



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Economía y Administración de Empresas

Organización de empresas

TRABAJO FIN DE GRADO

**Análisis de las medidas de protección contra incendios de las
baterías eléctricas.**

Analysis of the electric batteries' protection measures against fires

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Autor: Rosa Poyato Fragero

Tutor: D. Luis Rodríguez-Passolas Cantal

Cotutor: Dr. D. Jorge Varela Barreras

MÁLAGA, Enero de 2.023



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA





RESUMEN

Las baterías eléctricas son unas de las tecnologías más importantes en el transporte, en el consumo eléctrico y en el almacenamiento de energía tanto en la actualidad como en el futuro. Entre todos los tipos que se pueden encontrar en el mercado, la batería de iones de litio es la dominante en el sector de los vehículos eléctricos por su gran densidad energética y alta energía específica. Sin embargo, las baterías eléctricas de iones de litio pueden llegar a incendiarse o a tener tendencia a liberar gases si se dan una serie de condiciones o mecanismos que favorezcan la fuga térmica existiendo peligros para personas y usuarios.

Aunque estadísticamente es poco probable que se produzcan incendios, los peligros que supone el fuego de este tipo de batería son diferentes a los peligros de un fuego convencional en cuanto a la toxicidad, velocidad de expansión, supresión y duración. En este Trabajo de Fin de Grado se analizan los principales peligros junto a las fuentes que los originan además de las consecuencias que suponen para posteriormente identificar la serie de medidas de seguridad que la industria de este sector ha implantado. Estas medidas de seguridad son las comprendidas entre las medidas de prevención, las de detección, las de compartimentación y las de supresión durante todo el ciclo de vida de la batería eléctrica de iones de litio, desde la fabricación de la celda, la integración de celdas en módulos, packs y sistemas; el uso del vehículo, el mantenimiento del vehículo, hasta el final de vida de la batería.

Como conclusión se establece que para que, en un futuro muy cercano, donde las baterías de iones de litio son la tecnología de gran parte de los vehículos en las carreteras, no se ponga en riesgo a todo ser vivo presente a lo largo del ciclo de vida de la batería; es necesario que se establezcan las medidas de seguridad mencionadas y los gobiernos e implicados dispongan nuevas medidas que resuelvan los problemas de seguridad existentes en algunas de las etapas del ciclo de vida.



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



PALABRAS CLAVE

BATERÍAS, ELÉCTRICAS, INCENDIOS, RIESGO, PELIGRO, VEHÍCULOS, ELÉCTRICOS



ABSTRACT

Electric batteries are one of the most important technologies in transport, electricity consumption and energy storage in the present and in the future. Among all the types of electric batteries that can be found on the market, the lithium-ion battery is the dominant one in the electric vehicle sector due to its high energy density and high specific energy. However, lithium-ion electric batteries may catch fire or tend to release gases if certain conditions or mechanisms that favor thermal runaway occur, presenting hazards to the user or to any living being.

Although fires are statistically unlikely, the fire hazards of this type of battery are different from conventional fire hazards in terms of toxicity, expansion rate, suppression, and duration. In this Final Degree Project, the main hazards are analyzed with the sources that originate them, as well as their consequences to later identify the set of security measures that the industry in this sector has implemented. These security measures are those included among prevention, detection, compartmentalization and suppression measures throughout the life cycle of the lithium-ion electric battery, from cell manufacturing, cell integration in modules, packs and systems, the use of the vehicle, the maintenance of the vehicle, until the end of life of the battery.

In conclusion, it is established that in the very near future, where lithium-ion batteries are the technology of a large part of the vehicles on the roads, every living being present throughout the life cycle of the battery is not put at risk; it is necessary to establish the security measures mentioned and governments and people involved in the subject need to provide new measures to solve existing security problems in some stages of the life cycle.



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



KEY WORDS

BATTERIES, ELECTRICS, FIRE, RISK, HAZARD, VEHICLES, ELECTRICS



TERMINOLOGÍA Y ABREVIATURAS

BESS Battery Energy Storage Systems (Sistema de almacenamiento de energía de la batería).

BEV Battery Electric Vehicle (Vehículo de batería eléctrica).

BMS Battery Management Systems (Sistema de gestión de baterías).

BSI British Standards Institution (Institución Británica de Normalización).

CID Current Interrupt Device (Dispositivo de interrupción de corriente).

