



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES
MODOS DE CARGA EN LA VIDA ÚTIL DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO DE UN
VEHÍCULO ELÉCTRICO

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: CARLOS XAVIER ÁLVAREZ CORONEL
DANIEL ALEJANDRO MÉNDEZ CHILLOGALLI
TUTOR: ING. FABRICIO ESTEBAN ESPINOZA MOLINA, MSc.

Cuenca - Ecuador

2022

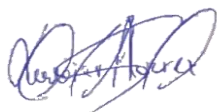
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Carlos Xavier Álvarez Coronel con documento de identificación N° 0302323860 y Daniel Alejandro Méndez Chillogalli con documento de identificación N° 0106136773; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 05 de abril del 2022

Atentamente,



Carlos Xavier Álvarez Coronel

0302323860



Daniel Alejandro Méndez Chillogalli

0106136773

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Carlos Xavier Álvarez Coronel con documento de identificación N° 0302323860 y Daniel Alejandro Méndez Chillogalli con documento de identificación N° 0106136773, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Revisión del estado del arte de la influencia de los diferentes modos de carga en la vida útil de las baterías de ion litio de un vehículo eléctrico”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 05 de abril del 2022

Atentamente,



Carlos Xavier Álvarez Coronel

0302323860



Daniel Alejandro Méndez Chillogalli

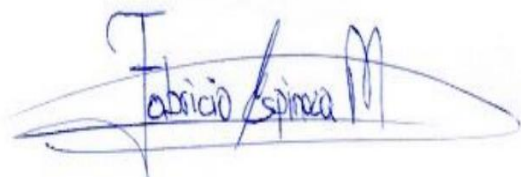
0106136773

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fabricio Esteban Espinoza Molina con documento de identificación N° 0301232757, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES MODOS DE CARGA EN LA VIDA ÚTIL DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO, realizado por Carlos Xavier Álvarez Coronel con documento de identificación N° 0302323860 y por Daniel Alejandro Méndez Chillogalli con documento de identificación N° 0106136773, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 05 de abril del 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, reading "Fabricio Espinoza M.", enclosed within a large, stylized blue oval scribble.

Ing. Fabricio Esteban Espinoza Molina, Msc

0301232757

RESUMEN

Se realizó el artículo de revisión con el fin de dar a conocer la influencia de los diferentes modos de carga de una batería de fosfato de Ion – Litio aplicado en un vehículo eléctrico. Se trabajó con un método bibliográfico con el cual se generó la recopilación de información en revistas de alto impacto.

Posteriormente, se analizó los resultados otorgados por diversos documentos usando el método analítico cuantitativo, finalmente mediante la técnica comparativa se simplificó la información con el fin de otorgar repeticiones, afirmaciones y contradicciones entre autores.

El resultado principal indicó que la vida útil de las baterías de Iones de Litio se encuentra en función de la tasa de carga-descarga y temperatura de funcionamiento, dado que al cargar y descargar la batería a un alto C-rate se genera una mayor resistencia interna, producto del incremento de la temperatura en el proceso.

Se concluye que las celdas de Ion Litio se deben cargar y descargar a un C-rate bajo y a una temperatura ambiente moderada, para reducir el envejecimiento acelerado de la misma.

Palabras Claves: *Estado de Carga (SOC), Final de vida útil (EOL), Interfaz de electrolito sólido (IES), Tasa de carga y descarga (C-rate) y temperatura.*

ABSTRACT

The review article was carried out with the purpose of making known the influence of the different charging modes of a Lithium-Ion phosphate battery applied in an electric vehicle. We worked with a bibliographic method with which the collection of information in high impact journals was generated.

Subsequently, the results given by several documents were analyzed using the quantitative analytical method, finally, by means of the comparative technique, the information was simplified in order to give repetitions, affirmations and contradictions between authors.

The main result indicated that the useful life of lithium-ion batteries is a function of the charge-discharge rate and operating temperature, since charging and discharging the battery at a high rate generates a higher internal resistance, due to the increase of the temperature in the process.

It is concluded that lithium-ion cells should be charged and discharged at a low *Crate* and at a moderate ambient temperature to reduce accelerated aging.

Keywords: *State of Charge (SOC), End of Life (EOL), Solid Electrolyte Interface (SEI), Charge and Discharge Rate (Crate) and temperature.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	V
ABSTRACT	1
1. Introducción	5
2. Metodología.	6
2.1. Método bibliográfico	6
2.2. Método analítico cuantitativo	6
2.3. Método comparativo	7
3. Marco teórico	9
3.1 Tipos de baterías de Ion Litio.....	10
3.1.1 Óxido de cobalto de litio.....	10
3.1.2 Óxido de manganeso de litio.....	11
3.1.3 Fosfato de litio.....	12
3.1.4 Óxido de cobalto de níquel y manganeso	13
3.1.5 Óxido de litio níquel cobalto aluminio	13
3.1.6 Litio – titanio.....	14
3.2 Comparación del rendimiento entre los tipos de baterías de iones de litio	15
3.3.1 Envejecimiento por funcionamiento.....	17
3.3.2 Envejeciendo en reposo.....	18
4. Resultados y discusión	19
4.1 Envejecimiento de las baterías Ion litio según la tasa de carga/descarga.....	19
5. Conclusiones	23
6. REFERENCIAS	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de la metodología de revisión.	8
Figura 2. Poder específico de las diferentes baterías.	9
Figura 3. Estructura de una batería de Ion Litio.....	10
Figura 4. Perfil de voltaje de funcionamiento de todos los materiales de los electrodos de litio.....	15
Figura5. Comparación entre los tipos de baterías de iones de litio con valores indexados	16
Figura 6. Envejecimineto por uso.....	17
Figura7. Pérdida de capacidad en función al tiempo y la temperatura.....	18
Figura 8. Temas que abarcan el deterioro de las baterías.	19
Figura 9. Capacidad de descarga en función de diferentes tasas de descarga (1/3 C – 0.5C -1C – 1.5C -2C).....	20
Figura 10. Ciclos de vida para Protocolos de carga CCCV, a diferentes tasas de corriente.	22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de los diferentes tipos de baterías de Iones de litio.	16
--	-----------

1. Introducción

Las baterías son uno de los elementos fundamentales de los vehículos eléctricos, pues de ello depende su autonomía y el precio, conforme a ello se han realizado varias investigaciones de cómo afecta la temperatura, tasa de carga, protocolo de carga, entre otros en la vida útil de las baterías. Sin embargo, en el mercado existen diferentes tipos de tecnología tratando de mitigar estos problemas, resultando las baterías de Ion litio como una de las más utilizadas en vehículos eléctricos (VE) en almacenar potencia por kilogramo y otorgar mayores ciclos de carga y descarga (ciclo de vida).

Durante el uso de la batería el rendimiento se tiende a degradar, alcanzando el final de su vida útil (FVU) cuando su capacidad de almacenar energía se reduce el 20% de su valor inicial. Sin embargo, el aumento de temperatura, debido al proceso de carga o descarga, influye de manera directa al incremento de la resistencia interna, siendo proporcional al estado de carga (State Of Charge, SOC), resultando que a un mayor SOC se incrementa la impedancia, la cual se produce por el recubrimiento de una película de interface de electrolito sólido (IES) alrededor del ánodo, provocando la pérdida de almacenamiento de energía en las celdas.

Se considerará en la revisión diferentes modos de carga, otorgando a la carga rápida un especial estudio, pues disminuye el tiempo para almacenar energía en las celdas, causando efectos perjudiciales a mediano y largo plazo, por consiguiente, el envejecimiento de las baterías dependerá de la tasa de carga y descarga (Crate) que se le aplique a lo largo de su vida útil. Además, al considerar un Crate mayor existirá un aumento de temperatura al interior de las celdas provocado por la pérdida de material de litio (PML), este aumento de temperatura genera fácilmente la degradación de la batería, ocasionando una posible fuga térmica.

En el presente artículo de revisión se analizará investigaciones relacionados sobre el tema de carga y descarga en las baterías de Ion Litio, con el objetivo de examinar cómo influye

los diferentes modos de carga, la temperatura ambiente y la resistencia interna en el envejecimiento de las celdas de la batería de Ion Litio empleadas en vehículos eléctricos, elaborando una comparación de resultados de diversas investigaciones para obtención de conclusiones.

