienen un impacto significativo en la mejora de las propiedades de los materiales catódicos. En el caso del dopaje con aluminio (Al) en el material NMC, se ha demostrado que la adición de este elemento reduce el desorden cationico en la estructura cristalina. Esto permite mejorar la estabilidad estructural, lo que se refleja en una mayor capacidad de retención de carga tras 500 ciclos, donde se ha observado una disminución de capacidad del 4% en comparación con materiales no dopados, que suelen perder entre un 8% y un 12% de su capacidad inicial.

El dopaje con magnesio (Mg) y flúor (F) en el material LMO también resulta en mejoras notables en la estabilidad térmica. Según estudios recientes, la capacidad de retención de carga tras 100 ciclos mejora en un 5% en comparación con los materiales no dopados, lo que es crucial para aplicaciones de alta temperatura. Además, estos dopantes aumentan la vida útil del material en más de un 20%, ya que reducen la formación de defectos estructurales y mejoran la movilidad de los iones dentro del material.

En cuanto a los recubrimientos, la aplicación de  $\text{FePO}_4$  en el cátodo LCO ha demostrado ser altamente efectiva para reducir la degradación superficial y evitar reacciones indeseadas con el electrolito. Estudios muestran que este recubrimiento incrementa la eficiencia de ciclo en un 3% tras 200 ciclos. Asimismo, el recubrimiento con carbono/grafeno en el material LFP incrementa la conductividad eléctrica en más del 30%, lo que se traduce en una mejora de la eficiencia electroquímica y un incremento de la densidad energética en aproximadamente 15 Wh/kg, un valor significativo para aplicaciones de almacenamiento de energía.

#### **4.5.2 Impacto económico de los elementos dopantes**

Desde el punto de vista económico, el costo de los elementos dopantes varía considerablemente en función de la pureza y la disponibilidad de los mismos. El aluminio (Al), utilizado para dopar materiales como el NMC, presenta un costo relativamente bajo, con un precio promedio de aproximadamente 2.000 USD por tonelada, lo que lo convierte en una opción viable para la producción en masa. En contraste, el zirconio (Zr), utilizado para recubrir el material NMC, es significativamente más costoso, con un precio que puede alcanzar los 40.000 USD por tonelada, lo que incrementa los costos de producción, aunque su impacto positivo en la estabilidad del material puede justificar la inversión en aplicaciones de alto rendimiento.

El dopaje con magnesio (Mg) y flúor (F), aunque más económicos que el zirconio, también presentan desafíos en términos de costo. El magnesio tiene un precio de alrededor de 3.500 USD por tonelada, mientras que el flúor, debido a la necesidad de condiciones de manejo especializadas, puede aumentar los costos operativos en un 10-15%. A pesar de esto, los beneficios obtenidos en la mejora de la estabilidad térmica y la capacidad de retención de carga hacen que estos dopantes sean altamente competitivos en aplicaciones donde se requiere resistencia a altas temperaturas y durabilidad.

En resumen, aunque algunos de los elementos dopantes incrementan los costos de producción, estos costos adicionales se ven compensados por la mejora en la eficiencia, estabilidad y vida útil de los materiales catódicos. Por lo tanto, el uso de dopantes como el aluminio, magnesio y flúor ofrece una excelente relación costo-beneficio, particularmente en la búsqueda de materiales que puedan satisfacer las demandas de almacenamiento energético a largo plazo y aplicaciones de alta exigencia, como los vehículos eléctricos.

## V. EVALUACIÓN ECONÓMICA

A partir del análisis técnico exhaustivo realizado sobre diversos materiales catódicos en el Capítulo IV, se identificaron cuatro candidatos para la fabricación de cátodos con alta eficiencia de carga-descarga. Para cada uno de estos materiales, se determinó la configuración óptima mediante técnicas de dopaje y recubrimiento con compuestos específicos. Este capítulo aborda la evaluación de los costos involucrados en la producción de dichos cátodos, comparando los costos asociados a su fabricación en estado puro frente a aquellos con tratamientos de dopaje o recubrimiento. El objetivo es identificar la opción más rentable en términos de relación costo-rendimiento para la producción de baterías destinadas a vehículos eléctricos, enfocándose en los cátodos LCO, LMO, LFP y NMC.

Se utilizó el modelo de costo y rendimiento de baterías BATPAC, que es un producto de investigación y desarrollo del Argonne National Laboratory para realizar el análisis económico de la fabricación de los distintos materiales catódicos seleccionados. Este modelo se basa en el diseño de baterías de ion de litio para vehículos eléctricos, donde se modelizan los costos de fabricación de baterías a través de hojas de cálculo de Microsoft Office Excel.

BATPAC incorpora los requerimientos definidos por los usuarios del paquete de baterías y diseña una batería desde su composición más básica que es la celda hasta el producto final que es un paquete. El diseño contempla un modelo de costos de fabricación para determinar el costo total del paquete de baterías, se debe ingresar al software datos como la potencia del paquete, energía del paquete, requisitos de carga rápida, limitaciones físicas, entre otros (ver Figura 30). Se ingresan las limitaciones de diseño, tales como número de paquetes de batería por vehículo, potencia, voltaje, número de celdas en módulo, número de módulos en paquetes, para determinar los sistemas de gestión de la batería, el que se explica con detalle en el anexo 9.13 Descripción del sistema de gestión de la batería. y de gestión térmica del paquete, el detalle se explica en el anexo 9.14 Descripción del sistema de gestión térmica. Los resultados de la gestión de batería y los diseños térmicos se utilizaron para determinar la estructura final del paquete de baterías. Finalmente, el software determinó el costo de fabricación y el costo total del paquete de baterías.

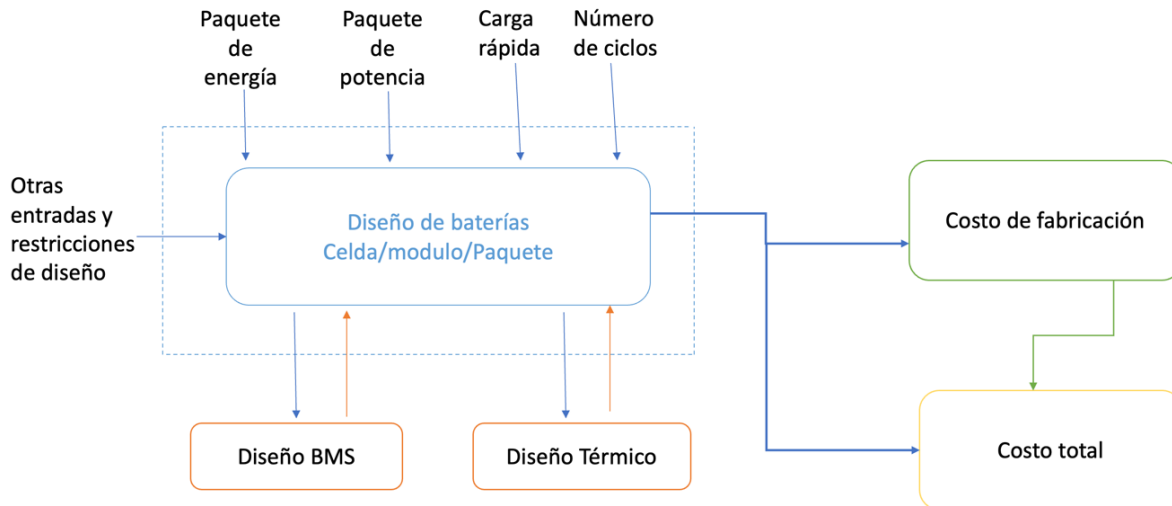


Figura 30: Flujo de entrada y salida para determinar el costo total de la batería (Elaboración propia).

## 5.1. Descripción general del diseño de baterías

Un paquete de baterías para un vehículo eléctrico, consta de numerosas celdas unidas entre sí en combinaciones de configuraciones en serie y paralelo para alcanzar los requerimientos como voltaje, energía y potencia. De esta manera, BATPAC calculará la masa, tamaño y costo del paquete de baterías.

La unidad básica corresponde a la celda (ver Figura 31) donde se encuentran todos los materiales activos que se especifican en el anexo 9.9 Diseño celda. El siguiente nivel es el módulo, que contiene varias celdas. Estas celdas se conectan en serie o en paralelo dentro del módulo, se explica con más detalle en el anexo 9.10 Diseño módulo. Además, el módulo también contiene conductores térmicos de aluminio envueltos alrededor de cada celda para la gestión térmica, un sistema de control de gestión del módulo, terminales y gabinetes. Finalmente, se conectan varios módulos dentro de una fila de bastidores, los cuales proporcionan soporte para mantener la compresión de los módulos, se habla con detalle en el anexo 9.11 Diseño de bastidor de módulos. Estos también incluyen paneles frigoríficos para gestionar el calor generado por las células de los módulos. BATPAC toma en consideración que todos los bastidores están conectados formando un paquete, como se representa en el anexo 9.12 Diseño paquete.

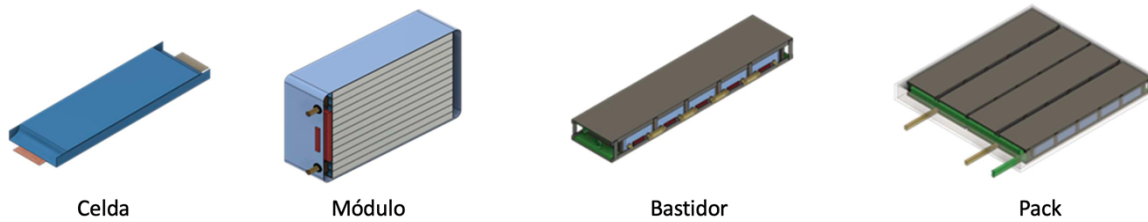


Figura 31: Piezas dentro de las baterías como celda, módulo, bastidor y pack [103].

## 5.2 Costo de fabricación

### 5.2.1 Enfoque

El costo de fabricación de un paquete de baterías se obtiene con la información de diseño generada al modelar la celda y el rendimiento del paquete, el modelo de diseño determina los requisitos anuales de materiales y artículos adquiridos, lo que incluye la gestión de batería y los sistemas de gestión térmica del paquete, luego el costo de fabricación se suma a estos costos de materiales, que se detallan en el anexo 9.15 costo de materiales específicos de la batería., y sistemas de integración, que se explica en el anexo 9.16 Costos de integración del paquete., para alcanzar el costo unitario de producir un solo paquete.

En el proceso de fabricación de electrodos, se utilizan aglutinantes con solventes que se evaporan. Para optimizar recursos y minimizar el impacto ambiental, la planta cuenta con sistemas de recuperación de estos solventes mediante condensadores, que enfrían y recolectan los vapores, o mediante columnas de adsorción con materiales como carbón activado. Esto permite su reutilización, reduciendo tanto el impacto ambiental como los costos operativos, como se detalla en la Tabla 5.

La planta de referencia tiene en cuenta el tamaño, la cantidad de unidades, la mano de obra directa y la depreciación del costo de capital para cada paso del procesamiento. Los gastos de los procesos se suman con los costos adicionales de operación de la instalación de fabricación. Estos costos incluyen costos de lanzamiento, capital de trabajo, gastos indirectos, variables, ventas, administración, investigación y desarrollo. La planta base produce 500.000 paquetes de baterías para vehículos eléctricos al año. Los costos de la planta representan estimaciones del futuro cercano para materiales, mano de obra, capital y área de la planta.

## 5.2.2 Planta de fabricación de referencia

La planta de referencia que toma Bat-Pac está diseñada para paquetes de baterías para vehículos eléctricos específicamente un sedán de potencia y alcance moderados a una tasa de fabricación de 500.000 paquetes de baterías por año. Estos packs cuentan con 400 celdas, con una potencia nominal de 300kW y una energía total de 100kWh. La batería proporciona 340 millas de recorrido del vehículo con un 85 % de la energía del paquete para un vehículo que requiere energía de 250 Wh/milla.

La tasa anual de 500.000 paquetes de baterías por año (50GWh/año) se logra operando tres turnos al equivalente de 320 días/año de producción total.

Se toma un rendimiento celular de un 95 % para reflejar por medio de la siguiente Tabla 5 las tasas de fabricación en planta.

Tabla 5: Tasas de fabricación en planta base.

<b>Tasa</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Días operativos</b>	días/año	320
<b>Energía total del paquete</b>	kWh/año	50.000.000
<b>Número de paquetes</b>	paquetes/año	500.000
<b>Número de bastidores en fila</b>	racks/año	2.000.000
<b>Número de módulos</b>	módulos/año	10.000.000
<b>Número de interconexiones de celdas</b>	Interconexiones/año	270.000.000
<b>Número de celdas aceptadas</b>	Células aceptadas/año	200.000.000
<b>Número total de celdas</b>	Total células /año	211.000.000
<b>Área de electrodo positivo</b>	$m^2$ /año	303.000.000
<b>Área de electrodo negativo</b>	$m^2$ /año	315.000.000
<b>Material activo positivo</b>	kg/año	72.500.000
<b>Material activo negativo</b>	kg/año	49.100.000
<b>Disolvente aglutinante positivo que se evapora</b>	kg/año	24.200.000
<b>Disolvente aglutinante negativo que se evapora</b>	kg/año	40.100.000

En la siguiente Tabla 6 se expresa la mano de obra, equipo de capital y área de planta para cada paso del proceso en la planta base.

Tabla 6: Mano de obra, capital y área de planta para cada paso del proceso en la planta base.

<b>Proceso</b>	<b>Mano de obra (h/año)</b>	<b>Bienes de capital (\$M)</b>	<b>Área de planta (m<sup>2</sup>)</b>
<b>Preparación de mezcla de materiales</b>			
<b>Positivo</b>	200.000	200	8.000
<b>Negativo</b>	270.000	280	8.800
<b>Revestimiento de electrodo</b>			
<b>Positivo</b>	59.000	90	16.000
<b>Negativo</b>	59.000	78	16.000
<b>Calandrado</b>			
<b>Positivo</b>	61.000	25	2.100
<b>Negativo</b>	69.000	25	2.100
<b>Muestras</b>			
<b>Positivo</b>	250.000	29	3.200
<b>Negativo</b>	250.000	29	3.200
<b>Secado al vacío de electrodos</b>			
<b>Positivo</b>	41.000	14	2.000
<b>Negativo</b>	35.000	11	1.600
<b>Montaje de celdas en cuarto seco</b>			
<b>Corte de electrodos</b>	260.000	30	-
<b>Apilamiento de celdas</b>	700.000	170	-
<b>Soldadura por colector de corriente</b>	190.000	190	-
<b>Inspección por rayos x</b>	190.000	14	-
<b>Insertar celda en contenedor</b>	49.000	11	-
<b>Llenado de electrolitos y sellado de celdas</b>	132.000	25	-
<b>Cuarto seco</b>	8.000	7,3	61.000
<b>Ciclos de formación, prueba y sellado</b>	560.000	830	110.000
<b>Montaje del módulo</b>	170.000	94	27.000
<b>Montaje y prueba de paquetes</b>	150.000	94	27.000
<b>Depósito</b>	31.000	200	10.000

<b>Sistemas de construcción y soporte</b>			
<b>Edificio</b>	-	1.700	-
<b>Recuperación de solventes</b>	17.000	36	1.100
<b>Reciclaje de células rechazadas y desechos</b>	38.000	9,3	3.300
<b>Laboratorio de control</b>	46.000	16	1.300
<b>Total</b>	3876000	4.222	305.700

### 5.3 Costos de inversión en planta

En este modelo, los costos de inversión calculados se definen como aquellos directamente relacionados con la construcción y operación de la planta. Otros costos que pueden requerir inversión, como la investigación y el desarrollo, se agregan por separado al costo unitario de la batería. El costo de inversión más grande es para el equipo capital instalado. Cada elemento de costo para la batería en diseño se ajusta a partir de la estimación de la planta base. El costo de la planta se calcula asumiendo \$3,000 por metro cuadrado de área de planta (\$280/pie cuadrado), lo cual incluye el costo del terreno y las conexiones de servicios. Estos son costos de construcción genéricos relacionados con el edificio (fundación, paredes exteriores, techo, transformadores, cableado, etc.). Los costos de construcción únicos de una planta de baterías se incluyen en los sistemas de soporte del edificio. Los costos de lanzamiento incluyen el inicio de la planta, la capacitación de empleados y los materiales que se gastan o reciclan en las primeras etapas de producción, más allá de las cantidades normales. Se estima que los costos de lanzamiento sean el 5% de los costos anuales de materiales más el 10% de la mano de obra directa anual y los gastos generales variables. Se necesita capital de trabajo para cubrir los costos de nómina, cuentas por cobrar y los inventarios de materias primas, trabajo en proceso y producto terminado. Se estima que el capital de trabajo sea el 15% de los costos variables anuales.

### 5.4 Costo base

El costo total resulta de la combinación de los costos variables, los gastos fijos, las ganancias y la garantía. Los supuestos establecidos para estos cálculos están disponibles y pueden ser modificados en la sección "Tasas de costos de fabricación y desgloses de costos", dentro de la pestaña "Insumos de costos".

## 5.5 Gastos fijos

Los gastos fijos incluyen Gastos Generales, de Ventas y Administrativos (GVA) y depreciación. El costo de GVA incluye la oficina de la planta, impuestos sobre ingresos y propiedades, costo de ventas y seguros. El modelo estima que estos gastos representan el 25% del gasto indirecto y la depreciación. El modelo BatPaC asume una investigación y desarrollo continuos para mantener la producción de baterías competitivas en costos y rendimiento. Los costos de I+D se fijan en el 40% del gasto de depreciación, ya que los costos de I+D deben escalar con la inversión en la planta y su equipo ver Tabla 7. Los gastos de depreciación proporcionan financiación para futuras inversiones en esta planta, como la sustitución de equipos. El equipo y la planta se amortizan a tasas lineales por una vida útil de 10 años (10% por año) y 20 años (5% por año), respectivamente.

Tabla 7: Costo unitario del paquete de baterías.

	Descripción	Método de Cálculo
<b>Costos variables</b>		
Materiales y elemento comprados	Todos los materiales y artículos comprados en productos terminados en el procesamiento.	Basado en precio de materiales, ecuaciones de costos de artículos comprados y rendimiento.
Mano de obra directa	Costos laborales para operaciones y supervisión inmediata.	Estimaciones de costos para cada paso de procesamiento a tarifas de referencia ajustadas a tarifas reales.
Gastos generales variables	Materiales indirectos, mano de obra, servicios públicos y mantenimiento de planta.	40% del costo de mano de obra directa más el 20% de depreciación.
<b>Gastos fijos</b>		
General, ventas y administración	Oficina de planta, impuestos sobre la renta y la propiedad, costo de ventas y gastos de seguro.	25% de mano de obra directa y gastos generales variables más el 25% de depreciación
Depreciación	Proporciona fondos para nuevas inversiones que reemplacen las de equipos y plantas actuales.	10% del costo de bienes de capital más 5% del costo del espacio de la planta
Ganancia	Rendimiento del capital invertido después de impuestos.	5 % de los costos totales de inversión
Garantía	Fondos reservados para reembolsar a los clientes por fallas en las baterías	5,6% agregado al precio basado en el valor actual de los pagos proyectados.

## 5.6 Beneficios y garantía

El objetivo de beneficio para este tipo de empresa varía con la estructura financiera de la compañía, especialmente en lo que respecta a la deuda a largo plazo. Para el modelo, se establece que el beneficio proporcione un retorno del 5% sobre la inversión total, lo cual es un promedio aproximado para una fabricación madura.