ELCB Electric Leakage Circuit Breaker (Disyuntor de fuga a tierra).

EMC Ethyl-Methyl Carbonate (Carbonato de etileno).

EPI Equipo de protección individual.

EV Electric vehicle (Vehículo eléctrico).

HF Flúoruro de hidrógeno.

HSE Health and Safety Executive (Agencia Ejecutiva para la Salud y Seguridad).

HTR Heat-Temperature-Reaction (Calor, temperatura, reacción).

ICEV Internal combustion engine vehicle (Vehículo de combustión interna).

IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto Nacional de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).

IMI Institute for the Motor Industry (Instituto de la Industria Automovilística)

INERIS L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Instituto Nacional del Entorno Industrial y de los Riesgos).

INSST Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.

IR infrarrojos.

ISC Internal Short Circuit (Cortocircuito interno).

LCO Óxido de litio cobalto

Li-ion Iones de litio.

LTO Titanato de litio.

MCB Miniature Circuit Breaker (Disyuntor eléctrico en miniatura o minibreaker).



NFCC National Fire Chiefs Council (Consejo nacional de jefes de bomberos).

NFPA National Fire Protection Association (Asociación nacional de protección contra el fuego).

NiCd Níquel cadmio.

NiMH Níquel hidruro metálico.

NTSB National Transportation Safety Board (Junta nacional de seguridad en el transporte).

OEM Original Equipment Manufacturer (Fabricante de equipo original).

OLEV Office for Low Emission Vehicles (Oficina de vehículos de bajas emisiones).

PBA Plomo-ácido

PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Vehículo híbrido eléctrico enchufable).

PTC Positive Temperature Coefficient (Coeficiente de temperatura positivo).

RD Real Decreto

REBT Reglamento Eléctrico para Baja Tensión.

SEI Solid Electrolyte Interface (Interfase de electrolito sólido).

SMMT Society of Motor Manufacturers and Traders (Sociedad de fabricantes y comerciales de motores).

SOA Safe Operating Area (Área de operación segura).

SOC State of Charge (Estado de carga).

SOH State of Health (Estado de salud).

TMS Thermal Management System (Sistema de gestión térmica).

VRLA Valve Regulated Lead Acid (Batería de plomo-ácido regulada por válvula).

WoS Web of Science (Web de ciencia).



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA





ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. OBJETO	19
1.2. METODOLOGÍA	20
1.3. ALCANCE	22
1.4. ANTECEDENTES	22
2. LA BATERÍA ELÉCTRICA: DEFINICIÓN, COMPONENTES, TIPOS	24
2.1. COMPONENTES DE LA BATERÍA ELÉCTRICA	24
2.2. TIPOS DE BATERÍAS ELÉCTRICAS	27
2.2.1. LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO	31
3. PELIGROS, CAUSAS Y RIESGOS PRINCIPALES DE LA BATERÍA ELÉCTRICA	35
3.1 PELIGROS DE LA BATERÍA ELÉCTRICA	36
3.2 TIPOS DE ABUSO	40
3.3 MECANISMO DEL INCENDIO EN BATERÍAS ELÉCTRICAS	43
3.3.1 EL TRIÁNGULO DE FUEGO Y EL TETRAEDRO DE FUEGO	43
3.3.2. MECANISMO DEL INCENDIO POR FUGA TÉRMICA	45
3.4. ESTRATEGIAS GENERALES DE MITIGACIÓN	49
4. SEGURIDAD DURANTE EL CICLO DE VIDA DE LA BATERÍA ELÉCTRICA	51
4.1. SEGURIDAD A NIVEL DE CELDA	54
4.1.1. RIESGO DE INCENDIO EN LA FABRICACIÓN DE CELDAS	55
4.1.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN	57
4.1.3. MEDIDAS DE DETECCIÓN. SISTEMAS DE DETECCIÓN	60
4.1.4. MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN. BARRERAS	62
4.1.5. MEDIDAS DE SUPRESIÓN	63
4.2. SEGURIDAD EN LA INTEGRACIÓN DE CELDAS EN MÓDULOS, PACKS Y SISTEMAS	63
4.2.1. RIESGO DE INCENDIO EN LA INTEGRACIÓN DE PAQUETES EN SISTEMAS	64
4.2.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN	66
4.2.3. MEDIDAS DE DETECCIÓN	70
4.2.4. MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN. PROPAGACIÓN	71
4.2.5. MEDIDAS DE SUPRESIÓN	71
4.3. SEGURIDAD EN EL USO DEL VEHÍCULO	72
4.3.1. RIESGO DE INCENDIO EN EL USO DEL VEHÍCULO.	78
4.3.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN. ENSAYOS A NIVEL VEHÍCULO O SISTEMA	81
4.3.3. MEDIDAS DE DETECCIÓN. BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS	81
4.3.4. MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN	84
4.3.5. MEDIDAS DE SUPRESIÓN. REGÍMENES REGULATORIOS. MEJORES PRÁCTICAS.	84
4.4. SEGURIDAD EN EL MANTENIMIENTO DEL VEHÍCULO	90
4.4.1. RIESGO DE INCENDIO EN EL MANTENIMIENTO DEL VEHÍCULO	91
4.4.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN. FORMACIÓN TÉCNICA. RÉGIMEN REGULATORIO	91
4.4.3. MEDIDAS DE DETECCIÓN	93