2. Metodología.

En el actual apartado, se especificará la metodología que va a ser empleada para la elaboración del presente artículo de revisión. En la Figura 1 se indica el esquema metodológico, a continuación, se describe los métodos utilizados.

2.1. Método bibliográfico

El estudio se efectuará a través de un método bibliográfico, el cual se realizará la recopilación de fuentes de información tomando como base las palabras claves situadas en la figura 1.

2.2. Método analítico cuantitativo

Se efectuará el método analítico cuantitativo para examinar resultados (valores y/o gráficas) otorgados por diversos autores. Debido a este método se determinará la muestra documental.

Se analizarán diversos documentos de distintos tipos de material: artículos de revista, trabajos de investigación, libros.

2.3. Método comparativo

Mediante la técnica comparativa se simplificará la información relevante mediante la búsqueda de similitudes y disimilitudes, lo que permitirá establecer los pasos o guías necesarias que posibiliten la creación de la metodología propuesta de Revisión de la Literatura.

La metodología está dividida en las siguientes etapas.

Revisión bibliográfica:

Se revisaron varios artículos provenientes de diferentes bases de datos, para la búsqueda de aquellos, tomando como base las palabras claves.

Primer filtrado:

A partir de un universo de 1009 artículos se tamizó según el año de publicación, apartando aquellos que han sido publicados a partir del año 2010.

Segundo filtrado:

Ya contando con una muestra de 320 artículos, se extrajo 106 documentos de información tomando en cuenta el factor de impacto Q1 y Q2 del ranking SJR o JCR.

En la figura 1 se puede apreciar la metodología que se utilizó para llevar a cabo la realización del artículo de revisión.

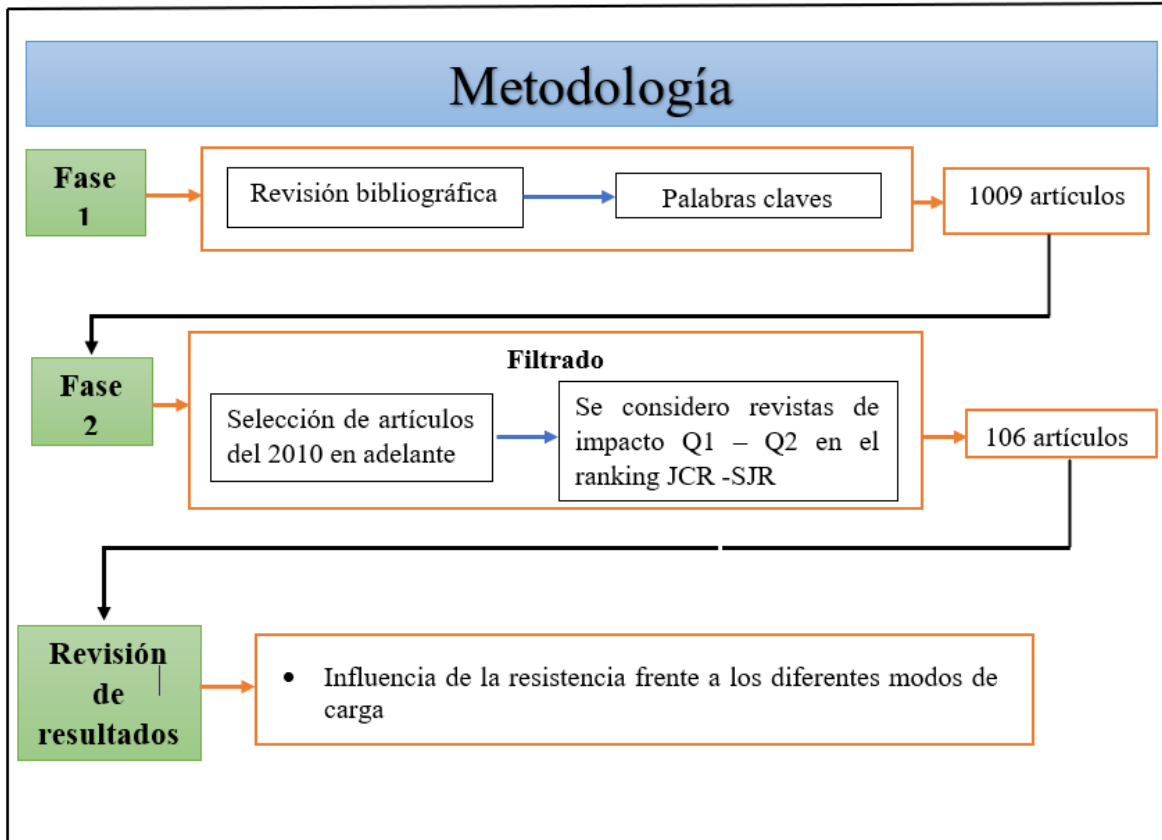


Figura1. Diagrama esquemático de la metodología de revisión.

El documento se encuentra estructurado por 5 secciones. En la sección 3 está conformado por dos subsecciones, lo cual, la sección 3.1 de los resultados se aprecia una visión general sobre los diferentes tipos de baterías de Ion-Litio con sus respectivas especificaciones y características; en la sección 3.2 abarca los diferentes tipos de envejecimiento detallando sus principales particularidades. Se analizará los resultados obtenidos de la influencia de las diferentes tasas de carga-descarga, examinando la resistencia interna en la sección 4.1. Finalmente se generan las conclusiones del presente artículo en la sección 5.

3. Marco teórico

Para la industria automotriz elaborar baterías que contengan características eficientes se ha vuelto una prioridad, dado que, se implementan netamente en vehículos eléctricos, por ello, se ha tomado en consideración el estudio de la batería de Ion Litio, debido que, presenta características superiores a comparación de diversas tecnologías, tal como se aprecia en la figura 2. Por lo tanto, en el apartado 3.1 se analizará los diferentes tipos de batería de Ion litio mediante la especificación de sus características, ventajas y desventajas. Además, se llevará a cabo una comparación entre especificaciones de cada tipo de batería de ion litio situada en el apartado 3.2.

Finalmente, en la sección 3.3 daremos a conocer los dos tipos de envejecimiento que está expuesta una batería de Ion Litio.

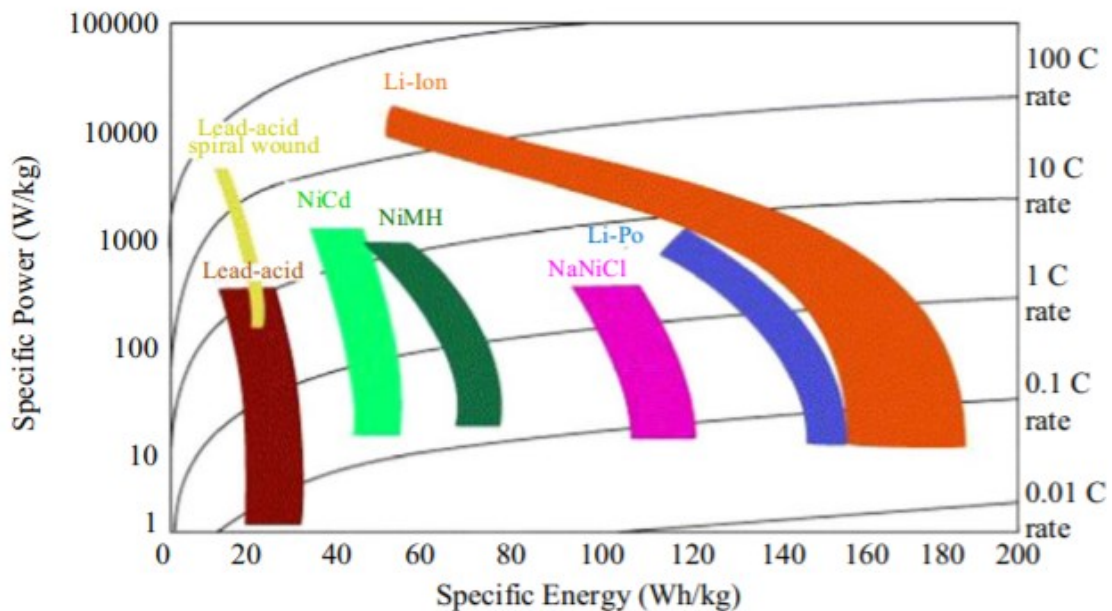


Figura2. Poder específico de las diferentes baterías [19].