Se añade una garantía del 5.6% al costo total del paquete de baterías. Este 5.6% se calcula con respecto al total de costos variables, gastos fijos totales y beneficio. El valor predeterminado del 5.6% se determinó asumiendo una garantía de 10 años con reemplazo completo en los primeros cinco años y un costo compartido de reemplazo para los últimos cinco años. El consumidor del paquete (ya sea el propietario del vehículo o el fabricante de automóviles) pagaría una parte creciente del costo, desde el 0% a los 5 años hasta el 100% a los 10 años o más. La garantía se determinó calculando el valor presente de las fallas futuras de las baterías, asumiendo una tasa de fallo del 1.0% por año y una tasa de descuento del 8%. La garantía solo se aplica al costo del paquete y no incluiría ningún servicio adicional que pueda ser necesario para reemplazar el paquete en el vehículo. Se asume que estos serían cubiertos por el fabricante del automóvil.

## 5.7 Resultados

A partir del software BatPac, se asignaron los siguientes parámetros con los mismos valores para los materiales catódicos seleccionados en el inciso 4.5. Materiales dopantes y recubiertos seleccionados, los cuales se representa por la Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros fijos para los materiales catódicos seleccionados.

<b>Electrodo Negativo: Grafito</b>	
Capacidad específica del material mAh/g	360
Fracción de volumen vacío %	25
Espesor del colector de corriente negativa	10
<b>Diseño de Batería</b>	
Tipo de vehículo	Eléctrico
Diseño de paquete sensible a la masa o costo	Costo
OEM corte superior SOC	95
OEM corte inferior SOC	10
Energía utilizable de la batería %	85
<b>Requisitos de energía y almacenamiento</b>	
Potencia máxima nominal objetivo del paquete kW	300
Duración a potencia s	10

SOC inicial del funcionamiento para potencia máxima nominal %	20
Temperatura media °C	30
Energía total del paquete 0-100% SOC kWh	100
Espesor celda mm	20
Relación longitud-ancho del electrodo positivo	3
Número de celdas por módulo	20
Número de celdas en paralelo	2
Número de módulos en fila	5
Número de filas de módulos por paquete	4
Número de módulos en paralelo	2
<b>Fabricación y costos</b>	
Electrodo negativo \$/batería	
Material activo \$/batería	872
Aditivo de carbono \$/batería	0
Aglutinante \$/batería	20
Solvente \$/batería	554
Lámina de aluminio \$/batería	45
Lámina de cobre \$/batería	289
Separador \$/batería	340
Electrolito \$/batería	270
Número de paquetes fabricados por año	500
Rendimiento celular % de celdas construidas que pasan la inspección	95

La diferencia se encuentra principalmente en el valor de la capacidad específica para cada material catódico, además de los componentes de los distintos cátodos, esto se evidencia en la Tabla 9 respecto costos de producir las distintas celdas de materiales catódicos:

Tabla 9: Características del electrodo positivo en los materiales catódicos.

<b>Electrodo positivo \$/Kg</b>	<b>LCO</b>	<b>LMO</b>	<b>LFP</b>	<b>NMC</b>
Material activo \$/batería	3.000	1.643	1.357	4.214
Aditivo de carbono \$/batería	21	21	21	21
Carpeta \$/batería	44	44	44	44
Solvente (NMP) \$/batería	129	129	129	129

Finalmente, se obtuvo que las distintas baterías con los diferentes materiales catódicos seleccionados para su uso en un vehículo eléctrico entregaron los siguientes resultados por la Tabla 10.

Tabla 10: Resultados finales para cada batería con diferentes materiales catódicos.

<b>Características en las baterías</b>	<b>LCO</b>	<b>LMO</b>	<b>LFP</b>	<b>NMC</b>
Energía total del sistema de baterías kWh	100	99	100	100
Capacidad del sistema de batería Ah	273	267	270	273
Potencia nominal del sistema de baterías kW	350	982	593	300
Tensión de funcionamiento nominal del sistema de batería V	370	373	368	367
Relación potencia/energía del pack (respecto a la potencia nominal)	3	9,9	5	3
Paquete densidad de energía Wh/L	319	288	266	340
Paquete de energía específica Wh/kg	187	169	178	205
Número de módulos por paquete	20	20	20	20
Número de celdas por paquete	400	400	400	400
Volumen del paquete L	330	345	317	294
Peso total del paquete kg	532,5	589,1	450,3	488,3
Capacidad de celdas Ah	67,4	66,6	66,6	68,2
Tensión nominal de funcionamiento V	3,77	3,73	3,71	3,67
Espesor del electrodo positivo $\mu\text{m}$	120	120	120	120
Capacidad real del electrodo positivo mAh/cm <sup>2</sup>	7	5	8	8,1
Espesor del electrodo negativo $\mu\text{m}$	153	153	153	153
Capacidad real del electrodo negativo mAh/cm <sup>2</sup>	7,5	5,5	7,2	8,9
Densidad de energía de la celda Wh/L	580	520	503	647
Energía específica de la celda Wh/kg	307	261	244	336
Costo del paquete de \$/paquete	\$ 10.351	\$ 9.410	\$ 8.891	\$ 11.533
Costo del paquete, \$/kWh	\$ 98	\$ 95	\$ 76	\$ 115
Costo del paquete, \$/kWh(Utilizable)	\$ 118	\$ 111	\$ 91	\$ 136
Costo de la celda \$/kWh	\$ 96	\$ 75	\$ 96	\$ 96
Tamaño de la planta GWh	50	50	50	50
Packs fabricados al año (packs/año)	500.000	500.000	500.000	500.000
Longitud del paquete mm	2.152	2.152	2.152	2.152
Ancho del paquete mm	1.206	1.206	1.206	1.206
Altura del paquete mm	112	112	112	112

De los resultados obtenidos, se presenta el siguiente ranking, de mayor a menor recomendación, de las distintas baterías para ser utilizadas en vehículos eléctricos, basándose en costos, flujo de caja (9.18 Flujo de caja.), capacidad energética y densidad energética:

- 1) NMC dopado con Al.
- 2) LFP recubierto con carbono/grafeno.
- 3) LCO recubierto con FePO<sub>4</sub>.
- 4) LMO dopado con Mg-F.

## VI. CONCLUSIONES

Con base en el análisis exhaustivo de los materiales catódicos empleados en baterías de ion litio, se destaca su relevancia en la transición hacia tecnologías sostenibles, particularmente en el ámbito de la electromovilidad y el almacenamiento de energía. A lo largo de este trabajo, se ha realizado una evaluación comparativa de los materiales catódicos más utilizados, como LCO, LMO, LFP y NMC, enfocándose en parámetros clave como la capacidad específica, la eficiencia y la estabilidad térmica.

Los resultados del análisis técnico indican que las propiedades electroquímicas de estos materiales pueden ser significativamente optimizadas mediante técnicas avanzadas de dopaje y recubrimiento, aunque el efecto del dopado depende críticamente del método de síntesis utilizado. Estas técnicas se traducen en mejoras en la capacidad de carga, la estabilidad cíclica y la densidad energética. Por ejemplo, el método de co-precipitación ha demostrado un impacto positivo en la distribución homogénea de los dopantes, mientras que la síntesis en estado sólido tiende a ser menos eficiente en este aspecto.

En concreto, el LCO recubierto con FePO<sub>4</sub> alcanzó una capacidad específica de 187 mAh/g con una eficiencia del 97 % tras 100 ciclos, mientras que el LMO dopado con Mg-F mostró 125 mAh/g y una eficiencia del 96 % en condiciones similares. El LFP recubierto con carbono/grafeno mejoró su conductividad eléctrica y estabilidad térmica, alcanzando una capacidad de 175 mAh/g y una eficiencia del 94 %. El NMC dopado con aluminio fue el de mejor rendimiento, alcanzando una capacidad específica de 210 mAh/g y una eficiencia del 95 %, consolidándose como una opción técnica y económicamente viable.

Desde una perspectiva económica, el análisis con BAT-PAC reveló que el NMC dopado con aluminio es el material más competitivo para aplicaciones en vehículos eléctricos, con un costo estimado de \$11.533 por paquete de baterías. Sin embargo, el costo y la disponibilidad de los elementos dopantes, como el aluminio, deben ser considerados, ya que pueden afectar tanto el precio de producción como la escalabilidad de la tecnología.

Se realizó también una consideración del reciclado de estos materiales, destacando la necesidad de procesos más eficientes para recuperar metales valiosos como el cobalto y el níquel. Esto es fundamental para la sostenibilidad a largo plazo de la industria de baterías de ion litio.

En definitiva, la implementación de avances tecnológicos en la síntesis de materiales catódicos, como el dopaje y recubrimiento, junto con un enfoque en la optimización de los sistemas de gestión de baterías, resulta crucial para el desarrollo de baterías de ion litio más seguras, eficientes y rentables. El NMC dopado con aluminio se destaca como el material

más prometedor para aplicaciones futuras, especialmente en el ámbito de la electromovilidad, al ofrecer una solución equilibrada entre costo y rendimiento.

## VII. REFERENCIAS

- [1 N. Bonsu, «Towards a circular and low-carbon economy: insights from the transitioning  
] to electric vehicles and net zero economy,» *Journal of cleaner production*, February  
2020.
- [2 Z. Zhou, «Investigating thermal runaway characteristics and trigger mechanism of the  
] parallel lithium-ion battery,» *Applied Energy*, July 2023.
- [3 R. Herce, 2021. [En línea]. Available:  
] [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/66192453/2021.\\_Cosmovision\\_CXIX.\\_Volta-libre.pdf?1617724230=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAlessandro\\_Volta\\_De\\_la\\_electricidad\\_anim.pdf&Expires=1693809561&Signature=AQQOLZpXKrXqLLoJFLotjh0KkrOxn5~k](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/66192453/2021._Cosmovision_CXIX._Volta-libre.pdf?1617724230=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAlessandro_Volta_De_la_electricidad_anim.pdf&Expires=1693809561&Signature=AQQOLZpXKrXqLLoJFLotjh0KkrOxn5~k).
- [4 P. Kurzweil, «Gaston Planté and his invention of the lead-acid battery-The genesis of  
] the first practical rechargeable battery,» *Journal of power sources*, January 2010.
- [5 Y. Liang, «InfoMat,» 28 march 2019. [En línea]. Available:  
] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/inf2.12000>.
- [6 Canaribat, «Canaribat,» Marzo 2022. [En línea]. Available:  
] <https://www.canaribat.es/baterias/baterias-electricas-historia-de-su-evolucion/>.
- [7 Microtex, «Microtex,» mayo 2023. [En línea]. Available:  
] <https://microtexindia.com/es/vehiculos-electricos/>.
- [8 Y. Nishi, «Past, present and future of lithium-ion batteries: Can new technologies open  
] up new horizons,» *lithium-ion batteries*, pp. 21-39, 2014.
- [9 P. Kamat, «Lithium-ion batteries and beyond: celebrating the 2019 nobel prize in  
] chemistry- a virtual issue,» *ACS Energy letters*, 2019.
- [1 H. I. U. (HIU), «Lithium-ion batteries - Current state of the art and anticipated  
0] developments,» *Journal of Power Sources*, 10 Septiembre 2020.
- [1 Cochilco, «El mercado del litio, desarrollo reciente y proyecciones al 2035,» 2023.  
1]
- [1 G. Zubi, «The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives,» *Renewable  
2] and Sustainable Energy Reviews*, Junio 2018.
- [1 Y. Liu, R. Zhang, J. Wang y Y. Wang, «Current and future lithium-ion battery  
3] manufacturing,» *iScience*, 2021.
- [1 J. Jyoti, B. Pratap Singh y S. Kant Tripathi, «Recent advancements in development of  
4] different cathode materials for rechargeable lithium ion batteries,» *Journal of Energy Storage*, 2021.

- [1] D. He, J. Wang y B. Li, «Research advances on thermal runaway mechanism of lithium-ion batteries and safety improvement,» *Sustainable materials and technologies*, 2024.
- [1] B. Whang, X. Li, X. Zhang, B. Luo y M. Jin, «Adaptable silicon-carbon nanocables sandwiched between reduced graphene oxide sheets as lithium ion battery anodes,» *ACS NANO*, 2013.
- [1] H. Hossain, M. Asaduzzaman, N. Hossain, A. Islam y H. Mobarak, «Advances of lithium-ion batteries anode materials—A review,» *Chemical Engineering Journal Advances*, 2023.
- [1] Y. Lu, Q. Zhang y J. Chen, «Recent progress on lithium-ion batteries with high electrochemical performance,» *Science China Chemistry*, 2019.
- [1] H. Oliveira Filho, H. Zanin, R. Monteiro y M. Barbosa, «High-nickel cathodes for lithium-ion batteries: From synthesis to electricity,» *Journal of Energy Storage*, 2024.
- [2] G. Jun Chung, J. Han y S. - W. Song, «Fire preventing LiPF<sub>6</sub> and ethylene carbonate-based organic liquid electrolyte system for safer and outperforming lithium ion batteries,» *ACS Applied materials & interfaces*, 2020.
- [2] L. Porcarelli, A. Shaplov, M. Salsamendi, J. Nair, Y. Vygodskii, D. Mecerreyes y C. Gerbaldi, «Single-Ion Block Copoly(ionic liquid)s as Electrolytes for All-Solid State Lithium Batteries,» *Applied Materials & Interfaces*, 2016.
- [2] Y. Song, X. Liu y D. Ren, «Simultaneously blocking chemical crosstalk and internal short circuit via Gel-Stretching derived nanoporous non-shrinkage separator for safe lithium-ion batteries,» *Advanced Materials*, 2021.
- [2] Z. Yu, S. Jiao, J. Tu, Y. Luo y H. Jiao, «Rechargeable nickel telluride/aluminum batteries with high capacity and enhanced cycling performance,» *ACS NANO*, 2020.
- [2] K. Luo, M. Roberts, N. Guerrini, N. Tapia-Ruiz, R. Hao, F. Massel y D. Pickup, «Anion redox chemistry in the cobalt free 3d transition metal oxide intercalation electrode Li[Li<sub>0,2</sub>Ni<sub>0,2</sub>Mn<sub>0,6</sub>]O<sub>2</sub>,» *JACS*, 2016.
- [2] Y. Shen, X. Shen, M. Yang, J. Qian, Y. Cao, H. Yang y Y. Luo, «Achieving desirable initial coulombic efficiencies and full capacity utilization of Li-Ion Batteries by Cphite Anodechemical,» *Advanced Functional Materials*, 2021.
- [2] J. Tang, S. Chen, Y. Yuan, X. Cai y S. Zhou, «In situ formation of graphene layers on graphite surfaces for efficient anodes of microbial cells,» *Biosensors and Bioelectronics*, 2015.
- [2] J. Goodenough y K.-S. Park, «The Li-Ion rechargeable battery: A perspective,» *Journal of the american chemical Society*, 2013.
- [2] C. Liu, Z. Neale y G. Cao, «Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries,» *Materials Today*, 2016.
- [2] G. Sun, F.-D. Yu, L. Deng y M.-j. Wang, «Local electronic structure modulation enhances operating voltage in Li-rich cathodes,» 2019.

- [3 S. He, S. Huang, Y. Zhao y H. Qin, «Design of a dual-electrolyte battery system based on a high -energy NCM811-Si/C Battery electrode-compatible electrolyte,» *Energy, environmental and catalysis applications*, 2021.
- [3 S. Singh, A. Raj, M. Ranjan Panda y R. Sen, «Study of higher discharge capacity, phase transition and relative structural stability in Li<sub>2</sub>FeSiO<sub>4</sub> cathode upon lithium extraction using an experimental and theoretical approach and full cell prototype study,» *ACS applied energy materials*, 2019.
- [3 S. Li, J. Zheng y M. Fu, «Direct Observation of Defect-Aided Structural Evolution in a Nickel-Rich Layered Cathode,» *Angewandte chemie international edition*, 2020.
- [3 D. Luo, S. Fang, Q. Tian, L. Qu y L. Yang, «A new insight into countering capacity and voltage degradation for high-energy lithium-ion batterie,» *Nano Energy*, 2017.
- [3 U. n. d. l. plata, «El litio en Argentina: Visiones y aportes multidisciplinarios desde la UNLP,» Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/50/35250/03d14e39ff204a5cd0c0ccdefe63a493.pdf>.
- [3 M. Jeong , H. Kim y W. Lee, «Stabilizing effects of Al-doping on Ni-rich LiNi<sub>0.80</sub>Co<sub>0.15</sub>Mn<sub>0.05</sub>O<sub>2</sub> cathode for Li rechargeable batteries,» *Journal of power sources*, 2021.
- [3 X. Wang , Y. Liao y L. Xing, «Maintaining structural integrity of 4.5 V lithium cobalt oxide cathode with fumaronitrile as a novel electrolyte additive,» *Journal of power sources*, 2017.
- [3 C.-F. Lin, Y. Qi y S. b. Lee, «Nanoscale Protection Layers To Mitigate Degradation in High-Energy Electrochemical Energy Storage Systems,» *Accounts of chemical research*, 2018.
- [3 M. Jeong , S. Ahn y H. Nara, «New approach for enhancing electrical conductivity of electrodeposited Si-based anode material for Li secondary batteries: Self-incorporation of nano Cu metal in Si–O–C composite,» *Nano energy*, 2016.
- [3 Y. Preger, S. Ivanov y J. Lamb, «Multi-scale thermal stability study of commercial lithium-ion batteries as a function of cathode chemistry and state-of-charge,» *Journal of power sources*, 2019.
- [4 D. Wood, J. Li y C. Daniel, «Prospects for reducing the processing cost of lithium ion batteries,» *Journal of power sources*, 2015.
- [4 Y. Xie, H. Gao y Z.-F. Ma, «Identifying Active Sites for Parasitic Reactions at the Cathode–Electrolyte InterfaceClick to copy article link,» *The journal of physical chemistry letters*, 2019.
- [4 Y. Lyu, X. Wu, K. Wang, Z. Feng, T. Cheng y Y. Liu, «An overview on the advances of LiCoO<sub>2</sub> cathodes for lithium-ion batteries,» *Advanced energy materials*, 2020.
- [4 [En línea]. Available: [https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-22526?formula=LiCoO<sub>2</sub>](https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-22526?formula=LiCoO2).

- [4 K. Kim, P. Muralidharan, H.-W. Lee, R. Ruffo, Y. Yang y H. Peng, «Spinel LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanorods as lithium ion battery cathodes,» *Nani letters*, 2008.
- [4 [En línea]. Available: [https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-5/1272804?formula=LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>](https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-5/1272804?formula=LiMn2O4).
- [4 L. X. Yuan, Z. H. Wang, W. X. Zhang, X. L. Hu, J. T. Chen, Y. H. Huang y J. Goodenough, «Development and challenges of LiFePO<sub>4</sub> cathode material for lithium-ion batteries,» *Energy & Environmental Science*, 2020.
- [4 [En línea]. Available: [https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-7/19017?formula=LiFePO<sub>4</sub>](https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-7/19017?formula=LiFePO4).
- [4 M. Hekmatfar, A. Kazzazi, G. Gebresilassie , H. Ivana y S. Passerini, «Understanding the electrode/electrolyte interface layer on the Li-rich nickel manganese cobalt layered oxide cathode by xps,» *ACS Applied materials & interfaces*, 2019.
- [4 [En línea]. Available: [https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-9/1222510?formula=Li<sub>3</sub>MnCoNiO<sub>6</sub>](https://next-gen.materialsproject.org/materials/mp-9/1222510?formula=Li3MnCoNiO6).
- [5 A. Bayri, E. Gocer y S. Avci, «LiNi<sub>0,8</sub>Co<sub>0,15</sub>Ti<sub>0,05</sub>O<sub>2</sub>: Synthesis by solid state reaction and investigation of structural and electrochemical properties with enhanced battery performance,» *Journal of materials science*, 2020.
- [5 F. Öksüzoglu, S. Ates, O. M. Özkendir y G. Celik, «Structure and ionic conductivity of NASICON-type LATP solid electrolyte synthesized by the solid-state method,» *Ceramics International* , 2024.
- [5 X. Jiang, S. Chu, Y. Chen, Y. Zhong, Y. Liu y Z. Shao, «LiNi<sub>0.29</sub>Co<sub>0.33</sub>Mn<sub>0.38</sub>O<sub>2</sub> polyhedrons with reduced cation mixing as a high-performance cathode material for Li-ion batteries synthesized via a combined co-precipitation and molten salt heating technique,» *Journal of alloys and compounds*, 2017.
- [5 C. Zhang, H. Liu, Z. Qie, Z. Hu y J. Xue, «Structural evolution, synthesis mechanism and thermal conductivity of high-entropy ceramic prepared by concurrent chemical coprecipitation method,» *Ceramics International* , 2023.
- [5 S. C. Pillai, «Sol-Gel Processed Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries,» *Adv.Sol-Gel Deriv. Materials Technol.*, 2017.
- [5 C. Chen, H. Wu, D. Zhou, D. Xu, Y. Zhou y J. Guo, «Sol-gel synthesis of nano Li<sub>1.2</sub>Mn<sub>0.54</sub>Ni<sub>0.13</sub>Co<sub>0.13</sub>O<sub>2</sub> cathode materials using DL-lactic acid as chelating agent,» *Ceramics International*, 2021.
- [5 P. Benedek, N. Wenzler, M. Yarema y V. C. Wood, «Low temperature hydrothermal synthesis of battery grade lithium iron phosphate,» *RSC Advances*, 2017.
- [5 S. Kang, C. Wang, J. Chen, T. Meng y Jiaqiang, «Progress on solvo/hydrothermal synthesis and optimization of the cathode materials of lithium-ion battery,» *Journal of Energy Storage*, 2023.