4.4.4. <i>MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN</i>	93
4.4.5. <i>MEDIDAS DE SUPRESIÓN</i>	94
4.5. SEGURIDAD EN EL FINAL DE VIDA	94
4.5.1. <i>RIESGO DE INCENDIO EN EL FINAL DE VIDA DE LA BATERÍA.</i>	95
4.5.2. <i>MEDIDAS DE PREVENCIÓN</i>	97
4.5.3. <i>MEDIDAS DE DETECCIÓN</i>	99
4.5.4. <i>MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN</i>	100
4.5.5. <i>MEDIDAS DE SUPRESIÓN</i>	100
5. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DE PROTECCIÓN EXISTENTES EN LA BATERÍA ELÉCTRICA	100
6. CONCLUSIONES	104
7. BIBLIOGRAFÍA	107



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Número de vehículos eléctricos por año (Energy Agency, 2022)</i>	17
<i>Ilustración 2. Tipos de vehículo e incendios por cada 100.000 ventas y totales (Bodine, 2022)</i>	19
<i>Ilustración 3. Etapas del ciclo de vida de una batería eléctrica. (Christensen et al., 2021)</i>	20
<i>Ilustración 4. Ejemplos de incendios de vehículos eléctricos en todo el mundo (Peiyi Sun et al., 2020)</i>	23
<i>Ilustración 5. Modular battery pack de BMW i3 (Technik, 2018)</i>	25
<i>Ilustración 6. Unidades constructivas en una batería modular (UFO POWER, 2020)</i>	26
<i>Ilustración 7. Arquitecturas de los packs de baterías a) convencional b) celda a pack d) celda a chasis (Jin et al., 2022)</i>	27
<i>Ilustración 8. Comparación entre la densidad energética y la energía específica de los distintos tipos de baterías (Tarascon & Armand, 2001)</i>	30
<i>Ilustración 9. Comparación entre la potencia específica y la energía específica de los distintos tipos de baterías (Ragone, 1968)</i>	31
<i>Ilustración 10. Funcionamiento de la batería de iones de litio (Ghiji et al., 2020)</i>	33
<i>Ilustración 11. Porcentaje de componentes en las diferentes químicas de las baterías de iones de litio (Dai et al., 2019)</i>	35
<i>Ilustración 12. Esquema de las causas de accidentes de fuego en una batería de iones de litio (Q. Wang, Mao, et al., 2019)</i>	42
<i>Ilustración 13. Esquema del desarrollo de la fuga térmica desde las causas hasta la producción del incendio, explosión, etc. (Chen et al., 2021)</i>	42
<i>Ilustración 14. Triángulo de fuego (Lanchas, n.d.)</i>	44
<i>Ilustración 15. Tetraedro de fuego (Face2face Engineering Solutions, 2014)</i>	44
<i>Ilustración 16. Mecanismo de reacciones en cadena durante la fuga térmica o "thermal runaway" de una batería de iones de litio con electrodos de grafito o de NCM y un separador cerámico (Feng et al., 2018)</i>	46
<i>Ilustración 17. Diagrama de energía liberada en la fuga térmica (Feng et al., 2018)</i>	47
<i>Ilustración 18. Estructura del sistema de ventilación de seguridad de una batería 18650 (Kong et al., 2018)</i>	60
<i>Ilustración 19. Paquete de baterías Tesla Roadster (Berdichevsky et al., 2007)</i>	68
<i>Ilustración 20. Calor de combustión disipado frente tiempo de EV y ICE fabricante 1 (Lecocq et al., 2012b)</i>	74
<i>Ilustración 21. Calor de combustión disipado frente tiempo de EV y ICE fabricante 2 (Lecocq et al., 2012)</i>	75
<i>Ilustración 22. Tasa de calor máximo liberado frente al tiempo de un EV y un ICE fabricante 1 (Lecocq et al., 2012)</i>	76
<i>Ilustración 23. Tasa de calor máximo liberado frente al tiempo de un EV y un ICE fabricante 2 (Lecocq et al., 2012)</i>	77
<i>Ilustración 24. Diagrama de intervención en un accidente de EV según el NFCC (NFCC, 2021)</i>	87