3.1 Tipos de baterías de Ion Litio

Las baterías de Iones de litio están constituidas por cuatro componentes principales, los cuales serían: el ánodo, el cátodo, el electrolito y el separador como se indica en la figura 3. La productividad que rinde la batería dependerá de las propiedades del material que esté elaborado, en la figura 3 se puede observar la composición de una celda de Ion litio [20]

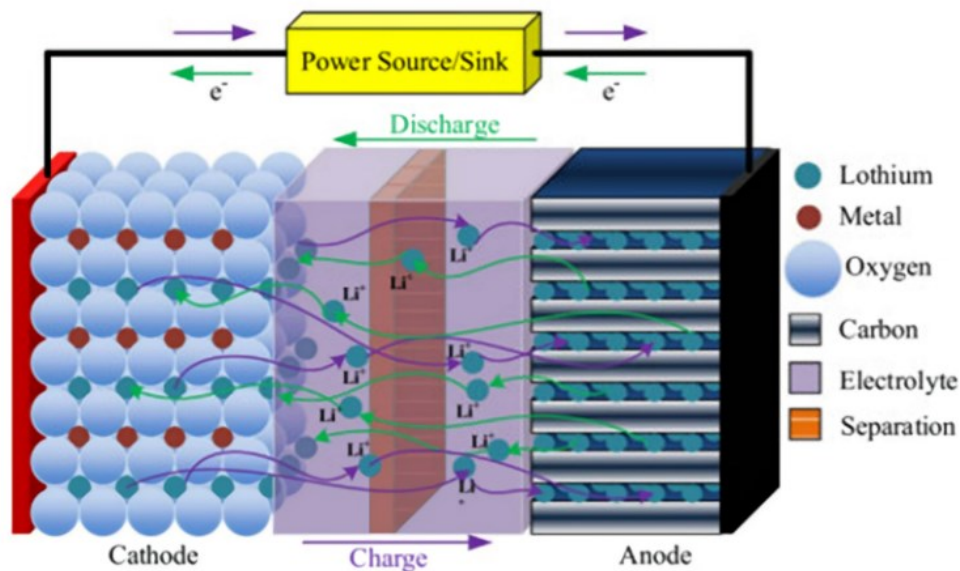


Figura 3. Estructura de una batería de Ion de Litio [19].

Se debe tener en consideración la elección de los materiales, haciendo un énfasis en el electrodo positivo, debido que es el encargado de vigilar las características de la batería, siendo la seguridad, potencia, la vida útil, además que dependiendo del material elegido el coste de elaboración puede ser mayor [21]. A continuación, se tratará de la clasificación de los electrodos positivos que existen actualmente en el mercado.

3.1.1 Óxido de cobalto de litio.

En el año 1991 Sony produjo por primera vez el óxido de cobalto y litio, posteriormente Mizushina perfeccionó el material [22]. La característica principal que presenta este material es la elevada energía específica siendo la primera elección para el uso en celulares,

tabletas, computadoras portátiles y cámaras. No obstante, la asequibilidad del cobalto es escaso, provocando que el coste de elaboración sea elevado [23]. La batería está dividida por un cátodo de óxido de cobalto y un ánodo de carbono grafitado [24]. Además, posee una vida útil corta y disposición de cargas restringidas, por lo tanto, no puede cargarse y descargarse a corrientes fuertes [25]. Necesita de un resguardo contra el sobrecalentamiento y su velocidad de carga y descarga se debe reducir a un nivel seguro siendo próximo al 1C [26].

Además, esta batería cuenta con la siguiente ventaja: alta energía específica, no obstante, posee un alto costo, una vida útil corta, capacidad de carga limitada y una baja seguridad, siendo aplicada para celulares, laptops y cámaras digitales [27]- [28]- [29]- [30].

3.1.2 Óxido de manganeso de litio

La batería de óxido de litio y manganeso (LMO) se elaboró por primera vez en un boletín de investigación de materiales desarrollado en el año 1983 [31]. Posteriormente, en el año 1994 el laboratorio Bellcore fabricó la batería de óxido de litio y manganeso [32]. Esta batería posee una estructura en forma de espinela en 3D con patrones en forma de diamantes, la cual posibilita que la partícula se vaporice en el electrodo, dando como resultado un mejor reparto de la corriente y disminuye la resistencia interna a fin de cargarse rápidamente y descarga a una corriente elevada. Gracias a su configuración de espinela, posee impactos positivos en la temperatura de las celdas y seguridad, no obstante, se limita su vida útil [27].

La capacidad de almacenamiento de la batería de Li-manganeso comparada con la batería de Li-cobalto es un 33% inferior [27]. En cambio, la batería de Li-manganeso suministra aproximadamente un 50% más de energía que las baterías elaboradas de níquel [33].

Especialistas pretenden mejorar la longevidad y el control de altas corrientes de esta batería debido a que su original diseño lo permite [27]. El óxido de litio y manganeso posee un límite inferior, entre un rango de 100 a 120 mAh/g, a la par de una gran pérdida de capacidad

durante el ciclo de carga o descarga, dado por la desintegración del manganeso en el electrolito en temperaturas altas [34].

Además, esta batería cuenta con las siguientes ventajas: un bajo costo de producción, alto voltaje, una seguridad media y potencia específica, no obstante, posee una limitada vida útil y poca capacidad de almacenaje, siendo aplicada para vehículos eléctricos, vehículos híbridos y aparatos de medicina [28]- [29]- [35]- [30].

3.1.3 Fosfato de litio

En el año de 1996, la universidad de Texas reveló que el fosfato se puede utilizar como material catódico para las baterías de litio. Este nuevo material para el cátodo es estable en el momento de sobrecarga a la par que puede soportar altas temperaturas sin quebrarse; el material del cátodo de fosfato de hierro de litio es más seguro que otros materiales [36]. Los fosfatos otorgan una temperatura de funcionamiento de las células comprendida entre -30°C a 60°C y un rango de empaquetamiento de la celda de -50°C a 60°C que empeora el desbordamiento térmico evitando de tal manera que exista una fuga térmica [36].} Dicha batería de litio y fosfato de hierro (LFP) es elaborada con materiales de fosfato a tamaño nanométrico dando una baja resistencia, mayor vida útil, posibilidad de manejo de grandes cargas, mejor seguridad y consistencia térmica, sin efectos tóxicos y menor gasto de elaboración [27]. Presenta menor impacto en la vida útil por sobrecarga y subcarga, no obstante, la energía específica se reduce marginalmente.

Las baterías de Li-fosfato pueden entregar una energía específica y una tensión nominal aproximada de 160 mAh/g y 3.40 V [37]. Dichas propiedades promueven la mejora del rendimiento de la batería [38].

Además, esta batería cuenta con las siguientes ventajas: una buena estabilidad térmica, alta capacidad de corriente, excelente seguridad, una larga vida útil, un bajo precio y menor toxicidad, no obstante, posee una energía específica moderada, baja tensión y es sensible a la

variación de temperatura, siendo aplicada para vehículos eléctricos, herramientas eléctricas y dispositivos portátiles [28]- [29]- [30]- [39].

3.1.4 Óxido de cobalto de níquel y manganeso

Las empresas elaboradoras de baterías se dedican a elaborar una mezcla de cátodos de níquel-manganeso-cobalto (NMC) en el año 2004 [28], la cual cuenta con una estructura atómica similar a la batería óxido litio de cobalto, los materiales están enfocados a establecer una gran energía específica o una potencia con alta intensidad. La mezcla entre níquel y manganeso otorga un excelente rendimiento, destacando la alta energía específica que puede entregar el níquel y el pequeño efecto de resistencia interna que brinda el manganeso, pero se presenta unos inconvenientes siendo que el níquel es poco estable y el manganeso entrega una baja energía específica [40].

La proporción de mezcla de materiales para el cátodo es de un 33% de níquel, 33% de manganeso y un 34% de cobalto, otorgando una mezcla singular que otorga menores costos de materia prima dado el menor uso de cobalto en comparación de la batería óxido de litio – cobalto [40]. En la actualidad, la demanda de esta batería es alta y en mayor proporción de la industria automotriz para el uso en los vehículos eléctricos ya que provee una alta energía específica y mínima tasa de autocalentamiento [27].