- [5 W. Wen, J.-C. Yao, C.-C. Jiang y J.-M. Wu, «Solution-combustion synthesis of  
8] nanomaterials for lithium storage,» 2017.
- [5 H. Ghadimi Mahanipour, S. Masoudpanah y M. Adeli, «Regeneration of  
9]  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$  material from spent lithium-ion batteries by solution combustion  
synthesis method,» *Energy Storage*, 2024.
- [6 B. Vertruyen, N. Eshraghi, C. Piffet, J. Bodart y F. Boschini, «Spray-Drying of Electrode  
0] Materials for Lithium- and Sodium-Ion Batteries,» *Materials*, 2018.
- [6 Z. Wang, Z. Wang, H. Guo, W. Peng y X. Li, «Synthesis of  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  stabilized  $\text{LiCoO}_2$   
1] cathode material by spray-drying method and its high-voltage performance,» *Journal of  
Alloys and compounds*, 2015.
- [6 W. Cho, Y. J. Lim, S.-M. Lee, J. Kim, J.-H. Song y J.-S. Yu, «Facile Mn Surface Doping  
2] of Ni-Rich Layered Cathode Materials for Lithium Ion Batteries,» *ACS Applied  
Materials & Interfaces*, 2018.
- [6 L. Yang, X. Li, J. Liu, S. Xiong, X. Ma, P. Liu, J. Bai, W. Xu y Y. Tang, «Lithium-  
3] Doping Stabilized High-Performance  $\text{P}_2\text{-Na}_{0.66}\text{Li}_{0.18}\text{Fe}_{0.12}\text{Mn}_{0.7}\text{O}_2$  Cathode for  
Sodium Ion Batteries,» *JACS*, 2019.
- [6 F. Kong, C. Liang, R. C. Longo, D.-H. Yeon, Y. Zheng, J.-H. Park, S.-G. Doo y K. Cho,  
4] «Conflicting Roles of Anion Doping on the Electrochemical Performance of Li-Ion  
Battery Cathode Materials,» *Chemistry of materials*, 2016.
- [6 B. Jeevanantham y M. Shobana, «Enhanced cathode materials for advanced lithium-ion  
5] batteries using nickel-rich and lithium/manganese-rich  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ,» *Journal of  
Energy Storage*, 2022.
- [6 P. Guan, L. Zhou, Z. Yu, S. Yuandong, Y. Liu, F. Wu y Y. Jiang, «Recent progress of  
6] surface coating on cathode materials for high-performance lithium-ion batteries,»  
*Journal of Energy Chemistry*, 2020.
- [6 J. Wang, K. Wu, C. Xu y X. Hu, « $\text{LiNbO}_3$ -Coated  $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.54}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{O}_2$  as a  
7] cathode material with enhanced electrochemical performances for lithium-ion  
batteries,» *Materials in Electronics*, 2021.
- [6 B. Liu, X. Shi, L. Gu, Y. Wen y X. Sun, «Insights into  $\text{LiMXO}_4\text{F}$  (M-X=Al-P and Mg-  
8] S) as cathode coating for high-performance lithium-ion batteries,» *Applied materials  
& Interfaces*, 2022.
- [6 Y. Zhuang, W. Zhang, Y. Bao y M. Guan, «Influence of the  $\text{LiFePO}_4$  coating on the  
9] electrochemical performance of Nickel-rich cathode for lithium-ion batteries,» *Journal  
of Alloys and Compounds*, 2022.
- [7 Y. Zhang, X. Tan, L. Song, D. Mao, Z. Fan y S. Su, «Superb high voltage performance  
0] of  $\text{LiCoO}_2$  with structure and surface highly stabilized by co-doping trace Mg and F  
during one-pot solid-state synthesis,» *Materials Today Energy*, 2023.

- [7 B. Chu, Y.-J. Guo, J.-L. Shi, Y.-X. Yin, T. Huang y H. Su, «Cobalt in high-energy-  
1] density layered cathode materials for lithium ion batteries,» *Journal of Power Sources*,  
2022.
- [7 M. Zhang, M. Tan, H. Zhao, S. Liu, X. Shu y Y. Hu, «Enhanced high-voltage cycling  
2] stability and rate capability of magnesium T and titanium co-doped lithium cobalt oxides  
for lithium-ion batteries,» *Applied Surface Science*, 2018.
- [7 G. Bridge y E. Faigen, «Towards the lithium-ion battery production network: Thinking  
3] beyond mineral supply chains,» *Energy Research & Social Science*, 2022.
- [7 M. Umair, G. Nazir, G. Murtaza, N. Elamin y N. Muhammad, «Synthesis and  
4] characterization of Al and Zr-dual-doped lithium cobalt oxide cathode for Li-ion  
batteries using a facile hydrothermal approach,» *Colloids and Surfaces A:  
Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022.
- [7 K. Nie, X. Sun, J. Wang, Y. Wang, W. Qi y D. Xiao, «Realizing long-term cycling  
5] stability and superior rate performance of 4.5 V–LiCoO<sub>2</sub> by aluminum doped zinc oxide  
coating achieved by a simple wet-mixing method,» *Journal of Power Sources*, 2020.
- [7 A. Zhou, Y. Lu, Q. Wang, J. Xu, W. Wang y X. Dai, «Sputtering TiO<sub>2</sub> on LiCoO<sub>2</sub>  
6] composite electrodes as a simple and effective coating to enhance high-voltage cathode  
performance,» *Journal of Power Sources*, 2017.
- [7 J. Soo Kim, S. Lim, R. Ingole, H. Munakata, S.-S. Kim y K. Kanamura, «Improving the  
7] high-rate performance of LCO cathode by metal oxide coating: Evaluation using single  
particle measurement,» *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2023.
- [7 K. Chun Kim, J.-P. Jegal, S.-M. Bak, K. Chul Roh y K.-B. Kim, «Improved high-voltage  
8] performance of FePO<sub>4</sub>-coated LiCoO<sub>2</sub> by microwave-assisted hydrothermal method,»  
*Electrochemistry Communication*, 2014.
- [7 Z. Jian, W. Wang, M. Wang, Y. Wang, N. AuYeung y M. Liu, «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated LiCoO<sub>2</sub>  
9] as cathode for high-capacity and long-cycling Li-ion batteries,» *Chinese Chemical  
Letters*, 2018.
- [8 C. Zhenfei, M. Yangzhou, H. Xuanning, Y. Xiaohui, Y. Zexin, Z. Shihong, S.  
0] Guangsheng, X. Youlong y W. Cuie, «High electrochemical stability Al-doped spinel  
LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> cathode material for T Li-ion batteries,» *Journal of Energy Storage*, 2020.
- [8 Y. Luo, Q. Liu, Y. Guo, J. Guo, M. Xiang y W. Bai, «Improved long cycle performance  
1] of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> cathode material by Ni-B co-doping combined with truncated octahedron  
morphology,» *Journal of Alloys and Compounds*, 2022.
- [8 H. Wang, H. Jia, Y. Wang, N. Ju, X. Zhang, Y. Tian, S. Zhao, S. Niu, T. Jiang y H. Li,  
2] «(Fe, Ni)-ZIF-8 derived sp<sup>2</sup>-C-rich carbon as surface coating for enhancing commercial  
LiFePO<sub>4</sub> performance,» *Solid State Ionics*, 2022.
- [8 D.-L. Fang, J.-C. Li, X. Liu, P.-F. Huang, T.-R. Xu, M.-C. Qian y C.-H. Zheng,  
3] «Synthesis of a Co–Ni doped LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel cathode material for high-power Li-ion

- batteries by a sol–gel mediated solid-state route,» *Journal of Alloys and Compounds*, 2015.
- [8 H. Li, L. Xue, M. Ni, S. Savilov y S. Aldoshin, «Boosting the cycling performance of  
4] spinel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  by in situ  $\text{MnBO}_3$  coating,» *Electrochemistry Communications*, 2022.
- [8 Q. Zhu, S. Zheng, X. Lu, Y. Wan, Q. Chen, J. Yang, L.-Z. Zhang y Z. Lu, «Improved  
5] cycle performance of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  cathode material for aqueous rechargeable lithium  
battery by  $\text{LaF}_3$  coating,» *Journal of Alloys and Compounds*, 2016.
- [8 X. Feng, J. Zhang y L. Yin, «Effect of AIP coating on electrochemical properties of  
6]  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  cathode material for lithium ion battery,» *Materials Research Bulletin*, 2016.
- [8 Y. Li, L. Wang, K. Zhang, F. Liang, Y. Yao y L. Kong, «High performance of  $\text{LiFePO}_4$   
7] with nitrogen and phosphorus dual-doped carbon layer for lithium-ion batteries,»  
*Journal of Alloys and Compounds*, 2021.
- [8 T. Teng, L. Xiao, G. Qiu, J. Ran, X. Guo, Y. Zhu y H. Chen, «Effect of Nb doping at Fe  
8] site on the cycling stability and rate capability of  $\text{LiFePO}_4$  for lithium-ion batteries,»  
*Vacuum*, 2022.
- [8 E. Meng, M. Zhang, Y. Hu, F. Gong, L. Zhang y F. Li, «Solid-state attachments of Ag  
9] nanoparticles onto the surfaces of  $\text{LiFePO}_4$  cathode materials for Li storage with  
enhanced capabilities,» *Electrochimica Acta*, 2018.
- [9 X. Wang, Z. Feng, X. Hou, L. Liu, M. He, X. He, J. Huang y Z. Wen, «Fluorine doped  
0] carbon coating of  $\text{LiFePO}_4$  as a cathode material for lithium- T ion batteries,» *Chemical  
Engineering Journal*, 2020.
- [9 J. Geng, Z. Zou, T. Wang, S. Zhang, S. Zhong, W. Ling, X. Peng y X. Hu, «Synthesis  
1] and electrochemical behavior of  $\text{K}^+$  and  $\text{Mn}^{2+}$  co-doped  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  as a cathode  
material for lithium-ion batteries and the mechanism of modification,» *Journal of  
Electroanalytical Chemistry*, 2023.
- [9 X. Liu, L. Sun, N. Hung Vu, P. Thi Dien, L. Thi Hoa, D. Thi Lien y H. Xuan Nang,  
2] «Synthesis of  $\text{LiFePO}_4$ /carbon/graphene for high-performance Li-ion battery,» *Journal  
of Electroanalytical Chemistry*, 2023.
- [9 D. Nguyen, J. Kim y Y. Lee, «A hybrid Carbon– $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$  conductive  
3] coating for high current rate  $\text{LiFePO}_4$  cathode material,» *Chemical Engineering Journal*,  
2023.
- [9 M. Jeong, H. Kim, W. Lee, S.-J. Ahn, E. Lee y W.-S. Yoon, «Stabilizing effects of Al-  
4] doping on Ni-rich  $\text{LiNi}_{0.80}\text{Co}_{0.15}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$  cathode for Li rechargeable batteries,»  
*Journal of Power Sources*, 2020.
- [9 A. Yalçın, M. Demir, M. Oguz, M. Gönen y M. Akgün, «Synthesis of Sn-doped Li-rich  
5] NMC as a cathode material for Li-ion batteries,» *Electrochimica Acta*, 2023.

- [9 T. Sattar, S.-H. Lee, S.-J. Sim, B.-S. Jin y H.-S. Kim, «Effect of Mg-doping on the  
6] electrochemical performance of  $\text{LiNi}_{0.84}\text{Co}_{0.11}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$  cathode for lithium ion  
batteries,» *ScienceDirect*, 2020.
- [9 C. Lv, J. Yang, Y. Peng, X. Duan, J. Ma, Q. Li y T. Wang, «1D Nb-doped  
7]  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  nanostructures as excellent cathodes for Li-ion battery,»  
*Electrochimica Acta*, 2019.
- [9 D. Darjazi, E. Gonzalo, B. Acebedo, R. Cid, M. Zarrabeitia, F. Bonilla y F. Nobili,  
8] «Improving high-voltage cycling performance of nickel-rich NMC layered oxide  
cathodes for rechargeable lithium-ion batteries by Mg and Zr co-doping,» *Materials  
Today Sustainability*, 2022.
- [9 X. Yang, Y. Tang, Y. Qu, G. Shang, J. Wu, J. Zheng, Y. Lai, J. Li y Z. Zhang,  
9] «Bifunctional nano- $\text{ZrO}_2$  modification of  $\text{LiNi}_{0.92}\text{Co}_{0.08}\text{O}_2$  cathode enabling high-  
energy density lithium ion batteries,» *Journal of Power Sources*, 2019.
- [1 S. Engün, K. Burak Dermenci, U. Savaci, C. Erdogan y S. Turan, «Unveiling the  
00 Enhanced Electrochemical Performance of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$  sol-gel coated with  
] Li-La-Zr-O based gel,» *Journal of Alloys and Compounds*, 2023.
- [1 T. Kim, «Origin of over-cycling tolerance achieved by metal phosphate coating for  
01 transition metal oxide lithium-ion batteries,» *Solid State Ionics*, 2023.  
]
- [1 Y. Wang, S. Luo, P. Li, H. Zhang, S. Yan, H. Li, Y. Tian, F. Teng y Q. Wang,  
02 «Preparation and performance of Mg-doped spinel-structured  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  cathode  
] materials,» *Materials Today Communications*, 2022.
- [1 K. Knehr, J. Kubal, P. Nelson y S. Ahmed, «Battery Performance and cost Modeling for  
03 electric-drive vehicles: A manual for BatPac v5.0,» Julio 2022. [En línea]. Available:  
] [www.anl.gov/cse/batpac-model-software](http://www.anl.gov/cse/batpac-model-software).
- [1 C. Yu, S. Huang, H. Xu, J. Yan, K. Rong y M. Sun, «Optimal charging of lithium-ion  
04 batteries based on lithium precipitation suppression,» *Journal of Energy Storage*, 2024.  
]
- [1 S.-D. Zhang, M.-Y. Qi, S.-J. Guo y Y.-G. Sun, «Advancing to 4.6 V Review and  
05 Prospect in Developing High-Energy-Density  $\text{LiCoO}_2$  Cathode for Lithium-Ion  
] Batteries,» *Small Methods*, 2022.
- [1 I. Taniguchi, D. Song y M. Wakihara, «Electrochemical properties of  $\text{LiM}_{1/6}\text{Mn}_{11/6}\text{O}_4$   
06 (M = Mn, Co, Al and Ni) as cathode materials for Li-ion batteries prepared by ultrasonic  
] spray pyrolysis method,» *Power Sources*, 2022.
- [1 C. Jiang, Z. Tang, S. Wang y Z. Zhang , «A truncated octahedral spinel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  as  
07 high-performance cathode material for ultrafast and long-life lithium-ion batteries,»  
] *Power Sources*, 2017.

- [1 Y. Meng, Y. Li, J. Xia, Q. Hu, X. Ke, G. Ren y F. Zhu, «F-doped LiFePO<sub>4</sub>@N/B/F-08 doped carbon as high performance cathode materials for Li-ion batteries,» *Applied Surface Science*, 2019.
- [1 D. Ren, E. Padgett, Y. Yang, L. Shen y Y. Shen, «Ultrahigh Rate Performance of a 09 Robust Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Cathode with Preferentially Orientated Li-Diffusing Channels,» *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019.
- [1 Y. Shang, X. Lin, X. Lu, T. Huang y A. Yu, «Nano-TiO<sub>2</sub>(B) coated LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as cathode 10 materials for lithium-ion batteries at elevated temperatures,» *Electrochimica Acta*, 2015.
- [1 Y. Shang, X. Lin, X. Lu, T. Huang y A. Yu, «Nano-TiO<sub>2</sub>(B) coated LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as 11 cathode materials for lithium-ion batteries at elevated temperatures,» *Electrochimica Acta*, 2015.
- [1 Y. Shang, X. Lin, X. Lu, T. Huang y A. Yu, «Nano-TiO<sub>2</sub>(B) coated LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as 12 cathode materials for lithium-ion batteries at elevated temperatures,» *Electrochimica Acta*, 2015.

## IX. ANEXOS

### 9.1 Cátodo LCO dopado

Tabla 11: Material LCO Dopado.