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Peligros de las baterías de iones de litios y fuentes (Larsson & Mellander, 2017)</i>	39
<i>Tabla 2. Peligros de las baterías de iones de litios y consecuencias (Larsson & Mellander, 2017)</i>	39
<i>Tabla 3. Fuentes de los peligros de las baterías de iones de litios, mitigaciones y estrategias de protección (Larsson & Mellander, 2017)</i>	50
<i>Tabla 4. Peligros de las baterías de iones de litios, posibilidades de mitigación y estrategias de protección (Larsson & Mellander, 2017)</i>	51
<i>Tabla 5. Material del cátodo y temperatura a la que descompone la interfaz de electrolito sólido (Q. Wang, Mao, et al., 2019)</i>	58
<i>Tabla 6. Lista de agentes extintores recomendados por fabricantes (Wilkins et al., 2017)</i>	89
<i>Tabla 7. Etapas del ciclo de vida de la batería eléctrica y medidas de seguridad (Elaboración propia)</i>	103



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA





1. INTRODUCCIÓN

Las baterías eléctricas se encuentran cada vez más presentes en la sociedad. Especialmente las baterías de iones de litio cuando se requieren baterías recargables ya que tienen mayor densidad de potencia y de energía además de una capacidad específica elevada (Kong et al., 2018). Estas características hacen que las baterías de iones de litio sean unas de las más utilizadas actualmente en la industria de electrificación del transporte. Además, juegan un papel muy importante en el almacenamiento de energía renovable.

La batería de iones de litio fue inventada por M. Stanley Whittingham en los setenta durante la crisis del petróleo en sus intentos de búsqueda de métodos para conseguir energía libre de combustibles fósiles. Investigó los superconductores y descubrió el bisulfuro de titanio como material del cátodo, con espacios para intercalar iones de litio. Sin embargo, el ánodo era de litio metálico creando una batería de más de dos voltios, pero muy peligrosa por el alto riesgo de explosión. Más adelante en 1980 John B. Goodenough descubrió que el óxido de cobalto como material para el cátodo intercalado con iones de litio creaba una batería mucho más potente, de hasta cuatro voltios. Pero no fue hasta 1985 que Akira Yoshino, gracias al cátodo de óxido de cobalto, pudo crear la primera batería de iones de litio comercializable utilizando en vez de litio metálico en el ánodo, coque de petróleo. Comenzaron a comercializarse en 1991 y el pasado 2019 los tres autores recibieron el Premio Nobel de Química por el desarrollo de la batería de iones de litio (Nevelius & Ramstrom, 2019).

Debido a la estrategia de descarbonización del transporte, a través de la electrificación y la generación con energías renovables, las baterías eléctricas han ganado popularidad en el mercado. Existen diferentes niveles de electrificación, clasificables en escalas crecientes de electrificación hasta llegar a la electrificación pura, en los llamados vehículos eléctricos de baterías o “battery electric vehicles” (BEV).