Además, esta batería cuenta con las siguientes ventajas: entrega un buen rendimiento y sobresale en energía específica, no obstante, posee un alto costo de producción, siendo aplicada para herramientas eléctricas, vehículos eléctricos y almacenadores de energía [27]- [29]- [30]- [41].

3.1.5 Óxido de litio níquel cobalto aluminio

El óxido de litio níquel, cobalto y aluminio (NCA) hace su aparición en el año 1999, usado especialmente para aplicaciones específicas. Las industrias automotrices se están

centrando en la producción de baterías de NCA la cual contiene un 5% de aluminio, 15% de cobalto y 80% de níquel, otorgando la misma un alto rendimiento, las cuales son: su densidad de energía, energía específica, potencia y su larga vida útil [28] - [42]. Sin embargo, la batería de NCA no presenta un alto índice de seguridad por lo que es necesario tomar medidas de seguridad a la hora de implementarla en un vehículo eléctrico, dado que la estabilidad térmica del electrodo genera conflictos al someterle a una alta tasa de carga [43]- [29].

Además, esta batería cuenta con las siguientes ventajas: buena vida útil, una alta densidad de energía y potencia, no obstante, posee un alto costo y seguridad marginal, siendo aplicada para vehículos eléctricos y trenes de potencia de energía [27] - [29]- [30]- [45].

3.1.6 Litio – titanio

En el año 1980 se empezó a emplear los ánodos de titanio de litio, la cual tiene una estructura espinela y su voltaje es de 2.4V, siendo un suplente de los ánodos de grafito, además otorga una vida útil elevada debido a que no presenta cambios de volumen en el proceso de litación [27] - [44]. También, otorga una alta capacidad, una excelente seguridad, se puede someter a elevadas tasas de carga – descarga y tiene un excelente comportamiento a bajas temperaturas, debido a que su energía específica no es elevada, generado por la limitación de la tensión nominal. Sin embargo, el electrodo no reacciona con el inventario de litio, lo que sí ocurre con las baterías de ion litio con electrodo de grafito [27] - [44].

Además, esta batería cuenta con las siguientes ventajas: teniendo un rango de temperatura de funcionamiento más amplio, eficiencia de recarga más alta, alta seguridad, mayores ciclos de vida útil y estabilidad de carga rápida, no obstante, posee un pequeño voltaje, baja densidad de energía y es difícil de fabricar, siendo aplicada para nanotecnología avanzada [27]- [28]- [29]- [46].

3.2 Comparación del rendimiento entre los tipos de baterías de iones de litio

Tratado el tema sobre los diferentes materiales que se pueden utilizar como electrodo, estos presentan diferencias significativas. En la figura 4 se puede observar las características de tensión de funcionamiento de los distintos materiales [24].

Para el electrodo positivo, el LCO entrega una buena productividad, no obstante, este presenta un mayor coste de elaboración. El NCA y el NMC poseen altas capacidades y voltajes, un buen rendimiento, pero de igual manera su coste es elevado siendo el níquel y el cobalto recursos limitados.

Se puede distinguir que la batería NMC es más segura que la NCA. Las versiones de LMO poseen un precio bajo dado al fácil acceso del manganeso, además de tener un alto voltaje, una seguridad media y un buen rendimiento, pero tienen un ciclo de vida corto y una capacidad de almacenamiento pobre. Por último, la variante LiFePO_4 alberga una buena seguridad, buen ciclo de vida y rendimiento, bajo precio y menor emisión de toxicidad, pero un bajo voltaje, energía y capacidad. Por último, en los electrodos negativos el grafito tiene un alto ciclo de vida, una densidad de energía amplia e ineficiencias dado al desarrollo de la interfaz de electrolito sólido [27] - [28] - [44].

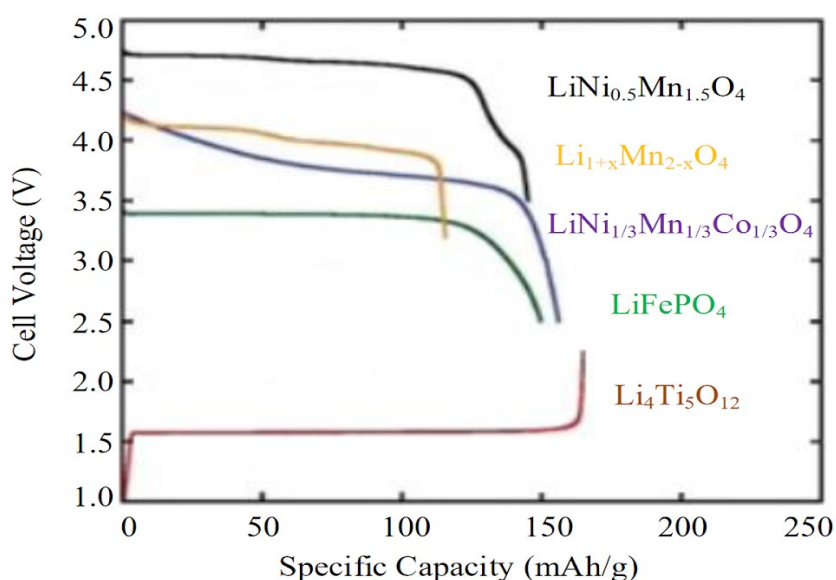


Figura 4. Perfil de voltaje de funcionamiento de todos los materiales de los electrodos de litio [27].

La figura 5 compara la energía específica potencia específica, densidad de energía, densidad de potencia, coste, cuestiones de seguridad, el rendimiento general y los ciclos de vida de los distintos tipos de baterías de litio. Superficialmente, se puede concluir que el litio-titanio es el mejor en términos de seguridad, rendimiento ciclo de vida y economía, pero sigue siendo pobre en las categorías de capacidad y categorías. El litio-níquel-manganeso-cobalto tiene propiedades moderadas, y los demás son medios [27].

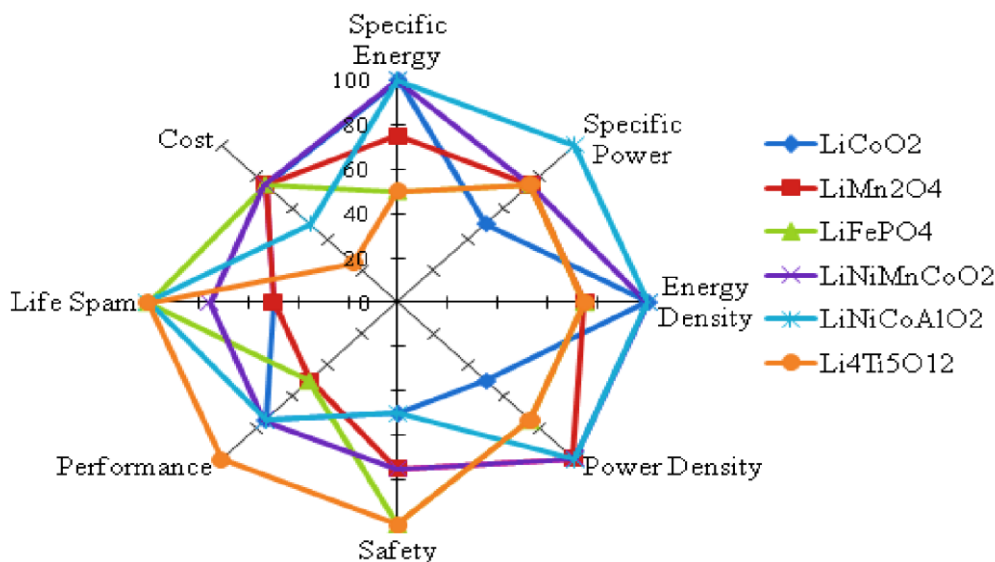


Figura 5. Comparación entre los tipos de baterías de iones de litio con valores indexados. [27].

La comparación del rendimiento entre los tipos de baterías de iones de litio, incluyendo las características, ventajas, desventajas y aplicaciones se ve en la tabla 1 [27] - [28] - [40] - [44] - [47] - [33].

Tabla 1. Especificaciones de los diferentes tipos de baterías de Iones de litio.