Material dopante	Ventajas	Explicación de ventajas	Eficiencia %
Mg [70]	<p>1. Ayuda a estabilizar la estructura de la capa LCO, evita la transformación de fase de la estructura hexagonal a monoclinica, además ayuda a reducir la expansión volumétrica durante carga-descarga.</p> <p>2. Mejora la capacidad de retención, la seguridad termal, aumenta la difusión de litio.</p> <p>3. Reduce la resistencia interna del material.</p>	<p>1. El Mg puede reemplazar parcialmente los iones de Co, debido a la diferencia de radio iónico lo que genera tensiones internas que evitan la transición estructural. Además, el Mg forma enlaces más fuertes que reducen la expansión y contracción durante ciclos de carga-descarga.</p> <p>2. El Mg promueve una distribución más uniforme de los iones de litio, mejorando la reversibilidad y en consecuencia mantiene una alta capacidad durante ciclos.</p> <p>3. Presencia de Mg altera interacción de iones y estructura LCO, lo que reduce la posibilidad de reacciones exotérmicas, además reduce impedancia de interfaz electrodo-electrolito lo que representa una mejora en la eficiencia y potencia energética.</p>	74
Mn [71]	<p>1. Estabiliza la estructura cristalina.</p> <p>2. Mejora capacidad y eficiencia.</p> <p>3. Reducción de costo.</p>	<p>1. Mejora la estabilidad al formar enlaces más fuertes, además por su naturaleza la estructura es menos propensa a reacciones químicas indeseables.</p> <p>2. Una mejor movilidad iónica y electrónica puede resultar en tiempos de carga y descarga más eficientes.</p> <p>3. El Mn al ser un elemento muy abundante es más económico para producir materiales catódicos a escala.</p>	88
Ti [72]	<p>1. Reduce el comportamiento de agregación del material. Además,</p>	<p>1. El Ti al introducirse en la estructura cristalina se incorpora de manera uniforme y ocupa sitios específicos ayuda a mantener la estructura ordenada, estabilizando la fase,</p>	

	<p>suprime las transiciones de fase.</p> <p>2.Disminución de resistencia en el material dopado.</p> <p>3.Mejora desempeño altas tensiones y conductividad eléctrica.</p>	<p>provocando una estructura más estable y un mejor rendimiento durante ciclos.</p> <p>2.Se tiene una mejor movilidad de electrones y iones de Li reduciendo las barreras de transferencia de carga generando una capacidad inicial mayor.</p> <p>3.Operar altas tensiones expone condiciones más estresantes como mayores densidades de corriente y posibles reacciones secundarias, por lo que el dopar con Ti mejora la resistencia del material a estas condiciones.</p>	91
Mg-Ti [72]	<p>1.Suprime las transiciones de fase en el material LCO.</p> <p>2.Disminuye la resistencia de transferencia de carga.</p> <p>3.Mejora estabilidad térmica, conductividad eléctrica y reversibilidad del material.</p>	<p>1.El ion dopante de Mg y Ti pueden ocupar sitios específicos en la red cristalina, estabilizando la fase y suprimiendo la transición a fases menores.</p> <p>2.Mg y Ti reducen o reparan defectos en la estructura cristalina de manera que facilita el movimiento de iones Li y reduce la barrera para transferencia de electrones.</p> <p>3.Los iones de Mg y Ti al ser incorporados en la red cristalina forman enlaces más fuertes, reduciendo la susceptibilidad del material a reacciones químicas indeseables. Además, resulta una red más densa y uniforme que conduce mejor el calor.</p>	92
Sr [73]	<p>1.Aumento de la conductividad eléctrica y capacidad específica.</p> <p>2.Impedancia del electrodo disminuye con aumento de Sr. Mejor capacidad de descarga.</p> <p>3.Disminuye tasa de desvanecimiento disminuye con aumento de Sr (hasta 5%mol).</p>	<p>1.El radio iónico <math>Sr^{+2}</math> es más grande que <math>Co^{+3}</math>, <math>Sr^{+2}</math> no encaja en los sitios del cobalto en cambio migra a espacios intercalares lo que estabiliza la estructura de LCO.</p> <p>2.Los iones actúan como pilares entre las capas LCO proporcionando estabilidad durante la inserción y extracción de iones de litio.</p> <p>3.Mejora la movilidad de iones de litio por lo que mejora la conductividad y capacidad. Impedancia menor representa menor resistencia a la transferencia de iones de litio y electrones en el material. Sr reduce la formación de microfisuras causando un</p>	94

		menor desvanecimiento de la capacidad en el tiempo.	
Al-Zr [74]	1. Conversión de micro a nanopartículas al dopar, lo que mejora el área superficial efectiva. 2. Mejora rendimiento electroquímico, aumentando el potencial y la reversibilidad.	1. Dopar con Al-Zr influye en la nucleación y crecimiento de las partículas durante la síntesis, formando las nanopartículas que al tener una mayor área superficial puede facilitar las reacciones de superficie y mejoran la cinética de reacción. 2. Aumenta la conductividad eléctrica con dopar Al-Zr al facilitar el movimiento de electrones, lo que es crucial para las reacciones redox en carga-descarga. El dopaje Al-Zr refuerza la estructura provocando que sea más resistente a tensiones, mejorando la capacidad de retención.	96

## 9.2 Cátodo LCO recubierto.

Tabla 12: Material LCO Recubierto.

Material recubierto	Ventajas	Explicación de ventajas	Eficiencia %
Al [75]	1. Mejora estabilidad ciclo carga. 2. Mejora rendimiento electroquímico. 3. Retención de capacidad después de ciclos prolongados. 4. Capa de recubrimiento delgada y uniforme.	1. Presenta compatibilidad de red con LCO, debido que sus estructuras cristalinas son similares y pueden integrarse sin causar tensiones o no obstaculizar la difusión de iones litio. 2. Mejora los ciclos como el rendimiento de tasa de los electrodos de LCO, especialmente a voltajes elevadas y temperaturas altas. 3. El recubrimiento permite una retención de 80% después de 650 ciclos de lo que es una estabilidad alta a largo plazo. 4. Se logra por medio de una síntesis de mezcla húmeda.	74
Ti [76]	1. Interacciones con el electrolito. 2. Resistencia a reacciones interfaciales.	Recubrir con Ti interactúa con productos de descomposición del electrolito como HF, lo que forma una interfase estable que protege el	86

	<p>3.Estabilidad térmica y electroquímica.</p> <p>4.Mejor impedancia</p>	<p>material activo LCO. Así mejora el rendimiento cíclico.</p>	
Al-Ti [77]	<p>1.Mejora Estabilidad de la interfaz y la difusión de iones litio.</p> <p>2.Menor resistencia a la transferencia de carga.</p> <p>3.Reducción de la polarización del electrodo.</p>	<p>1. Proporciona una capa protectora que mejora la estabilidad de la interfaz.</p> <p>2.Mejora eficiencia es beneficioso para la rapidez de respuesta de la batería durante los ciclos de carga y descarga.</p> <p>3.No afecta la estructura cristalina original del material, por lo que mantiene las propiedades intrínsecas.</p>	89
FePO4 [78]	<p>1.Mejora Retención de capacidad.</p> <p>2.Preservación de morfología.</p> <p>3.Protege de ataques químicos.</p> <p>4.Reducción Impedancia.</p>	<p>1. Es un material químicamente inactivo, pero electroquímicamente activo, esto se debe que no participa en reacciones químicas perjudiciales, pero si facilita la difusión de iones litio.</p> <p>2. Se logra por medio del recubrimiento asistido por microondas.</p> <p>3. Protege de ataques por parte del electrolito, esto ayuda a prevenir la disolución de iones de cobalto en el electrolito.</p> <p>4. Suprime el crecimiento de impedancia por reacciones secundarias dañinas entre el material del cátodo y el electrolito. Esto se refleja como menor resistencia interna, por tanto, mejor eficiencia de la batería.</p>	97
PPY [79]	<p>1.Aumenta conductividad electrónica.</p> <p>2.Protege contra la corrosión.</p>	<p>1. Crea una red conductiva en la superficie que aumenta la conductividad electrónica, reduciendo la resistencia a transferencia de carga.</p>	92

	3. Mejora capacidad de retención. 4. Mejora rendimiento de carga y descarga	2. Actúa como una cápsula protectora que evita el contacto directo con núcleo de LCO. 3. Mejora la difusión de iones de litio durante el proceso carga/descarga	
--	--	--	--

### 9.3 Cátodo LMO dopado.

Tabla 13: Material LMO Dopado.

Material dopante	Ventajas	Explicación de ventajas	Eficiencia %
Al [80]	1. Rendimiento electroquímico. 2. Estabilidad del cristal. 3. Disminución de parámetros de red cristalina. 4. Supresión distorsión Jahn-Teller.	1. Se debe a que conduce un contacto completo entre el electrolito y los materiales del cátodo. 2. Fuerte enlace Al-O mejora la estabilidad en proceso de inserción y deserción del ion litio. 3. Esto se traduce en un volumen celular más pequeño en LMO-Al. 4. El Al es un elemento efectivo para la supresión de la distorsión de Jahn-Teller.	74
Ni-B [81]	1. Supresión efecto Jahn-Teller. 2. Formación de morfología de octaedro truncado. 3. Mejor rendimiento electroquímico.	1. El dopaje B-Ni restringe el efecto J-T de manera que estabiliza la estructura cristalina. 2. Mitiga la disolución de Mn, lo cual mejora la estabilidad y rendimiento. 3. Mejora la capacidad de tasa y ciclo de vida.	89
Mg-F [102]	1. Mejor a Estabilidad estructural. 2. Mejora la distribución de partículas. 3. Supresión efecto Jahn-Teller.	1. Se debe a que el ion $Mg^{+2}$ reemplaza parte de Mn, mejorando el promedio de valencia y estabiliza la estructura cubica de la espinela. 2. Con dopaje de Al la aglomeración y tamaño de partículas disminuyen, lo que indica que limita la aglomeración de polvo LMO 3. Fortalece el enlace Mn-O y fortalece la estructura espinela.	90

Co-Ni [83]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejor rendimiento electroquímico.</li> <li>2. Alta capacidad de descarga.</li> <li>3. Reduce parámetros de red cristalina.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se debe a la combinación de características de los materiales que aumentan el área superficial y densidad de carga.</li> <li>2. Es muy superiores al material LMO bruto.</li> <li>3. Debido a la mejor estabilidad estructural y rendimiento electroquímico.</li> </ol>	92
---------------	---	---	----

#### 9.4 Cátodo LMO recubierto.

Tabla 14: Material LMO Recubierto.

Material recubierto	Ventajas	Explicación de ventajas	Eficiencia %
Mn-B [84]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejor rendimiento de ciclado.</li> <li>2. Estabilidad estructural y cinética Li+ mejorada.</li> <li>3. Prevención de la degradación estructural.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aumenta la retención de capacidad a altas tasas en comparación LMO bruto.</li> <li>2. Se debe a una transición de fase cubica a tetragonal inhibida y una supresión de la disolución de Mn.</li> <li>3. Protege la degradación estructural durante los ciclos de carga y descarga.</li> </ol>	91
La [85]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejor rendimiento ciclado.</li> <li>2. Reducción de resistencia de transferencia de carga.</li> <li>3. Mejor difusión Li+.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El porcentaje de retención se mantiene con una capacidad de 99,7% después de 50 ciclos.</li> <li>2. Se expresa como una mayor tasa de reacción electroquímica.</li> <li>3. Mejora la difusión del ion litio que se ve reflejado en una mejor capacidad.</li> </ol>	96

Ni (Shang, Lin, Lu, Huang, & Yu, 2015)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejor retención de capacidad.</li> <li>2. Estabilidad mejorada a altas temperaturas.</li> <li>3. Supresión de la disolución de manganeso.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta retención de capacidad después de varios ciclos, esto se atribuye a la inserción/extracción no bloqueada de Li.</li> <li>2. Mantiene los rendimientos a altas temperaturas, entregando excelentes condiciones a condiciones extremas.</li> <li>3. Suprime la disolución de manganeso, lo que respalda la estabilidad estructural y permite la movilidad efectiva de los iones de Li.</li> </ol>	91
Al-P [86]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejora la capacidad de descarga y retención.</li> <li>2. Mejor rendimiento ciclado.</li> <li>3. Mejor capacidad de Tasa.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejora significativamente la retención de capacidad del material especialmente a altas temperaturas.</li> <li>2. Se debe a que Al-P actúa como una barrera entre los polvos de LMO y el electrolito.</li> <li>3. En altas tasas el material exhibe altas capacidades.</li> </ol>	94
Ti(Shang, Lin, Lu, Huang, & Yu, 2015)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Supresión de la formación de películas SEI indeseadas.</li> <li>2. Mejor rendimiento electroquímico.</li> <li>3. Retención de capacidad y mejora de la estabilidad.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ayuda a suprimir la formación de películas de SEI, lo que estabiliza la interfaz durante ciclos de uso y reduce la polarización.</li> <li>2. Facilita el transporte de iones de litio y reduce la polarización.</li> <li>3. La prevención del contacto directo con el electrolito y suprimió las reacciones secundarias que llevaron a la pérdida de capacidad.</li> </ol>	91

## 9.5 Cátodo LFP dopado.

Tabla 15: Material LFP Dopado.

Material dopante al Cátodo LFP	Ventajas	Explicación de ventajas	Eficiencia %
NPC (Nitrógeno, carbono y fosforo) [87]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejor conductividad eléctrica y actividad electrocatalítica.</li> <li>2. Tamaño de partículas uniformes.</li> <li>3. Protección efectiva de la estructura LFP.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La formación de enlaces polares por el carbono con los heteroátomos después de romper los enlaces no polares C-C, lo que cambia la población de la carga y la densidad.</li> <li>2. El tamaño de partículas más pequeño y uniforme genera mejor contacto eléctrico y acelera la difusión de los electrones como de iones de litio.</li> <li>3. Debido al fuerte efecto de puente del N o P entre la capa de carbono, la estructura de LFP está protegida mejorando el ciclo.</li> </ol>	74
Nb [88]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejora la conductividad eléctrica.</li> <li>2. Estabilidad estructural mejorada.</li> <li>3. Reducción de la polarización.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejora la tasa de difusión de <math>\text{Li}^+</math> en el cátodo así aumentando la conductividad electrónica.</li> <li>2. Al mejorar la estabilidad estructural, mejora la difusión y la integridad del material.</li> <li>3. Reduce la polarización entre carga y descarga, lo que indica una mejora en la cinética de la reacción.</li> </ol>	92
Ag [89]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejor Conductividad eléctrica.</li> <li>2. Estabilidad durante ciclos de carga.</li> <li>3. Mejor reacción de intercalación superficial.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Al mejorar la conductividad eléctrica de los materiales catódicos, se genera una mejora en la capacidad de almacenamiento de litio.</li> <li>2. Presenta alta estabilidad después de 80 ciclos.</li> <li>3. Las nanopartículas de Ag son altamente conductoras por lo que mejoran la reacción de intercalación superficial.</li> </ol>	90

<p>PVDF (Fluoruro de polivinilo) [90]</p>	<p>1. Mejor conductividad eléctrica y actividad electrocatalítica. 2. Formación de red conductiva tridimensional. 3. Efecto sinérgico de los defectos estructurales.</p>	<p>1. El dopaje con flúor acelera la disminución de la resistencia interfacial de la batería lo que refleja una mejora en la conductividad eléctrica. 2. Esta estructura proporciona una red conductiva tridimensional que mejora la transferencia de electrones y la difusión de iones de litio. 3. La incorporación de enlaces C-F junto con la estructura mesoporosa en el FC actúan como reservorios de almacenamiento de litio y aceleran la difusión de iones de litio y electrones.</p>	<p>93</p>
<p>K [91]</p>	<p>1. Estructura estabilizada y canal de difusión ampliado. 2. Soporte estable durante carga y descarga. 3. Reducción de defectos Anti-Sitio.</p>	<p>1. Al estabilizar la estructura y ampliar el canal de difusión de iones beneficia el rendimiento de batería. 2. Proporciona un soporte estable para reducir el efecto de volumen durante carga y descarga, lo que ayuda a mantener una estructura estable. 3. Reduce la concentración de defectos anti-sitio.</p>	<p>86</p>
<p>Mn [91]</p>	<p>1. Mejora de energía y la cinética de difusión. 2. Reducción del espacio de banda y mejora de la conductividad. 3. Uso de material Activo.</p>	<p>1. Esto por un mayor movimiento de los iones de litio dentro del material, lo que es crucial para el rendimiento. 2. El dopaje con Mn reduce el espacio de banda del LFP, lo que significa que el semiconductor lleva más electrones excitables que tienen implicaciones positivas para el aumento de la conductividad. 3. Puede ser utilizado como material activo que contribuye a mejorar las propiedades electroquímicas.</p>	<p>86</p>
<p>K-Mn [91]</p>	<p>1. Mejora de la capacidad específica y estabilidad del ciclo.</p>	<p>1. Al modificar la composición química y la estructura cristalina del LFP, mejora la capacidad y la</p>	

	<p>2. Mejor cinética de difusión y reducción de la impedancia electroquímica.</p> <p>3. Ampliación de los canales de difusión de iones.</p>	<p>liberación de iones de litio de manera más eficiente, además ayuda a estabilizar la estructura cristalina reduciendo la degradación del material al pasar el tiempo.</p> <p>2. La modificación estructural reduce la resistencia interna en la batería permitiendo una transferencia de carga más eficiente.</p> <p>3. El co dopaje genera un aumento del volumen de la red y amplía los canales donde se mueven los iones.</p>	95
--	---	--	----

### 9.6 Cátodo LFP recubierto.

Tabla 16: Material LFP Recubierto.

Material Recubierto Cátodo LFP	Ventajas	Explicación de ventajas	Eficiencia %
Carbono - Grafeno [92]	<p>1. Mejor conductividad eléctrica.</p> <p>2. Aumenta la capacidad específica.</p> <p>3. Reducción de aglomeración de partículas.</p>	<p>1. La co-modificación de grafeno y la capa de carbono crean una red conductiva que facilita el movimiento de electrones, mejorando el rendimiento electroquímico.</p> <p>2. Incrementa la capacidad de almacenamiento de iones de litio en el material, lo que traduce una mayor capacidad específica.</p> <p>3. El carbono y grafeno actúan como una barrera que previene el aglomero miento de partículas, lo que mantiene una alta superficie activa.</p>	94
Carbono – Nitrógeno [82]	<p>1. Mejor conductividad eléctrica</p> <p>2. Aumento de la capacidad de descarga específica.</p>	<p>1. Por el co-recubrimiento se tiene una red rica de carbono con configuración sp<sup>2</sup> que promueven la conductividad de electrones y iones a través de las nanopartículas.</p>	91

	3.Reducción de aglomeración.	2.Se tiene una mejor capacidad de almacenar iones de litio. 3.La estructura porosa del recubrimiento ayuda a mitigar los cambios de volumen del material y mejora su estabilidad estructural.	
La - Ti (LATP) [93]	1.Mejora en la capacidad de carga y descarga a bajos voltajes. 2. Mejora cinética de transferencia de iones. 3. Reducción voltaje de activación.	1.La presencia de La-Ti en la superficie proporciona más canales para transporte de iones de Li, esto permite la extracción de Li a voltaje bajos durante carga y regula la inserción de iones de Li en la descarga. 2. La interfaz entre LATP y el material del electrodo LFP reducen la resistencia interfacial y mitiga la discrepancia del potencial químico de Li en las interfaces. 3. El recubrimiento LATP permite que el cátodo LFP sea activo a un voltaje más bajo que LFP sin recubrir, así extendiendo el rango de voltaje operativo del material.	88

### 9.7 Cátodo NMC dopado.

Tabla 17: Material NMC Dopado.

Material dopante al Cátodo NMC	Ventajas	Explicación de ventajas	Eficiencia %
Al [94]	1.Alivio de cambios abruptos durante el ciclado. 2. Integridad estructural rígida mejorando las propiedades electroquímicas.	1.Se debe a la capacidad del Al de estabilizar la estructura cristalina, aliviando los cambios anisotrópicos de la red y los cambios de volumen. 2. Se debe a una preservación de un mayor grosor de LiO6 en estados de alta intercalación, lo que facilita la movilidad de los iones de litio.	95

	3. Mejor estabilidad térmica de cátodos estratificados ricos en Ni.	3. El dopaje retrasa las temperaturas de inicio de las transformaciones de fase durante proceso de calentamiento.	
Sn [95]	1. Mejora rendimiento electroquímico. 2. Estabilidad de la estructura en capas. 3. Mejora la estabilidad cíclica.	1. Se debe a que el radio iónico de Sn <sup>+4</sup> es más grande que el de otros iones metálicos, lo que amplía la trayectoria de difusión de Li <sup>+</sup> durante la inserción/extracción. 2. Contribuye una estructura en capas más estables debido a la alta energía de enlace Sn-O. 3. Mejora la estabilidad cíclica lo que mejora su rendimiento a largo ciclos de carga y descarga.	91
Mg [96]	1. Mejor estabilidad de estructura. 2. Rendimiento ciclado superior. 3. Reducción de la mezcla de cationes.	1. El Mg <sup>+</sup> al tener un radio iónico similar al del Li <sup>+</sup> , puede ocupar tanto los sitios de metales de transición como los de Li <sup>+</sup> . 2. Se debe a una mayor estabilidad estructural debido a la energía enlace más alta de Mg-O. 3. Reduce la mezcla de cationes, un fenómeno común de los materiales NMC.	73
Nb [97]	1. Reducción mezcla de cationes. 2. Incremento de la conductividad. 3. Mejor estabilidad cíclica.	1. El Nb <sup>+5</sup> se introduce a la red cristalina NMC, sustituyendo algunos de los iones metálicos en sus sitios, esto estabiliza los iones de níquel diciendo intercambio y la mezcla con iones de litio. 2. Nb <sup>+5</sup> incorporado en la estructura del NMC con lleva a una compensación de valencia, donde algunos iones Mn <sup>+4</sup> se reducen a Mn <sup>+3</sup> , esto amplía las trayectorias de los iones de litio y mejora la conductividad eléctrica. 3. La incorporación de Nb <sup>+5</sup> estabiliza la red por lo que reduce la	89

		degradación durante el ciclado repetido.	
Mg-Zr [98]	1.Estabilidad estructural mejorada. 2.Estabilidad ciclado-elevada. 3.Reducción de aglomeración de partículas.	1.Se estabiliza la red cristalina ya que los cationes de Mg, con radio iónico cercano a Ni <sup>+2</sup> y Li <sup>+</sup> , disminuyen el grado de mezcla de los cationes Li <sup>+</sup> /Ni <sup>+2</sup> , a su vez los cationes de Zr con radio iónico más grande pueden ampliar las vías de los iones de Li, lo que resulta en una difusión más rápida de Li <sup>+</sup> . 2. La incorporación de Mg y Zr aumentan el espacio entre las capas, lo que facilita la inserción y extracción de iones de litio. 3.Inhíbe la aglomeración, ya que las partículas están distribuidas de forma más uniforme y de menor tamaño.	71

### 9.8 Cátodo NMC recubierto.

Tabla 18: Material NMC Recubierto.