También es posible la electrificación pura con hibridación con baterías y pilas de hidrógeno. Si bien esta es una solución residual en el mercado en estos días, fundamentalmente debido a las limitaciones de la pila de hidrógeno, tanto técnico-económicas, por el coste del H₂ y la baja eficiencia de la pila; como logísticas, en particular en cuanto a la producción verde y a la red de distribución (International Energy Agency, 2021). Los BEV requieren grandes baterías, típicamente de entre 20 y 100 kWh, y su despliegue a escala global presenta enormes retos como la limitada oferta de metales actual (níquel, manganeso, litio, cobalto, aluminio, fósforo, etc.) por la demanda imprevista y la falta de inversión en nuevas capacidades de suministro (Lin et al., 2022), el elevado coste de las baterías, el límite técnico en densidad energética y por tanto del vehículo eléctrico, la necesidad de red de recarga, etc. Además de los retos expuestos, surgen problemas de seguridad incrementados por la creciente demanda y puesta en mercado de estos aparatos ya que algunas baterías de iones de litio pueden mostrar tendencia a comenzar un fuego o liberar gases tóxicos cuando están bajo condiciones de abuso creando un peligro, pues como se puede observar en la gráfica de la imagen 1, en 2021 había más de 16,5 millones de vehículos eléctricos de todo el rango de electrificación en las carreteras, cifra que se ha triplicado en solo tres años. Entre estos problemas de seguridad destaca el riesgo de incendio (Energy Agency, 2022).

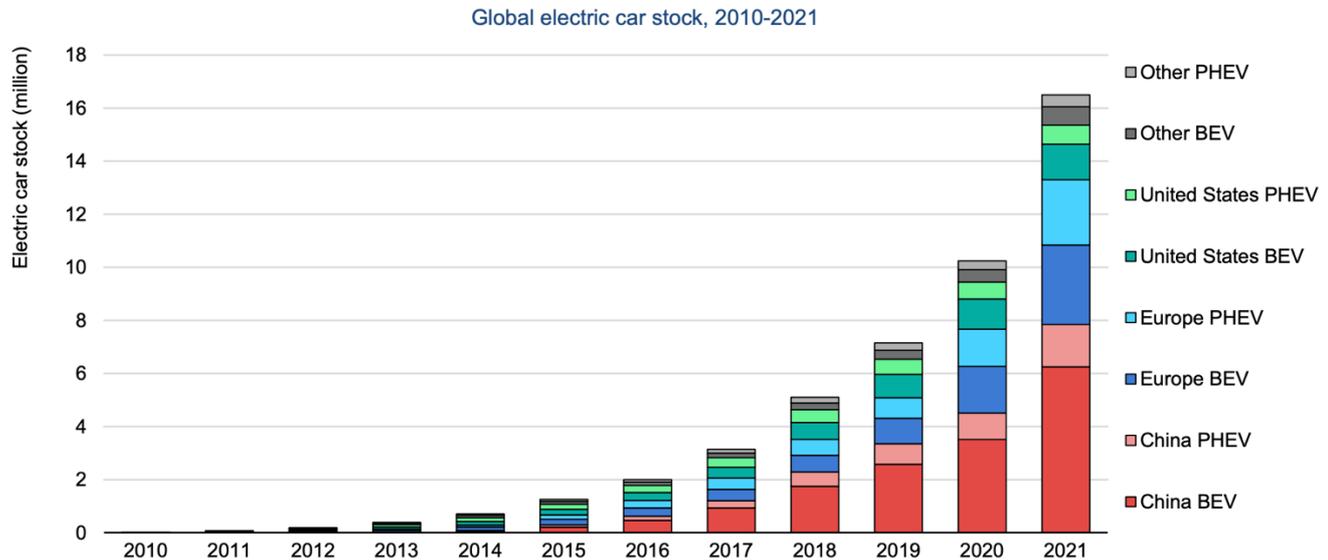


Ilustración 1. Número de vehículos eléctricos por año (Energy Agency, 2022)

Cuando la tecnología de las baterías de iones de litio va aumentando de celda a módulos y a packs de baterías, la seguridad se convierte en un problema que crece conforme el aumento de escala de estas. Si se sobrepasan las condiciones en las que las baterías funcionan de forma segura, se puede provocar la fuga térmica y llegar al incendio de la batería. La fuga térmica se produce cuando la batería alcanza una temperatura muy elevada por factores como por ejemplo al aumento de la velocidad de reacción de una reacción exotérmica, siendo una señal de fuente de ignición y pudiendo llevar al peligro de incendio. Cuando una celda falla, todo el calor que se ha generado puede llevar a una fuga térmica y se puede expandir a las celdas de al lado provocando la propagación del posible fuego. Cuando se produce un fuego a nivel de packs o de módulos se genera una gran cantidad de calor y de gases que son liberados muy difíciles de eliminar. Aunque los incendios no son muy comunes, existe una gran preocupación debido al aumento de la presencia de vehículos eléctricos en las carreteras además de que los incendios provocados por baterías de iones de litio generan peligros muy diferentes a los provocados por otro tipo de incendios en cuanto a la propagación, la toxicidad, la duración y la dificultad de extinción. Ejemplos de los accidentes de estos



hechos se dan en China, uno de los mercados más expandidos en cuanto a vehículos eléctricos, pues se registraron de media por año 31 incendios causados principalmente por el incendio repentino y la carga. En Estados Unidos, la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte (NTSB) informó de 17 incendios de Tesla de los 350.000 vehículos comercializados y de 3 de BMWi3 de 100.000 vehículos durante 2018 (Diaz et al., 2020).