Abreviación	LCO	NCA	NMC	LMO	LFP	LTO
Nombre	Óxido de litio y cobalto	Óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio	Níquel de litio, manganeso óxido de cobalto	Espinela de litio y manganeso	Fosfato de litio y hierro	Titanio de litio
Electrodo positivo	LiCoO ₂	LiNiCoAlO ₂	LiNiMnCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄	LMO - NCA
Electrodo negativo	Grafito	Grafito	Grafito	Grafito	Grafito	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂
Voltaje de celda (V)	3.7 - 3.9	3.65	3.8 - 4.0	4	3.3	2.3 - 2.5

Densidad de energía (Wh/Kg)	150	130	170	12	130	85
Máxima tasa de carga (Crate)	1	1 y 2 en celdas específicas.	1 y 2 en celdas específicas.	1, 10-30 en celdas específicas.	11 y 25 en celdas específicas.	10 y 30 en baterías específicas.
Vida útil en número de ciclos con un DOD al 100%	500 - 1000	1000 - 1500	1000 - 2000	1000 - 1500	2000	3000 - 7000
Fuga térmica (°C)	150	210	210	250	270	Muy alto.
Temperatura de trabajo (°C)	-20 a 55	-20 a 60	-20 a 55	>50	-30 a 60	-30 a 55
Resistencia (mili ohmios)	-	0.4	1.1	-	7.5	1.8

3.3 Tipos de envejecimiento de una batería Ion litio.

3.3.1 Envejecimiento por funcionamiento

Este tipo de degradación en la vida útil de la batería ocurre por la temperatura, el estado de carga (SOC) y la corriente de carga y descarga (Crate) [48]. Como se aprecia en la figura 6, mientras más alto sea la tasa de carga (Crate) y la temperatura, la capacidad de almacenar energía disminuye al igual que su vida útil. Detallando que un ciclo no solo consiste en usar el 100% de la energía de la batería y después volver a cargarla, sino que varias descargas parciales también hacen un ciclo [49] - [50].

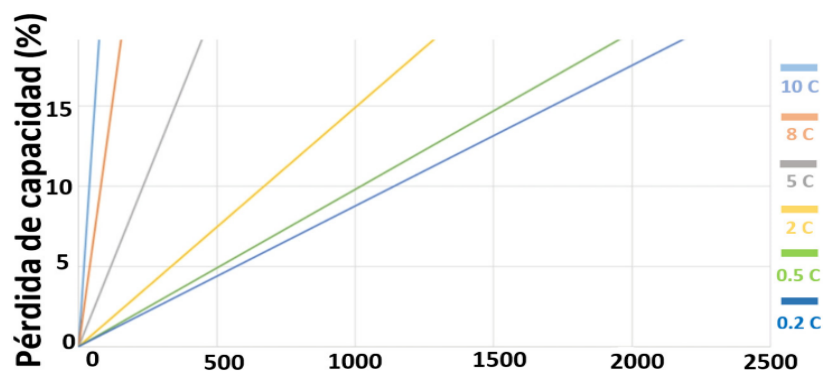


Figura 3. Envejecimiento por uso [50].

3.3.2 Envejeciendo en reposo

Es el envejecimiento que la batería obtiene debido al paso del tiempo sin que se le ejerza un uso, teniendo como características primordiales para su durabilidad el estado de carga (SOC) y la temperatura la cual va a estar expuesta [48] - [49] - [50].

Dicho deterioro se puede apreciar en la figura 7 el cual es el estudio que se desarrolló por los autores [51] determinando mediante una simulación de 36 semanas el desgaste natural de un conjunto de baterías de Ion Litio, concluyendo que dependiendo de las condiciones (la temperatura y el SOC), las células que se encuentran en las celdas de las baterías pierden su capacidad de almacenamiento entre un rango del 1 al 10 %.

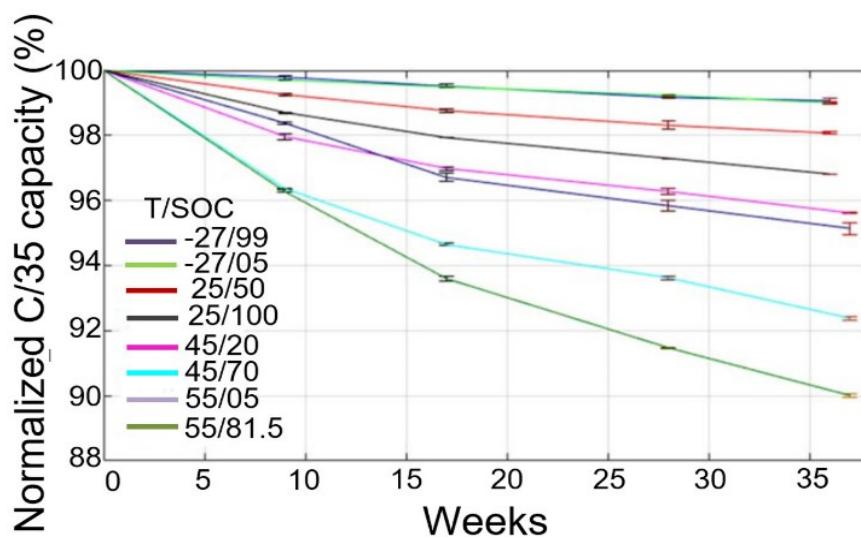


Figura 7. Pérdida de capacidad en función al tiempo y la temperatura [49].

La misma conclusión otorgó el autor [49] definiendo que las baterías que estén en un estado de carga similar, el deterioro se verá mayor a una alta temperatura, también, cuando las baterías de Ion de Litio se encuentran en una misma temperatura el desgaste será mayor dependiendo al estado de carga que se encuentre.

4. Resultados y discusión

Las baterías de Ion litio se encuentran expuestas a dos variables principales para su envejecimiento, en la figura 8 se aprecia dichas variables y los efectos que las mismas generan, en los siguientes puntos se discutirá la vida útil de las celdas de fosfato de litio.



Figura 4. Temas que abarcan el deterioro de las baterías.

4.1 Envejecimiento de las baterías Ion litio según la tasa de carga/descarga.

La disminución de rendimiento de las baterías de Ion Litio se determina por la pérdida de energía disponible en función de los ciclos de carga y descarga. La energía que se dispone en las celdas disminuye cuando se presenta una pérdida de inventario del material de litio de las células [6] - [52] - [53] - [54] - [55] - [56] - [57] - [58]. Además, varios autores: [16]- [59]- [60]- [61]- [62] manifiestan que, al cargar una batería a una alta intensidad, ocasiona el aumento de la resistencia de las celdas, debido a que se genera una temperatura alta, dicha temperatura se encuentra en función de la tasa de carga (Crate), produciendo que la composición química de la película superficial cambia considerablemente, siendo esta alteración la razón de la generación de mayor resistencia celular a comparación con las Crate más bajas.

En la figura 9 se aprecia que los autores [63] - [55] concuerdan en mayor medida con el estudio realizado por [52], el cual lleva a cabo una simulación con diferentes tasas de descarga: a 1/3 Crate (33 A), 0.5 Crate (50A), 1 Crate (100 A), 1.5Crate (150 A) y 2 Crate (200 A). Demostrando que, durante la descarga a diferentes tasas, a una temperatura ambiente (25°C) se

presenta una pérdida de voltaje terminal de una batería en función de la tasa de descarga, sin embargo, cuando el SOC se encuentra en el rango de 20% - 80% se genera una alta eficiencia de descarga dado que gran parte de la energía química tiende a transformarse en electricidad. El voltaje de la batería se modifica repentinamente cuando se encuentra entre un rango de SOC del (0 al 20%) y (80 al 100%), debido que la resistencia interna y de polarización crecen considerablemente.