Material dopante al Cátodo NMC	Ventajas	Explicación de ventajas	Eficiencia %
Zr [99]	1.Mejora de la estabilidad estructural 2.Estabilidad mejorada en el ciclado y rendimiento a altas tasas de carga. 3.Reducción de la aglomeración de partículas y uniformidad en la distribución de elementos.	1.Los iones de Zr al incorporarse la estructura cristalina del cátodo expande los parámetros de la red, aumentando el espacio entre capas lo que facilita la difusión de iones. 2.El recubrimiento forma una capa en la superficie del cátodo que mejora la estabilidad al reducir la reacción del cátodo con el electrolito. 3.Durante el proceso de sinterización evita la aglomeración de las partículas y asegura una distribución uniforme.	82

La-Zr [100]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mejor estabilidad estructural.</li> <li>2. Estabilidad mejorada del ciclado.</li> <li>3. Formación de LaMO<sub>3</sub> y ZrO<sub>2</sub> que mejora el rendimiento electroquímico.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contribuyen a una mayor estabilidad estructural debido a la formación de LaMO<sub>3</sub> que permite la difusión de iones La.</li> <li>2. Al formarse una capa disminuye las reacciones del cátodo y electrolito lo que reduce la degradación del material.</li> <li>3. La capa produce una mejor retención de capacidad y un rendimiento mejorado en diferentes tasas de carga.</li> </ol>	79
FePO <sub>4</sub> [101]	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aumento de la estabilidad estructural.</li> <li>2. Disminución de la energía de activación del proceso de transferencia de carga Li<sup>+</sup>.</li> <li>3. Supresión de la formación de vacantes de oxígeno y capas SEI inestables.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se debe a la formación de una capa protectora que evita el contacto directo del cátodo con electrolito.</li> <li>2. Disminuye la energía de activación para el proceso de transferencia de carga de iones.</li> <li>3. Suprime la formación de vacantes de oxígeno y capas SEI.</li> </ol>	68

## 9.9 Diseño celda.

Para los cálculos del software, se tiene que la celda está compuesta por dos electrodos (cátodos y ánodos) cubiertos por dos colectores de corriente, con separadores colocados entre las capas. Los electrodos contienen materiales activos, conductores de carbono y aglutinantes.

En las celdas, las capas se apilan una encima de la otra y se sueldan en el electrodo positivo y negativo a través de los colectores de corriente. Luego, todas las capas apiladas se insertan en una bolsa rígida de aluminio recubierta de polímero, se llenan con electrolito y se sellan. Las pestañas positivas y negativas se extienden fuera de la bolsa para que puedan tener conexión eléctrica (ver Figura 32).

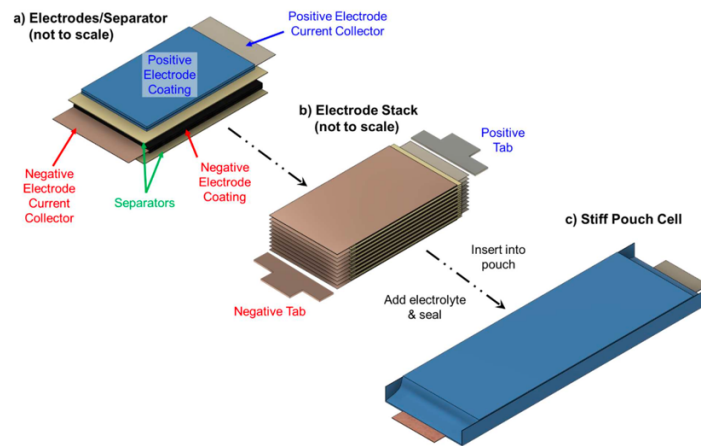


Figura 32: Esquema del diseño de una celda [103].

Se deben agregar al diseño: el espesor de los electrodos, el área de los electrodos y el número de capas bicelulares por celda, el resultado de estos valores establece las dimensiones totales de la celda. Para obtener el diseño de la celda se deben cumplir con un modelo de diseño de celda que consta de cinco ecuaciones que traducen la geometría de la celda en la potencia y energía del paquete de baterías.

En primer lugar, la energía total del paquete está definida por  $E_{Pack}$ , que se define como el producto de la capacidad (Ah) por el voltaje promedio (V) durante la descarga. Se calcula utilizando la Ecuación (3):

$$E_{Pack} = N_{Cell} * C_{Cell} * \left( U_E - \left( \frac{C_{Cell}}{3} \right) \frac{AS I_E}{A_{Pos}} \right) \quad (3)$$

|

Donde  $N_{cell}$  y  $U_E$  corresponden a entradas definidas por el usuario que corresponden al número de celdas en el paquete y al voltaje del circuito abierto (OCV) de una sola celda tomando el estado promedio de carga (SOC) durante un procedimiento respectivamente.  $C_{cell}$ ,  $A_{pos}$  y  $ASI_E$  son variables calculadas a partir del modelo y se refiere a la capacidad (Ah), el área del electrodo positivo ( $cm^2$ ) y la impedancia de energía específica del área ( $\Omega cm^2$ ), respectivamente de una sola celda. En donde  $C_{cell}$  se define por la ecuación (4):

$$C_{cell} = Q * \rho * \epsilon_{act} * A_{pos} * \delta_{pos} \quad (4)$$

En este caso  $Q$ ,  $\rho$  y  $\epsilon_{act}$  son entradas químicas definidas por el usuario que corresponden a la capacidad específica ( $\frac{Ah}{g}$ ), la densidad ( $\frac{g}{cm^3}$ ) y la fracción de volumen del material activo respectivamente.  $\delta_{pos}$  (cm) corresponde al espesor del electrodo positivo y  $A_{pos}$  se determina satisfaciendo la ecuación de potencia básica. Para lograr esto el software de BatPac requiere que se especifique la caída de voltaje inicial de vida (BOL) para la potencia nominal,  $\left(\frac{V}{U}\right)_P$  en donde V es el voltaje total durante el pulso de potencia y U es el OCV en el SOC en el inicio del pulso. El valor de  $\left(\frac{V}{U}\right)_P$  generalmente es mayor que 0,8, se utiliza para reflejar la tasa de degradación permitida en la batería. En este caso se utilizó un valor predeterminado de 0,8 en el software. El uso de este valor entrega la siguiente ecuación (5) rectificadora.

$$P_{pack} = N_{cell} * A_{pos} * I_P * U_P * \left(\frac{V}{U}\right)_P \quad (5)$$

En donde  $P_{pack}$  (W) corresponde a la potencia nominal de batería que es definida en la iteración del modelo.  $U_P$  (V) es el OCV de una sola celda en el SOC al inicio del pulso de energía. El  $I_P$  corresponde a la densidad de corriente calculada de una sola celda a la potencia nominal. Se determina la aplicación de la ley de Ohm por la ecuación (6):

$$I_P = \frac{U_P * \left(1 - \left(\frac{V}{U}\right)_P\right)}{ASI_P} \quad (6)$$

En este caso  $ASI_P$  es la impedancia específica del área ( $\Omega * cm^2$ ) de la celda a potencia nominal. Los ASI ( $ASI_P$  y  $ASI_E$ ) dependen del espesor del electrodo ( $\delta_{pos}$ ), el área del electrodo ( $A_{pos}$ ) y la densidad de corriente aplicada a la celda. Se representa por la ecuación (7):

$$ASI = f(\delta_{pos}, A_{pos}, I) \quad (7)$$

Con las ecuaciones anteriores se tiene un conjunto de ecuaciones con seis incógnitas:  $C_{Cell}$ ,  $A_{pos}$ ,  $\delta_{pos}$ ,  $I_P$ ,  $ASI_P$  y  $ASI_E$ . Para que se vinculen estas ecuaciones en la iteración del modelo se debe ingresar la energía total del paquete o la capacidad del paquete para definir el tamaño del paquete.

### **9.10 Diseño módulo.**

El software asume que todas las celdas del paquete están contenidas dentro de módulos. La ventaja es que esto incluye una fabricación más sencilla, un escalado más fácil del paquete, mayor seguridad y un mejor seguimiento.

Las celdas de los módulos se apilan una encima de la otra con un conductor térmico de aluminio colocado entre cada celda. Ambos paneles contienen interconexiones de celdas. Las interconexiones están soldadas a las pestañas de las celdas y se pueden configurar para conectar celdas en serie o en paralelo.

Los terminales se utilizan para conectar entre módulos, dejando un espacio cerca del panel de interconexión frontal para la unidad de administración del módulo, que está conectada al sistema de administración de batería más grande. Todo el conjunto de componentes (celdas, conductores de aluminio, interconexiones y gestión de módulos) está contenido dentro de un gabinete. El software asume que la carcasa está hecha de acero. Los conductores encajan perfectamente dentro del recinto, por lo que hay contacto directo entre los conductores térmicos de aluminio alrededor de las celdas y la pared del recinto (ver Figura 33).

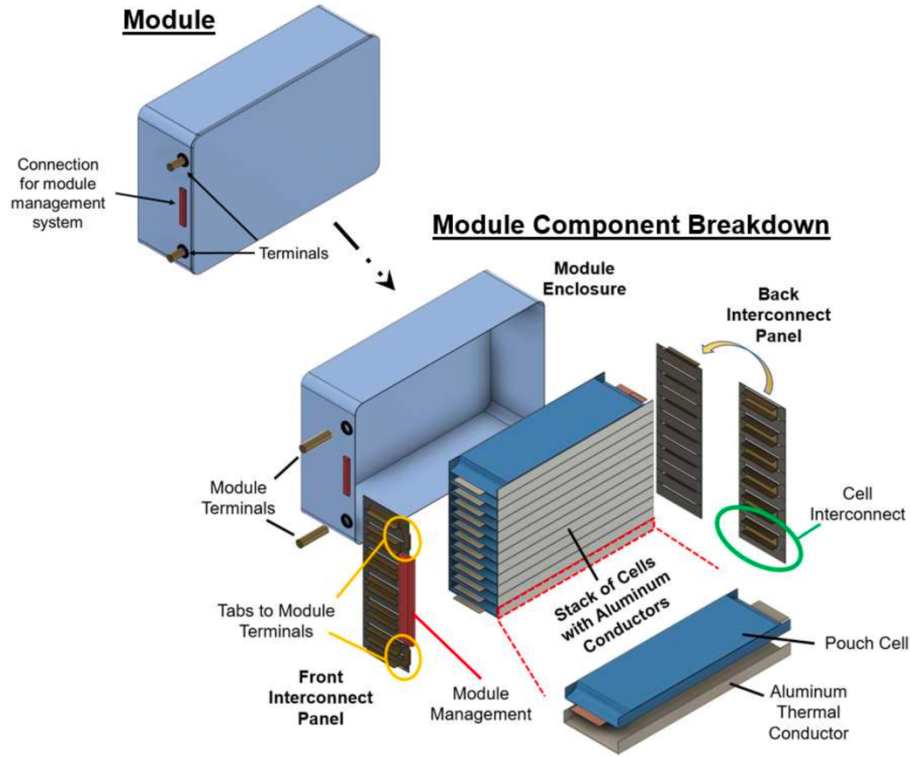


Figura 33: Desglose de los componentes del módulo en la batería [103].

El software supone que el módulo es igual a la longitud de la celda más longitudes adicionales en la parte delantera ( $L_{excess,front}$ ) y trasera ( $L_{excess,back}$ ) para tener en cuenta las disposiciones de liberación de gas, el sistema de gestión del módulo y las paredes del gabinete.  $L_{excess,front}$  y  $L_{excess,back}$  tienen valores predeterminados de 6 y 2 (mm) respectivamente. Tener en cuenta que la longitud de los terminales que sobresalen del módulo no está incluida en su longitud, se expresa por la ecuación (8):

$$L_{mod} = L_{cell} + L_{excess,front} + L_{excess,back} \quad (8)$$

La altura del módulo es igual al ancho de la celda más los espesores de las paredes del módulo y los conductores de aluminio. Los conductores térmicos de aluminio se extienden por los lados de las celdas, lo que aumenta su ancho cuando se ensamblan en el módulo, por la siguiente ecuación (9):

$$H_{mod} = W_{cell} + 2 * (\delta_{wall} + \delta_{Al}) \quad (9)$$

$\delta_{Al}$  corresponde al espesor del conductor de aluminio (predeterminado de 0,4 mm para los vehículos eléctricos) y  $\delta_{wall}$  es el espesor de la pared del módulo de acero de 0,3 mm. El ancho del módulo ( $W_{mod}$ ) está relacionado con el espesor total de las celdas, conductores de aluminio y paredes del módulo. Se calcula por la ecuación (10):

$$W_{mod} = N_{cell/mod} * (\delta_{cell} + \delta_{Al}) + 2 * \delta_{wall} \quad (10)$$

Los componentes que componen a un módulo son celdas (ver Figura 34), conductores térmicos de aluminio entre cada celda, paneles de interconexión de celdas, interconexiones de celdas, pestaña de modulo, un sistema de gestión de módulo, terminales de modulo y gabinete de modulo. Para encontrar las dimensiones de los paneles de interconexión son polímeros y su longitud es igual a la suma de todas las celdas y conductores de aluminio, como se representa en la siguiente ecuación (11):

$$L_{inct,panel} = N_{cell/mod} * (\delta_{cell} + \delta_{Al}) - 0,5 * \delta_{cell} \quad (11)$$

En la ecuación anterior la variable  $0,5 * \delta_{cell}$  es un factor de corrección para tener en cuenta el hecho de que no es necesario que el panel se extienda hasta la parte superior de la pila. Los anchos de los paneles son iguales al 90% del ancho de la celda ( $W_{cell}$ ). Las interconexiones de las celdas están hechas de cobre. Su longitud se calcula según la siguiente ecuación (12):

$$L_{inct,cell} = \delta_{cell} + \delta_{Al} + 2 * (L_{ext,term} - \delta_{inct,panel}) \quad (12)$$

Los volúmenes para el sistema de gestión del módulo y la liberación del gas se contabilizan en  $L_{excess,front}$  y  $L_{excess,back}$ , mientras que se supone que la masa es igual a 46 g y 5g por módulo, respectivamente. La longitud y ancho de los conductores térmicos de aluminio se dan por las siguientes ecuaciones (13) y (14):

$$L_{Al} = L_{pos} + 6 \text{ mm} \quad (13)$$

$$W_{Al} = W_{cell} + 2 * \delta_{Al} + 0,95 * 2 * \delta_{cell} \quad (14)$$

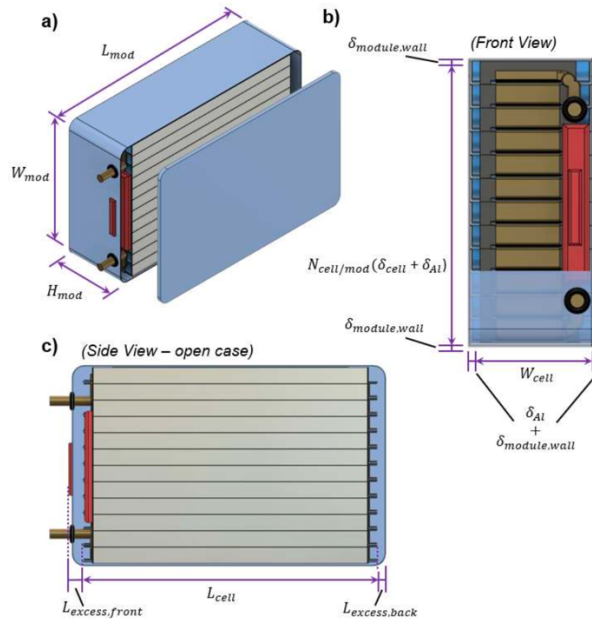


Figura 34: Esquema interno del módulo [103].

### 9.11 Diseño de bastidor de módulos.

El software toma en consideración que todos los módulos se colocan dentro de filas antes de construir el paquete. Se conectan los módulos mediante interconexiones de módulos y se colocan almohadillas de polímero entre los módulos como soporte. El bastidor en hilera también contiene un sistema de enfriamiento compuesto por paneles refrigerantes, una entrada, una salida y tubos de conexión entre los paneles. BATPAC asume que los paneles refrigerantes están hechos de acero inoxidable para proporcionar soporte estructural y resistencia a la corrosión del refrigerante líquido (ver Figura 35).

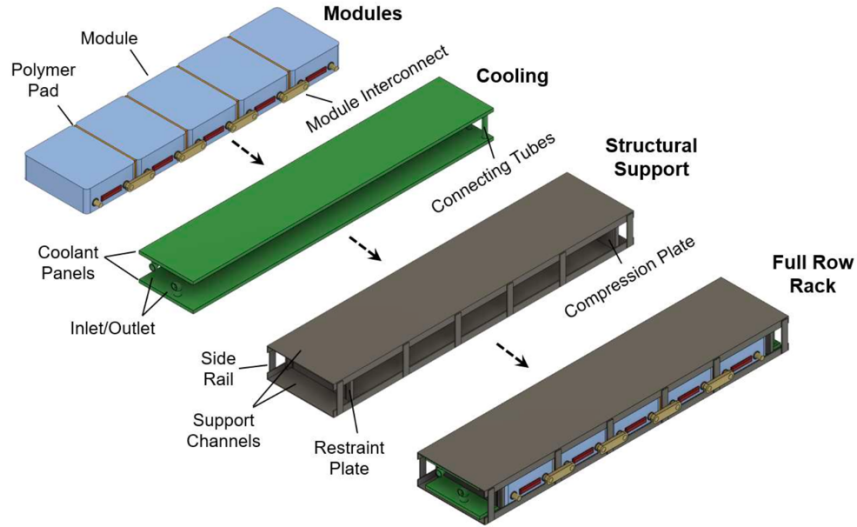


Figura 35: Desglose de los componentes que tiene bastidor de módulos [103].

Los componentes que contiene un bastidor en fila son: almohadillas de polímero, interconexiones de módulos, paneles de enfriamiento de acero inoxidable y soporte estructural de acero (ver Figura 36).

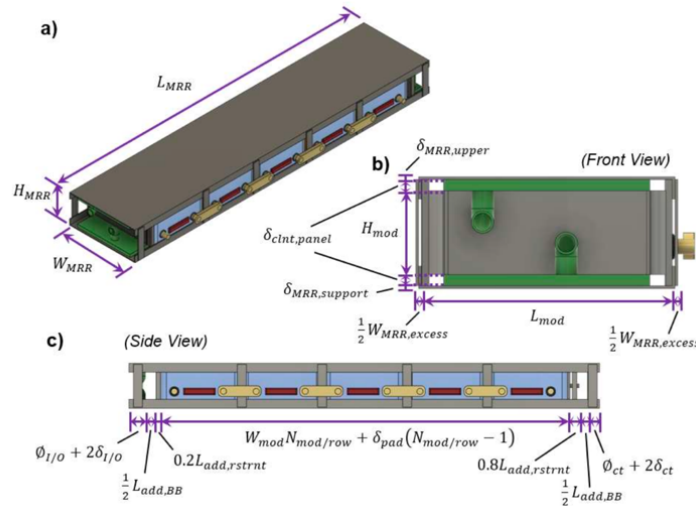


Figura 36: Vista de perfil, frontal y lateral del bastidor de módulos [103].