Por lo tanto, los servicios de respuesta ante emergencias junto al servicio de bomberos y todo usuario necesitan tener los conocimientos necesarios para hacer frente a los riesgos a los que nos enfrentamos como sociedad y a los accidentes que se están produciendo y aquellos que se producirán con el aumento en el mercado del número de baterías eléctricas (Faraday Institution, 2021).

Cabe destacar la diferencia de la preocupación por la seguridad de las baterías eléctricas respecto a los incendios en los vehículos eléctricos frente al peligro de incendio de un vehículo de combustión interna. Según un estudio de AutoinsuranceEZ, una consultoría de seguros de Estados Unidos, realizado en 2022; por cada 100.000 vehículos de cada tipo vendidos en Estados Unidos, híbridos, de combustión interna y eléctricos; como se puede observar en la siguiente imagen 2, 3.474,5 incendios producidos son de híbridos, 1.529,9 son de combustión interna y 25,1 son de eléctricos. Según este estudio los vehículos eléctricos son los que menos riesgo de incendio tienen. Aun así, son considerados significativamente más difíciles de apagar que los incendios de vehículos de combustión interna por la poca formación de los bomberos en este asunto y porque como los vehículos eléctricos son su propia fuente de combustión pueden arder durante horas e incluso una vez apagado el fuego volver a incendiarse. Cabe destacar que los vehículos de diésel tienen mucho menos riesgo de incendio que los de gasolina. Por otro lado, el riesgo de que arda la batería auxiliar está presente en todos los tipos de vehículos (Bodine, 2022).



Ilustración 2. Tipos de vehículo e incendios por cada 100.000 ventas y totales (Bodine, 2022)

1.1. OBJETO

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio de los riesgos de incendio de las baterías eléctricas en cada una de las etapas de su ciclo de vida representadas en la imagen 3. Desde en la integración de las celdas en módulos y packs, en la integración de packs en sistemas, en el uso del vehículo, en el mantenimiento del vehículo y en el final de vida; para identificar y analizar las medidas de protección contra incendios presentes hoy en día, y contribuir al estado del arte detectando deficiencias y lagunas de conocimiento actuales hacia las que deberán orientarse los esfuerzos académicos, legislativos, e industriales futuros.