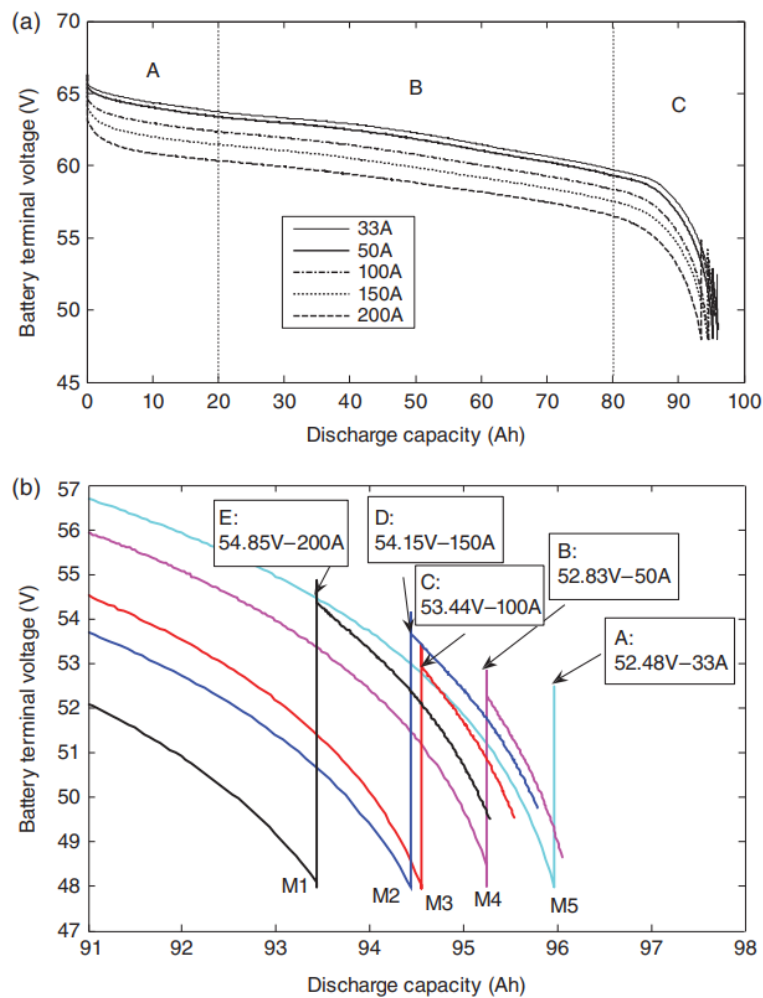


Figura 9. Capacidad de descarga en función de diferentes tasas de descarga ($1/3 C - 0.5C - 1C - 1.5C - 2C$) [52].

El autor [14] en concordancia con los autores [6] - [16] - [48] - [63] - [64] - [65] - [66] - [67] manifiestan que la pérdida de capacidad de almacenar energía se encuentra en función de la tasa de carga debido al incremento de la resistencia óhmica y resistencia de polarización

acelerando de tal manera el final de su vida útil. Sin embargo el autor [63] revela que cuando se combinan tasas de carga altas y tasas de descarga bajas, el envejecimiento de las celdas de iones de litio se acelera, a comparación de una misma tasa de carga y descarga, el estudio se llevó a cabo a una temperatura de 25°C y 47°C, en ambas temperaturas otorgando la misma conclusión, en cambio, si esta combinación se invirtiera bajo los mismos parámetros de temperatura la vida útil de la batería se prolonga frente a una misma tasa de carga y descarga.

A más de ello, los autores [4] - [5] - [14] - [15] - [68] - [69] consideran que para una alta tasa de carga no se debe cargar las celdas sobrepasando el 80% del SOC ya que la temperatura aumenta drásticamente por el agrupamiento de iones de litio en el ánodo necesitando de tal manera una sobre potencia, mientras que para una carga estándar (1 Crate) y baja (0.5 Crate) se presenta en menor medida y no se lleva a cabo dicha consideración.

En la figura 10 los autores [59] - [70] - [71] concuerdan con el autor [72] el cual desarrolló un experimento a una celda de batería de Ion Litio aplicando un protocolo de carga corriente constante y voltaje constante (CC CV) a tres diferentes tasas de carga (1C, 3C y 5C). Obteniendo como resultado que a 1C, alrededor del 97% de la capacidad original aún se encuentra útil después de realizar 1200 ciclos, no obstante, al trabajar con corrientes de carga más altas, el envejecimiento de la batería tiende a degenerarse en mayor medida, mientras una carga de 3C da como resultado que aún conserva el 95% de la capacidad original al culminar los 1200 ciclos, por último, al aplicarle la carga de 5C conlleva la final de su vida útil en menos de 700 ciclos.

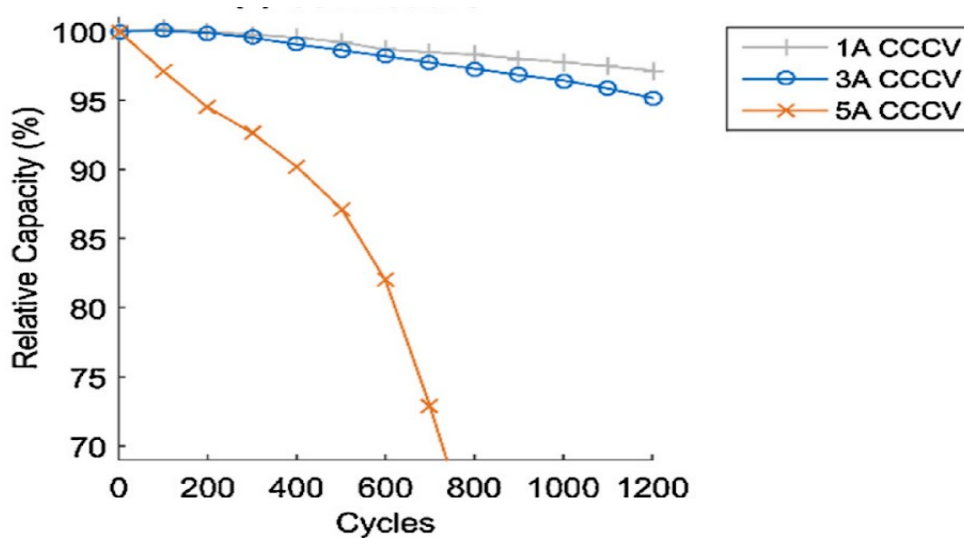


Figura 10. Ciclos de vida para Protocolos de carga CCCV, a diferentes tasas de corriente [72].

Varios autores analizaron que parámetros pueden afectar de manera directa a la degradación de las baterías de Iones de Litio, precisamente su vida útil, en función que la batería se encuentre en un estado de carga rápida, siendo que 13 autores [4] - [6] - [14] - [15] - [16] - [48] - [52] - [60] - [62] - [63] - [68] - [69] - [70], afirman que la batería al estar a una temperatura ($>40\text{ }^{\circ}\text{C}$) perjudica su vida útil, 7 autores [4] - [6] - [52] - [60] - [62] - [69] - [71] afirman que la temperatura baja ($<10\text{ }^{\circ}\text{C}$) es causante de una mayor degradación de la batería, 9 autores [14] - [15] - [48] - [52] - [59] - [60] - [62] - [63] - [72] adjudican que al estar a un SOC alto (80% - 100%) atenúan la capacidad de la batería, 7 autores [15] - [52] - [59] - [63] - [70] - [71] - [72] consolidan que al estar a un SOC bajo (20% - 0%) es perjudicial, 3 autores [6] - [14] - [62] argumentan que la sobrecarga también es un parámetro clave para la degradación y por último, 6 autores [52] - [59] - [62] - [63] - [69] - [71] afirman que el DOD disminuye el almacenamiento de las baterías.

5. Conclusiones

En conclusión, la vida útil de las baterías para los vehículos eléctricos se da por terminada cuando presentan una reducción del 20% de su capacidad para almacenar energía. El envejecimiento de las baterías de Ion litio tienen una verdadera dependencia con el C-rate, debido que una tasa de carga y descarga elevada disminuye considerablemente la vida útil de la celda, por ende, varios estudios manifiestan que las baterías de Ion litio se debe cargar y descargar a tasas bajas para evitar el incremento de la resistencia interna ocasionado por la formación de la película IES alrededor del ánodo y la pérdida de material activo.

Al momento de cargar una batería se debe tener en consideración el rango del SOC que se encuentre, dado que al alcanzar un 80% del SOC, se recomienda cesar la carga, evitando de tal manera una sobrecarga la cual lleva consigo un sobrecalentamiento de la celda aumentando en gran medida película IES y pérdida de material activo, o en peores casos una fuga térmica.