La longitud del bastidor de hileras, es el ancho de todos los módulos y espesores de las almohadillas de polímeros ( $\delta_{pad}$ ) más longitudes adicionales para sujeción ( $L_{add,rstrnt}$ ), el refrigerante ( $L_{add,cint}$ ) y las barras colectoras ( $L_{add,BB}$ ), como se describe en la siguiente ecuación (15):

$$L_{MRR} = W_{mod} * \frac{N_{mod}}{row} + \delta_{pad} * \left( \frac{N_{mod}}{row} - 1 \right) + L_{add,rstrnt} + L_{add,clnt} + L_{add,BB} \quad (15)$$

Las variables  $L_{add,rstrnt}$  que representa la longitud adicional necesaria para acomodar las placas de sujeción en la parte delantera y trasera del bastidor y  $L_{add,BB}$  proporciona espacio adicional en la parte delantera y trasera de la fila de bastidores para posibles conexiones de barras colectoras, los valores de estas variables están predeterminados de 15 y 10 mm respectivamente. En el caso de  $L_{add,clnt}$  depende de las dimensiones de colectores de entrada y salida en la parte frontal del bastidor y de la conexión del refrigerante, esta variable se calcula por la siguiente ecuación (16):

$$L_{add,clnt} = \phi_{\frac{I}{O}} + \phi_{ct} + 2 * \left( \delta_{wall,\frac{I}{O}} + \delta_{wall,ct} \right) \quad (16)$$

En esta ecuación los subíndices  $\frac{I}{O}$  y ct se refieren a los colectores de entrada/salida y a los tubos de conexión respectivamente. La variable  $\phi$  es el diámetro (con valores predeterminados de 25 mm para I/O y 12 mm para ct) y  $\delta_{wall}$  es el espesor de las paredes (con valores predeterminados de 0,5 mm para I/O y 0,4 mm para ct).

En la siguiente ecuación (17) se tiene que el ancho MRR es igual a la longitud de un módulo más el exceso de ancho (por defecto se tiene de 5mm) para el ensamblaje de las estructuras de soporte acero.

$$W_{MRR} = L_{Mod} + W_{MRR,excess} \quad (17)$$

La altura del bastidor de la fila se calcula por la ecuación en donde es igual a la altura de un módulo, el espesor de ambos paneles refrigerantes, el espesor del canal de acero superior tiene un valor predeterminado de 1mm y el espesor del canal de acero de soporte en la parte inferior tiene un valor de 1mm. El espesor del panel de refrigerante es igual al espesor del canal del refrigerante más el doble del espesor de las paredes del panel. Las dimensiones del panel de refrigerante también influyen en la potencia de bombeo del refrigerante y en la idoneidad de los cálculos de enfriamiento, se representan por la ecuación (18):

$$H_{MRR} = H_{mod} + 2\delta_{clnt,panel} + \delta_{MRR,upper} + \delta_{MRR,support} \quad (18)$$

## 9.12 Diseño paquete.

El paquete está construido con todos los bastidores de la fila de módulos e incluye componentes adicionales para la gestión térmica y de la batería. Los componentes adicionales, fuera de los bastidores de la fila de módulos, constan de barras colectoras, tubos principales para el refrigerante y terminales del paquete.

La parte superior y los lados de la carcasa utilizan aluminio como metal interior y exterior. La base inferior utiliza aluminio para el interior y acero para el exterior; se emplea acero en el exterior para evitar perforaciones en el tren de aterrizaje del vehículo (ver Figura 37).

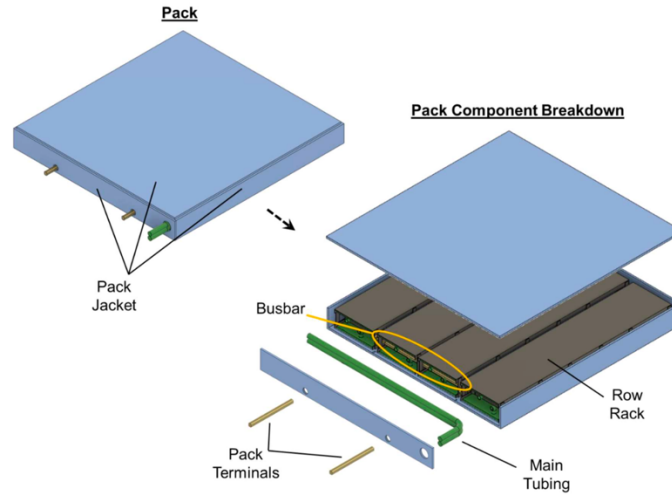


Figura 37: Componentes principales en el paquete de batería [103]

El volumen del paquete de baterías incluye todos los bastidores de la fila de módulos (MRR), el espacio para las conexiones entre los módulos y los bastidores de la fila de módulos ( $W_{icnct,gap}$ ), la cubierta del paquete de baterías ( $\delta_{jack}$ ) y tolerancias adicionales para el ensamblaje ( $\delta_{tol}$ ). La longitud del paquete se calcula por la ecuación (19):

$$L_{pack} = L_{MRR} + 2\delta_{jack,side} + \delta_{tol} \quad (19)$$

En donde  $\delta_{tol}$  tiene un valor predeterminado de 2 mm en todas las dimensiones. La chaqueta está compuesta de aislamiento intercalado entre dos láminas de metal, para esto sus espesores se calculan por las siguientes ecuaciones (20) y (21):

$$\delta_{jack,side} = \delta_{jack,top} = \delta_{Al,int} + \delta_{insulation} + \delta_{Al,ext} \quad (20)$$

$$\delta_{jack,base} = \delta_{Al,int} + \delta_{insulation} + \delta_{steel,ext} \quad (21)$$

De las ecuaciones los subíndices Al, int se refiere al aluminio interior con un valor de 1mm; Al, ext se refiere al aluminio exterior con un valor de 2mm; Steel, ext se refiere al acero

exterior de 1mm; y insulation de 10mm. Se utilizo para la modelación del software acero en la base exterior de la chaqueta para proteger contra pinchazos.

El ancho y alto del paquete se calculan por las ecuaciones (22) y (23):

$$W_{pack} = N_{row} * W_{MRR} + W_{icnct,gap} + 2\delta_{jack,side} + \delta_{tol} \quad (22)$$

$$H_{pack} = H_{MRR} + \delta_{jack,top} + \delta_{jack,base} + \delta_{tol} \quad (23)$$

En el caso de la variable  $W_{icnct,gap}$  se refiere al espacio entre modulos necesarios para las conexiones (ver Figura 38).

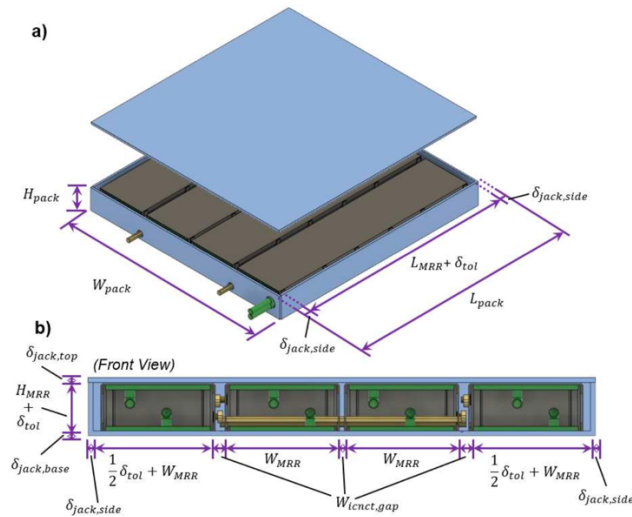


Figura 38: Perfil y vista frontal del paquete de batería [103].

### 9.13 Descripción del sistema de gestión de la batería.

El principal sistema es el sistema de gestión de la batería (BMS) que está encargado de controlar el funcionamiento eléctrico de la batería. Las funciones de medición y control que contempla son:

- Medición de la corriente y el voltaje del paquete de baterías.
- Equilibrio de los voltajes del módulo.
- Estimación del estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH) del paquete de baterías.
- Estimación del SOC del módulo y SOH.
- Monitorización y señalización de la gestión térmica de la batería.
- Alternancia entre modos de carga y descarga mediante desconectores de batería.

El software de BatPac tiene como propósito modelar una gama de paquetes de baterías genéricas para diversos usos y tamaños, por lo tanto el BMS reflejara un diseño genérico. La cantidad y el tamaño se estimaron por la cantidad de componentes necesarios según el tipo de batería, la cantidad de celdas y la cantidad de módulos. A partir de esto se estimara el costo, la masa y el volumen de BMS “promedio” para cada batería. En BatPac se consideró el BMS como los siguientes 4 segmentos:

- Unidad de gestión de batería (BMU): Son los componentes utilizados para proporcionar equilibrio de celda a celda y asegura de que cada celda se cargue y descargue de forma segura.
- Unidad de desconexión de batería (BDU) y electrónica de potencia: Son los componentes utilizados para la interfaz segura con cargadores y consumidores de energía externos.
- Interface entre sistemas electrónicos: Cableado y conectores de bajo y alto voltaje entre las distintas partes del BMS.
- Electrónica del módulo: Los distintos sensores y fusibles de los módulos.

Para obtener el costo total, la masa y el volumen de BMS se suman los cuatro segmentos anteriores, a continuación, se detallara cada uno de los segmentos.

#### Unidad de gestión de batería (BMU)

Esta encargada de controlar como se carga y descarga cada celda con el fin de garantizar la vida útil diseñada para la batería, en eso se incluye equilibrar la cantidad de corriente que llega a cada celda para evitar que una celda con peor rendimiento se sobrecargue o descargue en exceso. Este equilibrio se realiza en células en series, en donde el número de celdas en serie en el paquete se define por la siguiente ecuación (24):

$$N_{Series} = \frac{N_{\frac{cells}{mod}} * N_{\frac{mod}{pack}}}{N_{cells,II} * N_{mods,II}} \quad (24)$$

En donde los subíndice  $\frac{cells}{mod}$  corresponde a la cantidad de celdas por módulo,  $\frac{mod}{pack}$  corresponde a la cantidad de módulo por pack,  $cells,II$  corresponde a la cantidad de celdas en paralelo y  $mods,II$  corresponde a la cantidad de módulos en paralelo. El software esta fracciona el control de la batería y el equilibrio entre celdas entre muchas placas del circuito, donde cada placa controla varias celdas utilizando un circuito integrado de aplicación especifica (ASIC). El número de celdas controladas por cada ASIC se define como  $N_{\frac{cells}{ASIC}}$  que tiene un valor predeterminado de 10. La cantidad de ASIC se define por la ecuación (25):

$$N_{ASIC} = \frac{N_{series}}{N_{cells}} \quad (25)$$

Por otro lado, la cantidad de componente BMU,  $i$ , en el paquete ( $N_{\frac{i}{pack}}$ ) depende de NASIC por la ecuación (26):

$$N_{\frac{i}{pack}} = M_{vehicle} * \left[ N_{fixed} + \left( N_{\frac{i}{ASIC}} * N_{ASIC} - N_{offset} \right) \right] \quad (26)$$

En donde  $N_{fixed}$  es el número fijo de componentes necesarios para el vehículo y  $N_{\frac{i}{ASIC}}$  es el número de cada componente  $i$ , por ASIC, la variable  $N_{offset}$  corresponde al número de compensación que se utiliza para ajustar NASIC. Este término es necesario cuando las placas están en una configuración con una o dos placas controlando a las demás. Finalmente la variable  $M_{vehicle}$  es un multiplicador correspondiente al tipo de vehículo que para el caso de un vehículo eléctrico corresponde a 1.

En la siguiente Tabla 19 se resumen los valores de cada termino para componente del BM:

Tabla 19: Costos de referencia de los componentes de la unidad de gestión de baterías.

Componente	Costo, \$/unidad ( $C_o$ )	Volumen base para costo ( $N_o$ )	p-Valor	Número Fijo ( $N_{fixed}$ )	# por ASIC ( $N_{\frac{i}{ASIC}}$ )	Compensar por ASIC ( $N_{offset}$ )	Vehículo multiplicador ( $M_{vehicle}$ )	
PCB	5	1000	0,9	1	0	0	1	
Conector pines	20	1,58	5000	0,9	1	0,5	0	1
Conector pines	16	1,3	5000	0,9	1	0	0	1
Revestimiento de conformación	0,5	1000	0,9	2	0,166	0	1	
Micro principal	20,3	500	0,9	1	0	0	1	
Cristal piezoeléctrico	0,11	10000	0,9	1	1	0	1	
Memoria Flash	0,37	25000	0,9	1	0	0	1	
Microsensor V	3,95	2000	0,9	0	1	0	1	
V sentido ASIC	2,95	1000	0,9	0	1	0	1	
Transceptor CAN	0,52	12500	0,9	4	0	0	1	
Estrangulador de modo común	0,64	12500	0,9	3	0	0	1	

<b>5V ref-principal</b>	0,78	5000	0,9	0	1	0	1
<b>Referencia de 5V- Vsense</b>	1,89	500	0,9	1	0	0	1
<b>Aisladores duales</b>	1,09	1000	0,9	0	1	0	1
<b>Optoacopladores individuales</b>	1,58	3000	0,9	0	0,5	0	1
<b>Amortiguadores</b>	0,08	125000	0,9	0	0,333	0	1
<b>Diodo Schottky</b>	0,7	5000	0,9	1	0	0	1
<b>Diodos</b>	0,04	75000	0,9	26	26	0	1
<b>Resistencias-0603</b>	0,01	50000	0,9	51	45	0	1
<b>Resistencias-0805</b>	0,01	50000	0,9	51	45	0	1
<b>Resistencias-1206</b>	0,32	1000	0,9	8	20	0	1
<b>Capacitor electrolítico</b>	0,04	100000	0,9	2	1	0	1
<b>Condensador-0603</b>	0,002	15000	0,9	26	31	0	1
<b>Condensador-0805</b>	0,01	4000	0,9	25	30	0	1
<b>Condensador-1206</b>	0,04	4000	0,9	12	2	0	1
<b>Transistores</b>	0,08	30000	0,9	14	14	0	1
<b>Puente de resistencia</b>	0,004	125000	0,9	2	0	0	1
<b>Control de contactores</b>	10	1	1	1	0	0	1
<b>Recinto BMU</b>	3	1	1	1	0	0	1

De la tabla anterior también se proporcionan valores de referencias para obtener el costo de cada componente. A su vez ese costo se puede calcular por la siguiente ecuación (27):

$$C_i = C_{i,o} * \left( \frac{N_{i,o}}{N_{\frac{i}{pack}} * N_{\frac{pack}{year}}} \right)^{1-p} \quad (27)$$

La variable  $N_{\frac{pack}{year}}$  corresponde al número de paquetes fabricados por año. El software no establece la masa y el volumen de cada componente de la BMU. En cambio, para obtener esos valores se calculan en función de un valor establecido para cada placa de circuito impreso (PCB) más una cantidad adicional para cada ASIC. Los valores de PCB en cuanto a la masa son de 40g y para el volumen es de 0,16 L. En el caso de las adiciones

predeterminadas para ASIC son de 20 g y 0,08 L. Se incluye un 10% adicional de la razón masa/volumen total de BMU en la masa/volumen total de BMS.

### 9.13.1 Unidad de desconexión de batería (BDU) y electrónica de potencia

Esta unidad es la responsable de la transición entre. Los modos de descarga y carga; y de cortar la energía hacia/desde la batería para reparación o en caso de emergencia.

El número y costo de los componentes se calculan igual que los componentes BMU, con la diferencia de que ninguno de los componentes BDU depende del número de ASIC ni incluye un desplazamiento, es decir que  $N_{\frac{i}{ASIC}}$  y  $N_{offset}$  son iguales a cero. En la siguiente Tabla 20 se enumera los BDU y los componentes electrónicos, además de proporcionar los valores para  $M_{vehicle}$  y  $N_{fixed}$ .

Tabla 20: Costos referenciales de los componentes de la unidad de desconexión y de la electrónica de la batería.

Componente	Costo, \$/unidad ( $C_o$ )	Volumen base para costo ( $N_o$ )	p-Valor	Número Fijo ( $N_{fixed}$ )	Vehículo multiplicador ( $M_{vehicle}$ )	Volumen (L/unidad)	Masa (g/unidad)
<b>Contactador principal</b>	tabla x	200000	0,95	2	1	0,3193	750
<b>Contactador auxiliar</b>	10	100	1	2	0 o 1	0	180
<b>Contactador de precarga</b>	10	10000	0,9	1	1	0,125	90
<b>Resistencia de precarga</b>	4,4	1000	0,9	1	1	0,08	185
<b>Desconexión del servicio</b>	1	10000	0,9	1	1	0,576	150
<b>Desconexión del servicio fusible</b>	10	10000	0,9	1	1	0,0884	80
<b>Fusible del cargador</b>		10000	0,9	1	0 o 1	0,004	24
<b>Sensor actual</b>	360,33	50	0,9	1	1	0,0365	55

Para el caso del costo del contactador principal es en función de la corriente y el voltaje. Si la tensión es inferior a 50V, el contactador principal será sustituido por un interruptor más económico y se desprecia su costo. En caso de que  $A > 50V$ , se supone que el costo aumenta linealmente con la corriente máxima del paquete según los valores de la siguiente Tabla 21.

Tabla 21: Costos de referencia para determinar el costo base del contactor principal.

Referencia para contactor principal	Costo, \$/unidad ( $C_o$ )	Volumen base para costo ( $N_o$ )	p-Valor
Contactor 10A	10	200000	0,95
Contactor 600A	52,86	200000	0,95

### 9.13.2 Interface entre sistemas electrónicos

Esta unidad incluye cableado de bajo y alto voltaje entre BMU, BDU y el sistema de gestión del módulo. Su costo va depender del paquete actual y se calcula extrapolando linealmente entre los dos escenarios predeterminados en la . En donde estos costos son estimaciones para un paquete genérico basado en informes de desmontaje de baterías de auto, se explica en la Tabla 22.

Tabla 22: Costos de referencia de la electrónica de interfaz.

Referencia para electrónica de interfaz	Costo, \$/unidad ( $C_o$ )	Paquete, A 50
Escenario 1	20	50
Escenario 2	60	500

### 9.13.3 Electrónica del módulo

La unidad de gestión del módulo incluye protección contra sobrecarga (es decir, fusibles delinea de detección), sensores de temperatura y una placa de circuito impreso (PCB) para la detección a evitar el funcionamiento abusivo de las celdas. El número de fusibles de línea de detección se calcula mediante la siguiente ecuación (28):

$$N_{sense} = \left( \frac{N_{cells, mod}}{N_{cells, II}} + 1 \right) * N_{mod, pack} \quad (28)$$

Los costos de los componentes electrónicos del módulo se determinaron utilizando la ecuación (28) con los aportes de la Tabla 23. Los valores para el sistema de gestión de módulos representan todos estos componentes más el equipo para interconectar las celdas con las placas frontal y posterior, junto con conectores desde el interior hacia el exterior del módulo.

Tabla 23: Costo de referencia de la electrónica del módulo.

<b>Costo base del componente electrónico del modulo</b>	<b>Costo, \$/unidad (<math>C_o</math>)</b>	<b>Volumen base para costo (<math>N_o</math>)</b>	<b>Valor p</b>
<b>Fusibles de línea de detección</b>	0,33	105000	0,9
<b>Sensores de temperatura</b>	0,23	1000	0,95
<b>PCB de detección</b>	0,5	1	1

#### 9.14 Descripción del sistema de gestión térmica.

La temperatura es una variable crítica a tener en consideración en una batería de ion litio ya que esta puede afectar drásticamente el rendimiento y degradación de la batería de ion litio. Esto implica eliminar el exceso de calor generado durante la operación, mantener temperaturas frías durante condiciones ambientales cálidas y proporcionar calor durante el arranque en condiciones ambientales frías. En BatPac se realizan iteraciones que trabajan con el cálculo que aproxima el tamaño y la masa de los sistemas de calefacción y refrigeración, también se realiza una verificación si la geometría de la celda calcula en la sección anterior de diseño de la batería se puede enfriar durante el funcionamiento sostenido.

Este sistema en BatPac contiene cuatro partes:

- Sistema de flujo del refrigerante dentro del paquete
- Equipo de gestión de refrigerante externo al paquete
- Calentadores de baterías externos al paquete
- Actualizaciones de la unidad de aire acondicionado
- 

El software supone que todos los paquetes se enfrían usando un solución en razón de 50/50 en peso de etilenglicol y agua. El refrigerante fluye a través de paneles de enfriamiento de acero inoxidable que están ubicados en la parte superior e inferior de los bastidores de los módulos. Se utiliza un conjunto separado de paneles de enfriamiento para cada bastidor de la fila de módulos (ver Figura 39).

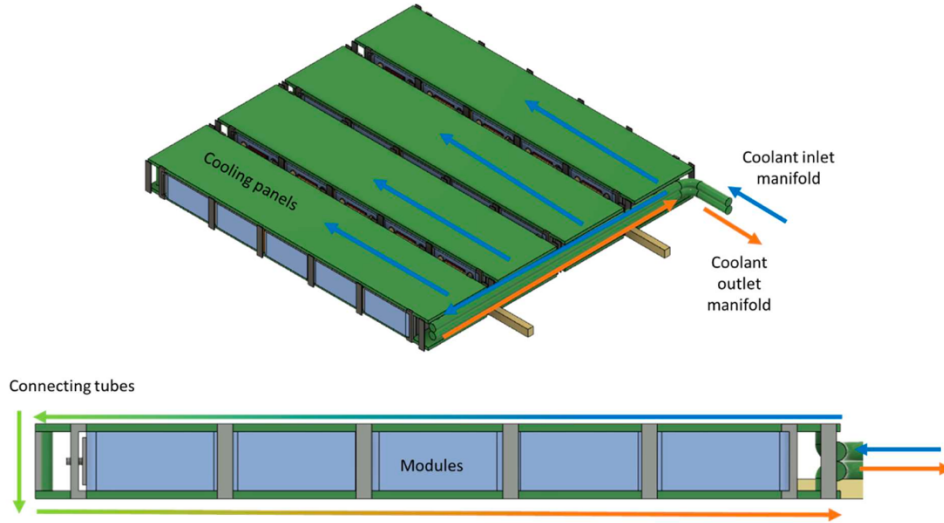


Figura 39: Flujo de refrigerante en el paquete de baterías BatPac [103].

### 9.14.1 Generador de calor durante el funcionamiento

La generación de calor durante el funcionamiento sostenido ( $q_s$ ) se calcula por la siguiente ecuación (29):

$$q_s = I_s^2 * R_s \quad (29)$$

En donde  $I_s$  y corresponde a la corriente (A) y a la resistencia respectivamente, durante una carga sostenida. Por su parte la resistencia se calcula por la siguiente ecuación (30):

$$R_s = \frac{AS I_E * N_{Cell}}{A_{pos} * N_{Cell,II}^2 * N_{Mod,II}^2} \quad (30)$$

En donde  $AS I_E$  corresponde a la impedancia específica del área de la energía,  $A_{pos}$  es el área total del electrodo positivo en una celda,  $N_{Cell}$  es el número de celdas en el paquete,  $N_{Cell,II}$  es el número de celdas en paralelo en un módulo, y  $N_{Mod,II}$  es el número de módulos en paralelo del paquete. La corriente se calcula a partir de la potencia promedio durante el funcionamiento sostenido por la ecuación (31):

$$I_s = \frac{P_s}{V} \quad (31)$$

En donde  $P_s$  es la potencia sostenida promedio y  $V$  es el voltaje. El voltaje se obtiene respecto al voltaje de circuito abierto del paquete ( $U_E$ ), por medio de la siguiente ecuación (32):

$$V = \frac{U_E + \sqrt{U_E^2 - 4 * P_S * R_S}}{2} \quad (32)$$

La potencia  $P_S$  se calcula comparando la potencia a una velocidad sostenida con la potencia a una descarga C/3 y tomando un valor mayor. La potencia a una velocidad sostenida  $P_{SS}$  se obtiene por la ecuación (33):

$$P_{SS} = \frac{1}{f_e} * (P_a + P_f + P_d) \quad (33)$$

En donde  $P_a$ ,  $P_f$  y  $P_d$  corresponden a la potencia accesoria, potencia de fricción de rodadura y la potencia de arrastre aerodinámico respectivamente. La unidad de medida de esta potencia es W. En el caso de  $f_e$  es un factor que tiene en cuenta la eficiencia desde la batería hasta la rueda y accesorios, BatPac toma un valor de 0,833, que se determinó por pruebas experimentales a un automóvil eléctrico. La  $P_a$  tiene un valor de 0,5kW. La  $P_f$  se obtiene por medio de la siguiente ecuación (34):

$$P_f = f_f * S \quad (34)$$

En donde S es la velocidad sostenida en mph y  $f_f$  es un factor de potencia de fricción, este factor se calcula por la ecuación (35):

$$f_f = f_{f,0} * \left( \frac{E}{250} \right) \quad (35)$$

Para este caso  $f_{f,0}$  es el factor de fricción para el vehículo eléctrico híbrido de tamaño medio. El valor de esta variable es de 0,065 kW/mph. En el caso de  $P_d$  se obtiene por la ecuación (36):

$$P_d = f_d * S^3 \quad (36)$$

En donde el factor  $f_d$  se obtiene por la ecuación (37):

$$f_d = f_{d,0} * \left( \frac{E}{250} \right)^{0,7} \quad (37)$$

### 9.14.2 Transferencia de calor desde el ambiente

La tasa de transferencia de calor desde condiciones ambientales cálidas se calcula utilizando la siguiente ecuación (38):

$$q_{amb} = \frac{k_{insulation} * A_{insulation}}{\delta_{insulation}} * (T_{H,amb} - T) \quad (38)$$

En donde  $k_{insulation}$  es la conductividad térmica con valor de  $0,00027 \left(\frac{W*K}{cm}\right)$ ,  $A_{insulation}$  es el área y  $\delta_{insulation}$  del espesor del aislamiento de la chaqueta del paquete con valor de 10mm. En el caso de  $T_{H,amb}$  es la temperatura de ambiente caliente que es predeterminada de 50°C y T es la temperatura de funcionamiento.

### 9.14.3 Potencia de bombeo

El software entrega una estimación de la potencia de bombeo necesaria para hacer circular el refrigerante para hacer circular el refrigerante a través del paquete y el intercambiador de calor. La potencia se obtiene por la ecuación (39):

$$P_{pump} = \frac{1}{f_p} * (P_{clnt} + P_{exchg}) \quad (39)$$

En donde  $P_{clnt}$  es la potencia de bombeo requerida para mover el refrigerante a través del sistema de flujo de refrigerante y  $P_{exchg}$  es la potencia para mover el refrigerante en el intercambiador de calor.  $f_p$  corresponde a un factor de eficiencia de la bomba con un valor de 0,5. La variable  $P_{clnt}$  se obtiene por medio de la ecuación (40):

$$P_{clnt} = \frac{Q_{clnt} * 48\mu_{clnt} * G_{clnt} * L_{clnt}}{\rho_{clnt} * D_h^2} * (1 + f_{p,add}) \quad (40)$$

La variable  $\rho_{clnt}$  corresponde a la densidad con valor de  $1,07 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$  y  $\mu_{clnt}$  corresponde a la viscosidad del refrigerante con valor de 0,055 (poise).  $D_h$  es el diámetro hidráulico del canal de refrigerante,  $L_{clnt}$  es la longitud del camino recorrido por el refrigerante dentro de los paneles de enfriamiento.  $G_{clnt} \left(\frac{g*cm^2}{s}\right)$  es el caudal masico del fluido a través del panel de enfriamiento.  $Q_{clnt}$  es el caudal total de refrigerante  $\left(\frac{cm^3}{s}\right)$ , que se determina a partir del aumento de temperatura permitido del refrigerante desde la entrada hacia la salida del paquete, por la siguiente ecuación (41):

$$Q_{clnt} = \frac{q_s + q_{amb}}{C_{p,clnt} * \rho_{clnt} * \Delta T_{clnt}} \quad (41)$$

En donde  $C_{p,clnt}$  es la capacidad calórica específica con un valor de  $3,264 \left(\frac{j \cdot K}{g}\right)$  y  $\Delta T_{clnt}$  corresponde al aumento de temperatura permitido del refrigerante con un valor predeterminado de  $5^\circ C$ .

La potencia de bombeo a través del intercambiador de calor es proporcional a la velocidad de enfriamiento requerida y el coeficiente de rendimiento (PC), de esto se tiene la siguiente ecuación (42):

$$P_{exchg} = \frac{q_s + q_{amb}}{PC} \quad (42)$$

#### 9.14.4 Cálculo de la temperatura de la celda

La temperatura máxima en el centro de la celda está definida por la ecuación (43):

$$T_{Cell,max} = T_{clnt,in} + \Delta T_{clnt} + \Delta T_{c2w} + \Delta T_{w2f} \quad (43)$$

En donde  $T_{clnt,in}$  es la temperatura del refrigerante de entrada con un valor de  $15^\circ C$ ,  $\Delta T_{c2w}$  es la caída de temperatura entre el centro de la celda y la pared del panel refrigerante y  $\Delta T_{w2f}$  es la caída de temperatura entre la pared del panel de refrigerante y el centro del fluido refrigerante. La caída total de temperatura desde el centro de la celda hasta la pared del panel de enfriamiento se calcula mediante la siguiente ecuación (44):

$$\Delta T_{c2w} = \left( \frac{q_s + q_{amb}}{N_{Cells}} \right) * \left( \frac{1}{\left[ \frac{q}{\Delta T} \right]_{cell,s} + \left[ \frac{q}{\Delta T} \right]_{cell,e}} \right) \quad (44)$$

El primer conjunto de paréntesis corresponde al rechazo de calor por celda y el segundo conjunto divide este número por el rechazo de calor total por diferencia de temperatura entre el centro de la celda y las paredes del panel de enfriamiento. Las variables  $\left[ \frac{q}{\Delta T} \right]_{cell,s}$  y  $\left[ \frac{q}{\Delta T} \right]_{cell,e}$  se determinan mediante correlaciones empíricas, su unidad de medida es  $\frac{W}{^\circ C}$ .

La caída de temperatura desde la pared del panel de refrigerante hasta el líquido refrigerante se calcula mediante la siguiente ecuación (45):

$$\Delta T_{w2f} = h * A_{w2f} * q_{ss} \quad (45)$$

En donde  $A_{w2f}$  es el área efectiva entre la pared y el fluido refrigerante, que es equivalente al área del panel de refrigerante en contacto con los módulos en la parte superior e inferior de los bastidores de la fila de los módulos. La variable h es el coeficiente de transferencia de calor, que se mide en  $\frac{W * K}{cm^2}$  entre la pared del panel y el fluido.

### 9.15 costo de materiales específicos de la batería.

Batpac toma valores predeterminados para varias opciones de materiales de electrodos positivos y negativos. Todos los materiales de electrodos positivos se encuentran en un estado de desarrollo viable o se están utilizando en el mercado. La mayoría de los costos de los materiales de los electrodos positivos dependen del precio de las materias primas, los precios del cobalto y en menor grado del níquel controlan el costo de fabricación, por medio de la Tabla 24.

Tabla 24: Costos de los principales materiales en BatPac.

Material	Química	Abreviación	Unidad	costo
<b>Electrodo positivo</b>			\$/kilo	
Espinela de magnesia	$Li_{1,06}Mn_{1,94}O_4$	LMO		9
Fierro fosfato	$LiFePO_4$	LFP		10
Óxido en capas	$LiNi_{\frac{1}{3}}Mn_{\frac{1}{3}}Co_{\frac{1}{3}}O_2$	NMC 333		25,5
<b>Electrodo negativo</b>			\$/kilo	
Grafito natural recubierto	$C_6$	G		10
Espinela de titanato de litio	$Li_4Ti_5O_{12}$	LTO		15
Electrolito	1,2 M de LiPF6 en EC:EMC		\$/L	10
Separador	PE/PP		\$/M2	0,9
<b>Colector de corriente</b>			\$/M2	
Positivo	Aluminio			1,2
Negativo	Cobre			0,2
<b>Carpetas</b>			\$/kilo	
Positivo	PVDF			15

<b>Negativo</b>	Acuoso genérico		10
<b>Aditivo conductor</b>	Negro carbón	\$/kilo	7
<b>Disolventes en suspensión</b>		\$/kilo	
<b>Positivo</b>	N-metil-2-pirrolidona	NMP	2,7
<b>Negativo</b>	Agua		0

Los materiales a base de carbono se utilizan como electrodo negativo. El electrolito es una sal de hexafluorofosfato de litio, LiPF<sub>6</sub>, disuelta en un sistema disolvente a base de carbonato compuesta por una mezcla de carbonato de etileno, EC, y carbonato de etil metilo, EMC. El separador es una membrana porosa de polipropileno (PP) con una capa intermedia de polietileno (PE) y un revestimiento cerámico para la integridad estructural.

Las láminas colectoras de corriente se basan en cobre metálico para el electrodo negativo y aluminio para el electrodo positivo. El papel de aluminio se produce enrollando láminas más gruesas en hojas más delgadas. La lámina de cobre se produce principalmente por un proceso de electrodeposición.

El aglutinante positivo es PVDF y el disolvente en suspensión es N-metil-2-pirrolidona (NMP). El aglutinante negativo es una mezcla genérica de polímeros solubles en agua.

### 9.15.1 Costos de artículos comprados

Para simplificar costos se supone que los elementos de hardware para las celdas, módulos y paquetes se compran a un proveedor externo. Los costos de estos artículos se estiman a partir de un valor fijo más un valor adicional proporcional a la masa del artículo. El costo por masa se basa en el precio del lingote de materia prima más un factor de forma.

La Tabla 25 describe los artículos comprados para la celda, el módulo y el paquete, el sufijo “mi” en las ecuaciones describe la masa del componente, el sufijo “Cmod” corresponde a la capacidad del módulo y el sufijo “Ains” corresponde al área de aislamiento que depende de las dimensiones del paquete.

Tabla 25: Ecuaciones de costos para artículos comprados.

Componente	Material	Ecuación Costo, \$/unidad	costo por unidad
<b>Nivel celular</b>			
Terminal Positivo	Aluminio	$0,08 + 2,41 \text{ mi}$	Célula
Terminal negativo	Cobre	$0,08 + 8,64 \text{ mi}$	Célula
Envase	PET-Al-PP	$0,20 + 3 \text{ mi}$	Célula

Conductor de calor	Aluminio	0,15 + 2,41 mi	Célula
<b>Nivel de módulo</b>			
Sistema de gestión de módulos	-	2+6 Cmod	Grupo celular paralelo
Interconexión celular	Cobre	0,04 + 8,72 mi	Interconectar
Panel de interconexión	Polipropileno	0,2 + 2, 30 mi	Panel
Terminales de	Cobre	0,35 + 8,64 mi	Terminal
Materiales de cerramiento	Acero	0,50 + 2, 40 mi	Módulo
Provisión para liberación de gas	-	0,5	Módulo
<b>Nivel de paquete</b>			
Estante de fila	Aluminio	1 + 1,33 mi	Embalar
Almohadillas entre módulos	Elastómero	0,2 + 1 mi	Filas de módulos
Interconexiones del módulo	Cobre	0,40 + 8,84 mi	Interconectar
Barra de autobús	Cobre	0,60 + 8,68 mi	Embalar
Paneles de refrigeración	Acero	0,50 + 2,80 mi	Panel
Colectores de refrigerante	Acero inoxidable	1 + 8 mi	Embalar
Terminales	Cobre	0,75 + 8,88 mi	Terminal
Acero en chaqueta	Acero	3 + 1,40 mi	Embalar
Aluminio en chaqueta	Aluminio	3 + 2,81 mi	Embalar
Aislamiento de la chaqueta	-	3 Ains	Embalar

### 9.16 Costos de integración del paquete.

Para integrar la batería en el sistema de propulsión eléctrica se necesitan varios componentes adicionales, esto incluye adiciones para el sistema de gestión de la batería, sistema de gestión térmica y actualizaciones del sistema.

La Tabla 26 describe los costos generales de los agregados a nivel del paquete y sistema de la batería.

Tabla 26: Costo de integración del paquete.

Sistema de gestión de batería	Unidad \$/pack	EV
<b>Sistema de gestión térmica</b>		
Sistema Térmico de referencia	\$/paquete	15
Sistema de calefacción	\$/paquete	20
Adiciones al sistema de aire acondicionado	\$/sistema de batería	40
Adiciones para paquete extra	\$/ paquete adicional	150

## 9.17 Procesamiento de electrodos.

### 9.17.1 Preparación y mezcla de materiales

Los materiales de los electrodos que consisten en material activo, carbón, aglutinante y disolvente, se mezclan en pequeños lotes con máquinas mezcladoras. Para la tasa de producción de la planta se requiere de 18 máquinas de 2300 lt para los materiales de electrodos positivos y de 24 máquinas de 2700 lt para los materiales de electrodos negativos. Estos números suponen una relación de disolvente a aglutinante de 16 y 40 para los materiales positivos y negativos, respectivamente. Se supone un espacio libre de 30 % para todas las maquinas. La mano de obra se calcula suponiendo 1,5 operadores por maquina por turno. Los costos de equipo de capital y área de planta para este paso también tienen en cuenta las tolvas para el manejo de materiales, mezcladores laterales, recipiente para el transporte a la recubridora y los sistemas de filtración de agua.

### 9.17.2 Revestimiento del electrodo

Los electrodos positivo y negativo se recubren con láminas del colector de corriente mediante el uso de recubridores de ranura de doble cara, los cuales poseen un ancho máximo de recubrimiento de 1,0 metros y una velocidad de recubrimiento de 80 m/min. Este revestimiento se efectúa en ambas caras utilizando un sistema de dos niveles: el primer lado se recubre en el nivel superior, seguido por el recubrimiento del segundo lado en el nivel inferior. Dichos recubridores tienen la capacidad de producir dos franjas por ancho, permitiendo así recubrir simultáneamente cuatro alturas de celda de referencia. Aproximadamente el 82% de la lámina se encuentra recubierta, dejando tres regiones sin

recubrir: una en el medio y una a cada lado de las rayas. Del 18% restante de la lámina de aluminio sin recubrimiento, cerca del 10% se destina a la creación de pestañas, mientras que el 8% restante se pierde durante el proceso de corte del electrodo. Los recubridores están equipados con secciones de horno capaces de secar recubrimientos de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$  de espesor a una velocidad de 80 m/min. Actualmente, no se registran cambios en el costo de capital ni en el área de las secciones del horno para diferentes espesores de electrodos.

En cuanto a la preparación y mezcla de materiales, se asume que el costo de capital incluye un recubridor equipado con un sistema de bombeo de precisión, inspección de alineación, control de viscosidad en línea, un detector de defectos en la superficie, una unidad de recubrimiento aislante compuesta de cerámica y/o poliamida-imida, y una unidad de división automática. Esta última se utiliza para dividir las dos tiras en dos rollos separados, que posteriormente se introducen en la máquina calandradora (descrita en la sección siguiente). También se consideran en el costo los vehículos de guiado automático para la manipulación de los rollos. Las velocidades de referencia para ambos electrodos pueden ser manejadas por cinco recubridores cada uno, aunque se destaca que el área del electrodo negativo es ligeramente mayor que la del positivo. Los costos asociados con el electrodo positivo son superiores a los del negativo, según se detalla en la Tabla 9.6, debido al uso de NMP en el electrodo positivo, el cual debe ser condensado y reciclado.