Debido a los estudios analizados concuerdan que la temperatura de la celda no es uniforme la mayor temperatura se da en la parte del núcleo de la celda debido a los separadores de polímeros, la diferencia de temperatura entre la parte externa de la celda y el núcleo se da en mayor medida cuando el C-rate es alto. Sin embargo, en la actualidad existen muy pocos estudios que traten sobre la distribución del calor en el interior de las celdas.

6. REFERENCIAS

- [1] R. Xiong, Y. Zhang, H. He, X. Zhou y M. G. Pecht, «A Double-Scale, Particle-Filtering, Energy State Prediction Algorithm for Lithium-Ion Batteries,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, n° 2, pp. 1526-153, 2017.
- [2] C. Mi, M. A. Masrur y D. W. Gao, *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*, United Kingdom: John Wiley & Sons., 2017.
- [3] I. Husain, *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*, Boca Ratón: CRC press, 2010.
- [4] Y. Zhang, R. Xiong, H. He, X. Qu y M. Pecht, «Aging characteristics-based health diagnosis and remaining useful life prognostics for lithium-ion batteries,» *ETransportation*, vol. 1, p. 100004, 2019.
- [5] A. Hoke, A. Brissette, K. Smith, A. Pratt y D. Maksim, «Accounting for Lithium-Ion Battery Degradation in Electric Vehicle Charging Optimization,» *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, n° 3, pp. 691-700, 2014.
- [6] A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, X. L. Simon O'Kane, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li, L. Liu, Y. Li, S. Zheng, S. Vetterlein, M. Gao, J. Du, M. Parkes, M. Ouyang, M. Marinescu y Grego, «Lithium-ion battery fast charging: A review,» *eTransportation*, vol. 1, p. 100011, 2019.
- [7] T. Volan, C. R. Vaz y M. Uriona-Maldonado, «Scenarios for end-of-life (EOL) electric vehicle batteries in China,» *Revista de Gestão*, vol. 28, n° 4, pp. 335-357, 2021.
- [8] M. Bielewski, D. Blagoeva, M. Cordella, F. D. Persio, P. Gaudillat, H. S, L. Mancini, F. Mathieux, M. P, P. E, D. Paraskevas, R. V, S. J, A. Villanueva y L. Zampori, *Analysis of sustainability criteria for lithium-ion batteries including related standards and regulations.*, Luxembourg: Union Europea, 2021.
- [9] C. Hu, G. Jain, P. Tamirisa y T. Gorka, «Method for estimating capacity and predicting remaining useful life of lithium-ion battery,» *In 2014 International Conference on Prognostics and Health Management*, pp. 1-8, 2014.
- [10] W. Waag, S. Käbitz y D. U. Sauer, «Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application,» *Applied Energy*, vol. 102, pp. 885-897, 2013.
- [11] A. A. A. Al-karakchi, G. Lacey y G. Putrus, «A method of electric vehicle charging to improve battery life,» *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1-3, 2015.

- [12] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard y D. Riu, «A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications,» *Journal of Power Sources*, vol. 241, pp. 680-689, 2013.
- [13] W. Wu, R. Ma, J. Liu, M. Liu, W. Wang y Q. Wang, «Impact of low temperature and charge profile on the aging of lithium-ion battery: Non-invasive and post-mortem analysis,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 170, p. 121024, 2021.
- [14] A. S. Mussa, M. Klett, M. Behm, G. Lindbergh y R. W. Lindström, «Fast-charging to a partial state of charge in lithium-ion batteries: A comparative ageing study,» *Journal of Energy Storage*, vol. 13, pp. 325-333, 2017.
- [15] J. Jiang, Q. Liu, C. Zhang y W. Zhang, «Evaluation of Acceptable Charging Current of Power Li-Ion Batteries Based on Polarization Characteristics,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 31, n° 12, pp. 6844-6851, 2014.
- [16] C. Zhang, J. Jiang, Y. Gao, W. Zhang, Q. Liu y X. Hu, «Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time,» *Applied Energy*, vol. 194, pp. 569-577, 2017.
- [17] E. G.-L. a, D. Fernando-Navas, G. Aponte-Mayor y L. A. Betancourt-Buitrago., «Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización,» *Dyna*, vol. 81, n° 184, pp. 158-163, 2014.
- [18] G. Tonon, «LA UTILIZACION DEL METODO COMPARATIVO EN ESTUDIOS CUALITATIVOS EN CIENCIA POLITICA Y CIENCIAS SOCIALES: diseño y desarrollo de una tesis doctoral,» *Kairos*, vol. 27, p. 7, 2011.
- [19] M. Hannan, M. Hoque, A. Mohamed y A. Ayob, «Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 771-789, 2017.
- [20] M. H. Lipu, M. Hannan, A. Hussain, M. Hoque, P. J. Ker, M. Saad y A. Ayob, «A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 205, pp. 115 - 133, 2018.
- [21] T. B. Reddy, *Linden's Handbook of Batteries*, Chicago: McGraw-Hill Education, 2011.
- [22] R. Xiong, J. Tian, H. Mu y C. Wang, «A systematic model-based degradation behavior recognition and health monitoring method for lithium-ion batteries,» *Applied Energy*, vol. 207, pp. 372-383, 2017.
- [23] H. Kim, K. Lee, S. Kim y Y. Kim, «Fluorination of free lithium residues on the surface of lithium nickel cobalt aluminum oxide cathode materials for lithium ion batteries,» *Materials & Design*, vol. 100, pp. 175-179, 2016.

- [24] X. Feng, Y. Gao, L. Ben, Z. Yang, Z. Wang y L. Chen, «Enhanced electrochemical performance of Ti-doped $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.54}\text{Co}_{0.13}\text{Ni}_{0.13}\text{O}_2$ for lithium-ion batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 317, pp. 74-80, 2016.
- [25] Z. Zhang, Q. Zhang, Y. Chen, J. Bao, X. Zhou, Z. Xie, J. Wei y P. Z. Zhou, «The First Introduction of Graphene to Rechargeable Li–CO₂ Batteries,» *Angewandte Chemie*, vol. 127, pp. 6650-6653, 2015.
- [26] Y. Cui, M. M. Mahmoud, M. Rohde, C. Ziebert y H. J. Seifert, «Thermal and ionic conductivity studies of lithium aluminum germanium phosphate solid-state electrolyte,» *Solid State Ionics*, vol. 289, pp. 125-132, 2016.
- [27] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof y P. J. Ker, «State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations,» *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19362-19378, 2018.
- [28] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho y G. Pasaoglu, «The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 292-308, 2018.
- [29] X. Yuan, H. Liu y J. Zhnag, *Lithium-ion batteries: advanced materials and technologies*, New York: CRC press, 2011.
- [30] G. Berckmans, M. Messagie, J. Smekens, N. Omar, L. Vanhaverbeke y J. V. Mierlo, «Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion batteries for electric vehicles Up to 2030,» *energies*, vol. 10, n° 9, p. 1314, 2017.
- [31] S. Li, Y. Xue, X. Cui, S. Geng y Y. Huang, «Effect of sulfolane and lithium bis(oxalato)borate-based electrolytes on the performance of spinel LiMn_2O_4 cathodes at 55 °C,» *Ionics*, vol. 22, p. 797–801, 2016.
- [32] Y. Tao, K. Rui, Z. Wen, Q. Wang, J. Jin, T. Zhang y T. Wu, «FeS₂ microsphere as cathode material for rechargeable lithium batteries,» *Solid State Ionics*, vol. 290, pp. 47-52, 2016.
- [33] R. Zhang, B. Xia, B. Li, Y. Lai, W. Zheng, H. Wang, W. Wang y M. Wang, «Study on the Characteristics of a High Capacity Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) Lithium-Ion Battery—An Experimental Investigation,» *Energies*, vol. 11, pp. 2275-2295, 2018.
- [34] J. M. Tarascon, N. Recham, M. Armand, J. N. Chotard, P. Barpanda, W. Walker y L. Dupont, «Hunting for Better Li-Based Electrode Materials via Low Temperature Inorganic Synthesis,» *Chemistry of Materials*, vol. 22, pp. 724-739, 2010.
- [35] J. Wang, Z. Li, J. T. J. Yang, J. Yu, W. Nie, G. Lei y Q. Xiao, «Effect of Al-doping on the electrochemical properties of a three-dimensionally,» *Electrochimica Acta*, vol. 75, pp. 115-122, 2012.

- [36] C. Zhao, H. Yin y C. Ma, «Quantitative Evaluation of LiFePO₄ Battery Cycle Life Improvement Using Ultracapacitors,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, pp. 3989 - 3993, 2016.
- [37] Q. Huang, J. Yang, C. B. Ng, C. Jia y Q. Wang, «A redox flow lithium battery based on the redox targeting reactions between LiFePO₄ and iodide,» *Energy & Environmental Science*, vol. 9, pp. 917-921, 2016.
- [38] H. Gong, H. Xue, T. Wang y J. He, «In-situ synthesis of monodisperse micro-nanospherical LiFePO₄/carbon cathode composites for lithium-ion batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 318, pp. 220-227, 2016.
- [39] L.H.Saw, K.Somasundaram y Y.YeA.A.O.Tay, «Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles,» *Journal of Power Sources*, vol. 249, pp. 231-238, 2014.
- [40] N. Omar, B. Verbrugge, G. Mulder, P. V. d. Bossche, J. V. Mierlo, M. Daowd, M. Dhaens y S. Pauwels, «Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application,» de *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Lille, France, 2010.
- [41] X. Chen, W. Shen, T. T. Vo, Z. Cao y A. Kapoor, «An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles,» *In 2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, pp. 230-235, 2012.
- [42] Y. Makimura, T. Sasaki, T. Nonaka, Y. F. Nishimura, T. Uyama, C. Okuda y Y. I. Y. Takeuchi, «Factors affecting cycling life of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ for lithium-ion batteries,» *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 4, pp. 8350-8358, 2016.
- [43] Y. Miao, P. Hynan, A. v. Jouanne y A. Yokochi, «Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements,» *Energies*, vol. 12, pp. 1074-1094, 2019.
- [44] L. A. Reche, «Herramienta software basada en MATLAB® para la simulación y análisis de sistemas de almacenamiento,» Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, Gijón, 2020.
- [45] H. Popp, J. Attia, F. Delcorso y A. Trifonova, «Lifetime analysis of four different lithium ion batteries for (plug-in) electric vehicle,» *In Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment*, 2014.
- [46] M. R.Giuliano, S. G.Advani y A. K.Prasad, «Thermal analysis and management of lithium–titanate batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 196, nº 15, pp. 6517-6524, 2011.
- [47] M. Koniak y A. Czerepicki, «Selection of the battery pack parameters for an electric vehicle based on performance requirements,» de *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Bangkok, Thailand, 2017.

- [48] S. Barcellona y L. Piegari, «Effect of current on cycle aging of lithium ion batteries,» *Journal of Energy Storage*, vol. 29, p. 101310, 2020.
- [49] A. C. Velasco, «Desarrollo y validación de un modelo de baterías ion-litio. Aplicación al estudio de su envejecimiento ligado al tipo de recarga,» E.T.S.I. Industriales (UPM), Madrid, 2018.
- [50] E. G. Olmo, «Caracterización de baterías de litio para el estudio del envejecimiento,» E.T.S.I. Industriales (UPM), Madrid, 2019.
- [51] M. Dubarry, A. Devie y B. Y. Liaw, «Cell-balancing currents in parallel strings of a battery system,» *Journal of Power Sources*, vol. 321, pp. 36-46, 2016.
- [52] J. Jiang y C. Zhang, *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*, Singapur: John Wiley & Sons, 2015.
- [53] T. M. Bandhauer, S. Garimella y T. F. Fuller, «A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries,» *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 158, p. R1, 2011.
- [54] J. Schmalstieg, S. Käbitz, M. Ecker y D. U. Sauer, «A holistic aging model for Li(NiMnCo)O₂ based 18650 lithium-ion batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 257, pp. 325-334, 2014.
- [55] Y. Gao, J. Jiang, C. Zhang, W. Zhang, Z. Ma y Y. Jiang, «Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses,» *Journal of Power Sources*, vol. 356, pp. 103-114, 2017.
- [56] X. Han, M. Ouyang, L. Lu, J. Li, Y. Zheng y Z. Li, «A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electrical vehicle: Aging mechanism identification,» *Journal of Power Sources*, vol. 251, pp. 38-54, 2014.
- [57] G. K. Prasad y C. D. Rahn, «Model based identification of aging parameters in lithium ion batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 232, pp. 79-85, 2013.
- [58] E. Sarasketa-Zabala, F. Aguesse, I. Villarreal, L. M. Rodriguez-Martinez, C. M. López y P. Kubiak, «Understanding Lithium Inventory Loss and Sudden Performance Fade in Cylindrical Cells during Cycling with Deep-Discharge Steps,» *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 119, p. 896–906, 2015.
- [59] M. Dubarry, C. Truchot, B. Y. Liaw, K. Gering, S. Sazhin, D. Jamison y C. Michelbacher, «Evaluation of commercial lithium-ion cells based on composite positive electrode for plug-in hybrid electric vehicle applications. Part II. Degradation mechanism under 2 C cycle aging,» *Journal of Power Sources*, vol. 196, n° 23, pp. 10336-10343, 2011.
- [60] M. Kassem, J. Bernard, R. Revel, S. Pélissier, F. Duclaud y C. Delacourt, «Calendar aging of a graphite/LiFePO₄ cell,» *Journal of Power Sources*, vol. 208, pp. 296-305, 2012.

- [61] M. Ecker, N. Nieto, S. Käbitz, J. Schmalstieg, H. Blanke, A. Warnecke y D. U. Sauer, «Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithium-ion batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 248, pp. 839-851, 2014.
- [62] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua y M. Ouyang, «A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles,» *Journal of Power Sources*, pp. 272-288, 2013.
- [63] J. Groot, M. Swierczynski, A. I. Stan y S. K. Kær, «On the complex ageing characteristics of high-power LiFePO₄/graphite battery cells cycled with high charge and discharge currents,» *Journal of Power Sources*, vol. 286, pp. 475-487, 2015.
- [64] J. A. Osara, O. A. Ezekoye, K. C. Marr y M. D. Bryant, «A methodology for analyzing aging and performance of lithium-ion batteries: Consistent cycling application,» *Journal of Energy Storage*, vol. 42, p. 103119, 2021.
- [65] J. Kang, F. Yan, P. Zhang y C. Du, «Comparison of comprehensive properties of Ni-MH (nickel-metal hydride) and Li-ion (lithium-ion) batteries in terms of energy efficiency,» *Energy*, vol. 70, pp. 618-625, 2014.
- [66] T.-K. Kim y S.-C. Moon, «Novel Practical Life Cycle Prediction Method by Entropy Estimation of Li-Ion Battery,» *Electronics*, vol. 10, n° 4, p. 487, 2021.
- [67] E. Briec y b. Muller, *Electric vehicle batteries: moving from research towards innovation: reports of the PPP European green vehicles initiative*, Berlín: Springer, 2015.
- [68] L. Somerville, J. Bareño, S. Trask, P. Jennings, A. McGordon, C. Lyness y I. Bloom, «The effect of charging rate on the graphite electrode of commercial lithium-ion cells: A post-mortem study,» *Journal of Power Sources*, vol. 335, pp. 189-196, 2016.
- [69] J. Wang, P. Liu, J. Hicks-Garner, E. Sherman, S. Soukiazian, M. Verbrugge, H. Tataria, J. Musser y P. Finamore, «Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells,» *Journal of Power Sources*, vol. 196, n° 8, pp. 3942-3948, 2011.
- [70] A. Cordoba-Arenas, S. Onori, Y. Guezennec y G. Rizzoni, «Capacity and power fade cycle-life model for plug-in hybrid electric vehicle lithium-ion battery cells containing blended spinel and layered-oxide positive electrodes,» *Journal of Power Sources*, vol. 278, pp. 473-483, 2015.
- [71] I.-H. Cho, P.-Y. Lee y J.-H. Kim, «Analysis of the Effect of the Variable Charging Current Control Method on Cycle Life of Li-ion Batteries,» *Energies*, vol. 12, n° 15, p. 3023, 2019.
- [72] P. Keil y A. Jossen, «Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells,» *Journal of Energy Storage*, vol. 6, pp. 125-141, 2016.