### **9.17.3 Calandrado**

Tras el proceso de recubrimiento, los electrodos son trasladados a las máquinas calandradoras, donde son comprimidos mediante rodillos para alcanzar la fracción de volumen de vacío especificada. Las tasas de referencia para los electrodos positivo y negativo pueden ser manejadas con ocho y nueve calandras respectivamente. Cada calandra opera a una velocidad de 100 m/min. Las calandras requieren un mayor rendimiento en m/min que los recubridores debido al aumento en la longitud total del rollo cuando estos son divididos después del recubrimiento. Todas las calandras incluyen medidores automáticos de grosor por láser. Tanto el tamaño como el costo por unidad de las calandras positivas son mayores que los de las negativas, según se detalla en la Tabla 9.6, debido a que las calandras positivas requieren precalentamiento y un proceso de recocido por inducción para realizar el calandrado a temperaturas elevadas. Por su parte, las calandras negativas operan a temperatura ambiente. Las tarifas laborales indicadas en la Tabla 9.6 corresponden a un operador por calandra por turno.

### **9.17.4 Muestras**

Las máquinas troqueladoras cortan las láminas de electrodos recubiertas y calandradas en dos tiras de electrodos utilizando un cortador de troquel. De manera simultánea, se cortan las pestañas del colector de corriente empleando láseres de precisión en la parte no recubierta de

la lámina. La Figura 9.2 destaca las regiones que son cortadas durante este proceso. La pérdida estimada de material de lámina desechado en este proceso es de aproximadamente el 8%. Las tasas de referencia pueden ser cubiertas con 34 máquinas para cada uno de los materiales, tanto positivo como negativo (68 en total), operando a una velocidad de 24 m/min. La tarifa laboral se calcula asumiendo un operador por máquina troqueladora por turno.

#### **9.17.5 Secado al vacío de electrodos**

Antes del ensamblaje de las celdas, es crucial eliminar la humedad de los electrodos para prevenir reacciones dañinas entre el electrolito y el agua. Los carretes de electrodos troquelados se secan a temperaturas elevadas en hornos de secado al vacío. Para los electrodos positivos y negativos se requieren cinco y cuatro secadoras al vacío, respectivamente. Cada carrete positivo contiene aproximadamente un 30% más de área recubierta que su contraparte negativa debido al menor grosor de los electrodos. Esto se traduce en una menor cantidad total de carretes de cátodo que necesitan ser procesados (460 frente a 600 carretes por día para los positivos y negativos, respectivamente). Sin embargo, el tiempo de secado del positivo es un 50% más largo que el del negativo (3 frente a 2 horas), debido a las diferencias en los grosores de los electrodos. La combinación de estos dos factores incrementa el número total de secadoras para los carretes de electrodos positivos (5 frente a 4). El área y el costo por unidad de todas las secadoras son de 400 m<sup>2</sup> y aproximadamente \$2.8 millones, respectivamente. La tarifa laboral asume un operador por secadora por turno.

#### **9.17.6 Corte de electrodos**

Al ingresar a la sala de secado, las láminas de electrodos son primeramente cortadas en electrodos individuales. Los valores presentados en la Tabla 9.6 se han calculado asumiendo un total de 34 máquinas cortadoras (17 para cada tipo de electrodo), con un operador por cortadora por turno.

#### **9.17.7 Apilamiento de celdas**

El apilamiento de las celdas se logra insertando los electrodos en una hoja separadora plegada. Las pestañas del electrodo positivo sobresalen por un lado y las del electrodo negativo por el otro. La tasa de referencia puede ser alcanzada con 183 apiladores de celdas operando a una velocidad de 2.5 celdas por minuto. La tarifa laboral se calcula asumiendo 0.5 operadores por apilador por turno.

### **9.17.8 Soldadura del colector de corriente**

Las pestañas del colector de corriente de los electrodos negativos y positivos en los apilados son soldadas a sus respectivos terminales mediante soldadura ultrasónica. La tasa de referencia se logra con 25 soldadores operando a una velocidad de 18 celdas por minuto. Se asume la presencia de un operador por soldador por turno.

### **9.17.9 Inspección por rayos X**

Después de la soldadura, se inspecciona la alineación de cada apilado de electrodos utilizando una máquina de inspección por rayos X. Dicha máquina puede procesar 18 apilados de celdas por minuto e incluye una función de rechazo automático para descartar apilados con alineaciones de electrodos incorrectas. Los números presentados en la Tabla 9.6 se basan en el uso de 25 máquinas de inspección y la asignación de un operador por máquina por turno.

### **9.17.10 Inserción de celda en contenedor**

Los apilados de electrodos soldados son insertados en contenedores de celdas por trece máquinas que operan a una velocidad de 36 celdas por minuto. Los contenedores consisten en dos mitades de bolsa rígidas y preformadas, las cuales se supone que se adquieren como piezas terminadas. Cada celda se encierra en estos contenedores, que luego se sellan parcialmente antes de inyectar el electrolito. Las máquinas incluyen sistemas para la inspección visual de las pestañas y la comprobación de cortocircuitos. También incorporan una impresora de inyección de tinta para marcar los contenedores de las celdas tipo bolsa. Se asume que estas máquinas requieren 0.5 operadores por máquina por turno.

### **9.17.11 Llenado de electrolitos y sellado de celda**

En esta estación, las celdas son evacuadas, llenadas con electrolito y selladas temporalmente. El sello es temporal porque las celdas pasan por una etapa de desgasificación en el proceso de formación que se discute a continuación. El llenado y sellado se realizan en la planta base utilizando 25 máquinas que operan a una velocidad de 18 celdas por minuto, con 2/3 de operador por máquina. Las máquinas de llenado de electrolito contienen un sistema de rechazo automático basado en el peso del electrolito y de la celda. Las celdas son automáticamente insertadas en bandejas de formación después del llenado.

### **9.17.12 Ciclo de formación**

Después de llenar y sellar, las celdas salen de la sala seca y entran en un protocolo de formación. La formación es un proceso costoso debido a su considerable duración. Es el proceso más grande, más costoso y que más mano de obra requiere en la planta de

fabricación. Los protocolos de formación son propietarios y varían entre fabricantes. Por lo tanto, la mano de obra, el capital y el área listados en la Tabla 9.6 son para el proceso completo de formación, sin desglosar los pasos individuales. Se asume que el proceso de formación probablemente incluya los siguientes pasos:

1. Envejecimiento a temperatura ambiente durante 1-2 días.
2. Preformación que implica presión, calor y pre-ciclado.
3. Selección de celdas buenas/no buenas basadas en el rendimiento de la preformación.
4. Rodado y desgasificación para eliminar el gas de la preformación.
5. Sellado final.
6. Ciclado y envejecimiento de formación durante un período de 1 a 2 semanas bajo condiciones controladas de temperatura.
7. Pruebas electroquímicas y clasificación.
8. Inspección final.

El equipo necesario para completar este proceso incluye estanterías de envejecimiento, prensas térmicas, máquinas selectoras de buenas/no buenas, máquinas de rodado y desgasificación – que incluyen el sellado final – y cicladores de carga/descarga. También se emplean un sistema de cintas transportadoras y grúas apiladoras para la transferencia automatizada de celdas. Las máquinas de clasificación determinan la calidad electroquímica de las celdas basándose en el voltaje, la resistencia y la capacidad. Las máquinas de inspección final verifican las dimensiones y pesos totales. Todo el proceso está integrado con un sistema de medición de información que permite el monitoreo en tiempo real del equipo y las celdas. La mano de obra listada en la Tabla 9.6 corresponde a 73 personas por turno para todo el proceso.

#### **9.17.13 Montaje del módulo**

Las celdas aceptadas que no fallan en la clasificación de formación o en la inspección final son ensambladas en módulos. Esto incluye colocar un conductor de calor de aluminio alrededor de cada celda (ver Figura 2.4) y conectarlas a través de los interconectores. El sistema de gestión del módulo, los terminales, la carcasa y la provisión para la liberación de gases se incluyen en este momento (ver Sección 2.3). Los módulos en la planta base se ensamblan en once líneas automatizadas, operando cada una a una velocidad de dos módulos por minuto. Se asume que hay dos operadores por turno por línea.

#### **9.17.14 Montaje del paquete**

Los módulos terminados se ensamblan en paquetes de baterías con la ayuda de estaciones automatizadas. En la planta base, hay veinte módulos por paquete. Los módulos se colocan en estanterías en fila con almohadillas entre ellos y se conectan utilizando interconexiones

de módulos y barras colectoras. Los paquetes también incluyen paneles de enfriamiento, colectores de refrigerante, terminales y carcasas/cubiertas (ver Secciones 2.4 y 2.5). Los valores en la Tabla 9.6 asumen que se utilizan cinco estaciones, cada una ensamblando paquetes a una tasa de cinco minutos por paquete, con cuatro operadores por turno por estación.

#### **9.17.15 Almacén**

Los módulos terminados se ensamblan en paquetes de baterías con la ayuda de estaciones automatizadas. En la planta base, hay veinte módulos por paquete. Los módulos se colocan en estanterías en fila con almohadillas entre ellos y se conectan utilizando interconexiones de módulos y barras colectoras. Los paquetes también incluyen paneles de enfriamiento, colectores de refrigerante, terminales y carcasas/cubiertas (ver Secciones 2.4 y 2.5). Los valores en la Tabla 9.6 asumen que se utilizan cinco estaciones, cada una ensamblando paquetes a una tasa de cinco minutos por paquete, con cuatro operadores por turno por estación.

#### **9.17.16 Sistema de construcción y soporte**

Los módulos terminados se ensamblan en paquetes de baterías con la ayuda de estaciones automatizadas. En la planta base, hay veinte módulos por paquete. Los módulos se colocan en estanterías en fila con almohadillas entre ellos y se conectan utilizando interconexiones de módulos y barras colectoras. Los paquetes también incluyen paneles de enfriamiento, colectores de refrigerante, terminales y carcasas/cubiertas (ver Secciones 2.4 y 2.5). Los valores en la Tabla 9.6 asumen que se utilizan cinco estaciones, cada una ensamblando paquetes a una tasa de cinco minutos por paquete, con cuatro operadores por turno por estación.

#### **9.17.17 Recuperación del disolvente aglutinante**

Es necesario implementar un sistema de recuperación de solventes para capturar el solvente liberado de los hornos de secado en los recubridores del electrodo positivo. Esto es esencial debido a que el solvente positivo, N-Metil-2-pirrolidona, es tóxico y costoso. El solvente se recoge, se destila hasta alcanzar una pureza moderada y se devuelve al proveedor para su posterior refinamiento. El costo del equipo capital en la Tabla 9.6 está asociado con los sistemas de recolección y destilación. La mano de obra refleja dos personas por turno para todo el sistema.

### 9.17.18 Laboratorio de control

El propósito del laboratorio de control es asegurar que las materias primas y los electrodos que se están fabricando cumplan con las especificaciones. El personal del laboratorio recoge o supervisa la recogida de muestras y realiza análisis. Los costos de capital son para el equipo utilizado en la recolección, caracterización y análisis de muestras. Se asume que son necesarias seis personas por turno para llevar a cabo el control de calidad en toda la planta. Esto se releja en la Tabla 27.

Tabla 27: Tarifa pertinente y factor utilizados para escalar la mano de obra, el costo de bienes de capital y área en proceso de fabricación.

Pasos del proceso	Tarifa pertinente	Mano de obra h/año	Bienes de capital \$M	Planta Área M <sup>2</sup>
Procesamiento/mezcla de electrodos.	material activo/año	0,9	0,9	0,95
Revestimiento de electrodo.	electrodo m <sup>2</sup> /año	0,7	0,9	0,95
	solvente kg*m <sup>2</sup> /año	-	0,2	-
Calandrado, entallado y secado al vacío.	electrodo m <sup>2</sup> /año	0,7	0,9	0,95
Corte de electrodos	total m <sup>2</sup> /año	0,7	0,9	0,9
Apilamiento de celdas.	celdas/año	0,9	0,9	0,9
	Capacidad de celda	0,95	0,95	-
Apilamiento de celdas, soldadura de colector de corrientes, inspección por rayos X, inserción de celdas en contenedores, llenado de electrolitos y sellado de celdas.	Celdas/año	0,9	0,9	0,9
Cuarto seco	m <sup>2</sup> total /año	-	0,9	0,9
Ciclos de formación, pruebas y sellado	celdas/año	0,7	0,95	0,95
	capacidad de la celda	0,3	0,3	0,3
Montaje del módulo		0,7	0,95	0,95

Montaje y prueba de paquete	Paquetes/año	0,7	0,95	0,95
	modulos por año	0,3	0,3	-
Depósito	Energía total del paquete / año	0,5	0,95	0,95
Edificio	Energía total del paquete / año	-	0,95	-
Recuperación de solventes	Disolvente NMP /año	0,5	0,95	0,95
Reciclaje de células rechazadas y desechos	Celdas / año	0,7	0,9	0,95
Laboratorio de control	Total paquete energía /año	0,7	0,95	0,95

## 9.18 Flujo de caja.

Estas son las consideraciones para el flujo de caja de una planta de producción de baterías para vehículos eléctricos, evaluando diferentes materiales catódicos como LCO, LMO, LFP y NMC, proyectado a 5 años:

### 9.18.1 Producción Anual

La planta tiene una capacidad de 500,000 paquetes de baterías por año, lo que representa un total de 2,500,000 paquetes fabricados durante los 5 años proyectados. Esta cantidad fija de producción se mantiene constante a lo largo del tiempo.

### 9.18.2 Ingresos Anuales

Los ingresos anuales crecen a una tasa del 3% anual, lo que puede reflejar un aumento en el precio de venta o en la demanda del producto. Este crecimiento permite que los ingresos se incrementen de manera constante durante los 5 años proyectados, contribuyendo a mejorar la rentabilidad de la operación.

### 9.18.3 Costos Variables

Los costos variables incluyen los gastos directos asociados con la producción, como los materiales, la mano de obra y otros insumos. Estos costos aumentan a una tasa del 2% anual debido a incrementos en los precios de los insumos y los recursos necesarios para la

fabricación. Aunque estos costos aumentan cada año, lo hacen a un ritmo menor que los ingresos, lo que favorece la rentabilidad general.

#### 9.18.4 Costos Fijos

Los costos fijos, que incluyen gastos administrativos, operacionales y de mantenimiento, permanecen constantes durante los 5 años proyectados. Estos costos no dependen del volumen de producción y su estabilidad es clave para garantizar que los márgenes de ganancia no se vean afectados por aumentos inesperados.

#### 9.18.5 Depreciación

La depreciación refleja la pérdida de valor de los activos de capital, como la maquinaria y la planta. Se calcula a tasas del 10% anual para los equipos y del 5% anual para la planta, y permanece constante a lo largo del período proyectado. Este costo contable es importante para evaluar la vida útil de los activos y su impacto en el flujo de caja.

#### 9.18.6 Garantía

La garantía cubre los posibles fallos de las baterías durante su vida útil y se calcula como un 5.6% del total de los costos. Dado que los costos variables aumentan con el tiempo, la garantía también se incrementa de manera proporcional cada año, asegurando que se cubran adecuadamente los riesgos de fallos o reemplazos.

#### 9.18.7 Flujo de Caja Neto

El flujo de caja neto es la diferencia entre los ingresos anuales y los costos totales (variables, fijos, depreciación y garantía). A lo largo de los 5 años proyectados, el flujo de caja neto crece de forma constante, lo que refleja una mayor rentabilidad y la generación sostenida de efectivo. Esto indica una operación financiera sólida y un margen de ganancia que mejora con el tiempo.

Batería con material catódico LCO						
Años	Ingresos Anuales \$	Costo Variables \$	Costos fijos \$	Depreciación \$	Garantía \$	Flujo de Caja Neto \$
1	\$ 9.595.377.000	\$5.279.010.000	\$1.293.875.000	\$776.325.000	\$295.624.560	\$ 1.950.542.440
2	\$ 9.883.238.310	\$5.384.590.200	\$1.293.875.000	\$776.325.000	\$301.537.051	\$ 2.126.911.059
3	\$ 10.179.735.459	\$5.492.282.004	\$1.293.875.000	\$776.325.000	\$307.567.792	\$ 2.309.685.663
4	\$ 10.485.127.523	\$5.602.127.644	\$1.293.875.000	\$776.325.000	\$313.719.148	\$ 2.499.080.731
5	\$ 10.799.681.348	\$5.714.170.196	\$1.293.875.000	\$776.325.000	\$319.993.531	\$ 2.695.317.621

Figura 40: Flujo de caja de baterías con material catódico LCO (elaboración propia).

Batería con material catódico LMO						
Años	Ingresos Anuales \$	Costo Variables \$	Costos fijos \$	Depreciación \$	Garantía \$	Flujo de Caja Neto \$
1	\$ 8.723.070.000	\$4.799.100.000	\$1.176.250.000	\$705.750.000	\$268.749.600	\$ 1.773.220.400
2	\$ 8.984.762.100	\$4.895.082.000	\$1.176.250.000	\$705.750.000	\$274.124.592	\$ 1.933.555.508
3	\$ 9.254.304.963	\$4.992.983.640	\$1.176.250.000	\$705.750.000	\$279.607.083	\$ 2.099.714.240
4	\$ 9.531.934.111	\$5.092.843.313	\$1.176.250.000	\$705.750.000	\$285.199.225	\$ 2.271.891.573
5	\$ 9.817.892.135	\$5.194.700.179	\$1.176.250.000	\$705.750.000	\$290.903.210	\$ 2.450.288.746

Figura 41: Flujo de caja de baterías con material catódico LMO (elaboración propia).

Batería con material catódico LFP						
Años	Ingresos Anuales \$	Costo Variables \$	Costos fijos \$	Depreciación \$	Garantía \$	Flujo de Caja Neto \$
1	\$ 8.241.957.000	\$4.534.410.000	\$1.111.375.000	\$666.825.000	\$253.926.960	\$ 1.675.420.040
2	\$ 8.489.215.710	\$4.625.098.200	\$1.111.375.000	\$666.825.000	\$259.005.499	\$ 1.826.912.011
3	\$ 8.743.892.181	\$4.717.600.164	\$1.111.375.000	\$666.825.000	\$264.185.609	\$ 1.983.906.408
4	\$ 9.006.208.946	\$4.811.952.167	\$1.111.375.000	\$666.825.000	\$269.469.321	\$ 2.146.587.458
5	\$ 9.276.395.215	\$4.908.191.210	\$1.111.375.000	\$666.825.000	\$274.858.708	\$ 2.315.145.297

Figura 42: Flujo de caja de baterías con material catódico LFP (elaboración propia).

Batería con material catódico NMC						
Años	Ingresos Anuales \$	Costo Variables \$	Costos fijos \$	Depreciación \$	Garantía \$	Flujo de Caja Neto \$
1	\$ 10.691.091.000	\$5.881.830.000	\$1.441.625.000	\$864.975.000	\$329.382.480	\$ 2.173.278.520
2	\$ 11.011.823.730	\$5.999.466.600	\$1.441.625.000	\$864.975.000	\$335.970.129	\$ 2.369.787.001
3	\$ 11.342.178.442	\$6.119.455.932	\$1.441.625.000	\$864.975.000	\$342.689.532	\$ 2.573.432.978
4	\$ 11.682.443.795	\$6.241.845.050	\$1.441.625.000	\$864.975.000	\$349.543.322	\$ 2.784.455.423
5	\$ 12.032.917.109	\$6.366.681.951	\$1.441.625.000	\$864.975.000	\$356.534.189	\$ 3.003.100.969

Figura 43: Flujo de caja de baterías con material catódico NMC (elaboración propia).