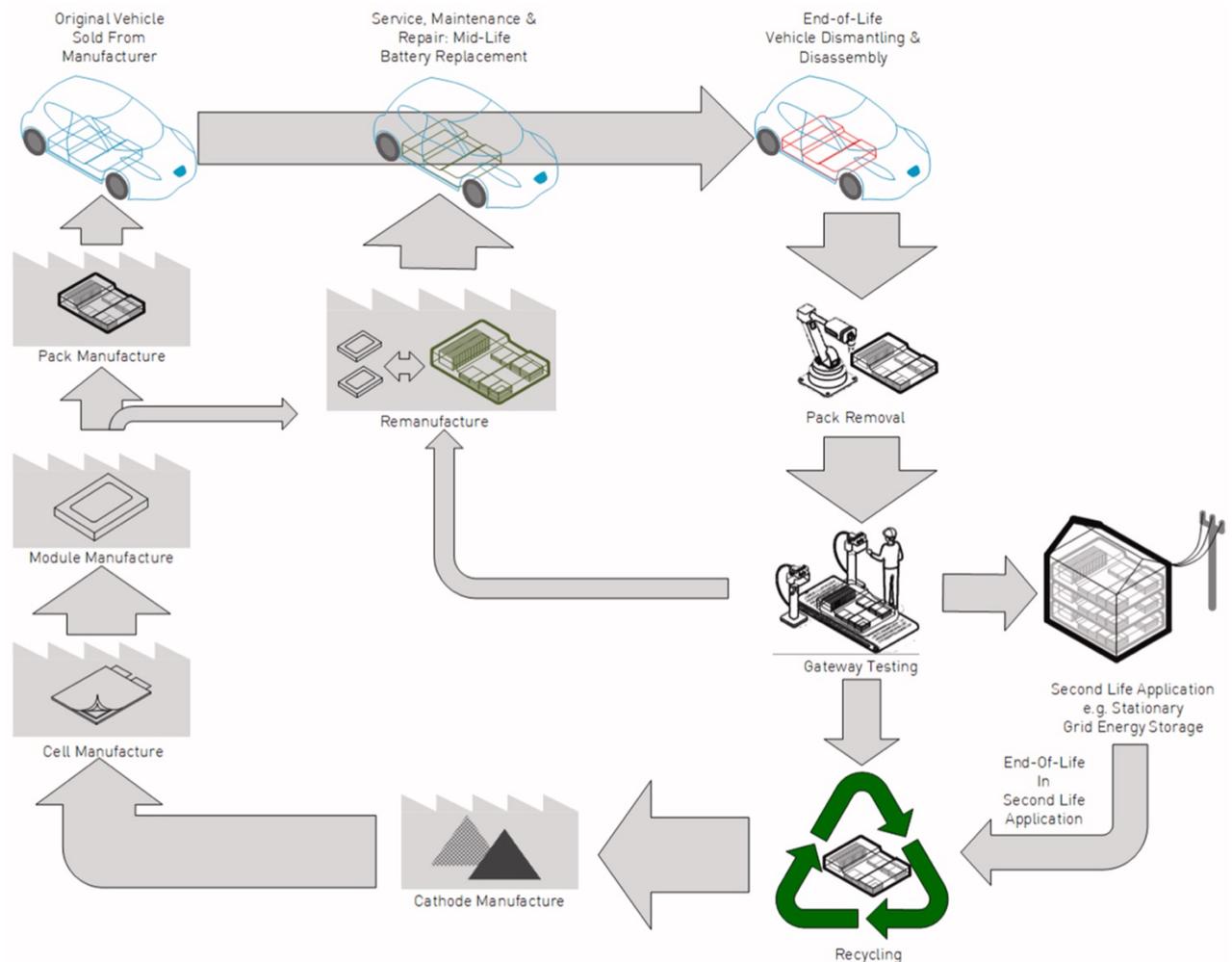


Ilustración 3. Etapas del ciclo de vida de una batería eléctrica (Christensen et al., 2021)

1.2. METODOLOGÍA

La metodología a seguir primordialmente será el análisis de fuentes de información, como artículos de revistas y estudios realizados por expertos principalmente en bases de datos bibliográficas como EIServier, WoS (Web of Science) Dialnet y Google Académico entre otros debido al limitado contenido sobre esta temática en la legislación a nivel mundial, en cada etapa del ciclo de vida de la batería



eléctrica y la compilación de cada uno de los riesgos de incendio y sus medidas oportunas de prevención, detección, compartimentación y supresión.

Primeramente, se ha realizado un análisis de la situación actual de las baterías eléctricas, las baterías eléctricas más empleadas en general, las más utilizadas en vehículos eléctricos, los componentes y materiales y diferentes químicas que las componen, las características junto a las fortalezas y debilidades de cada tipo de batería eléctrica hasta llegar a las baterías eléctricas de iones de litio. Para realizar el análisis se ha llevado a cabo la búsqueda de los artículos que se van a utilizar en el TFG en los portales EIServier, WoS, Dialnet y Google Académico, y se ha ido buscando por las palabras clave. Una vez que se han encontrado los artículos buscados por palabras clave, se ha hecho un filtrado leyendo de forma breve el título y el resumen y observando la afinidad entre el tema se descartaba o mantenía el artículo. Una vez analizado el estado del arte se ha realizado una búsqueda de los principales peligros de las baterías eléctricas de iones de litio además de las fuentes de estos peligros y sus consecuencias en la búsqueda de artículos en bases de datos bibliográficas. Finalizado el análisis de los peligros se ha elaborado un esquema con las etapas principales del ciclo de vida de las baterías eléctricas y se han investigado los aspectos de seguridad respecto a incendios más importantes en cada fase de prevención, detección, compartimentación y supresión para plasmarlo de modo gráfico en una tabla en cada una de las etapas establecidas en el esquema y establecer un guion para el TFG. Una vez establecido el guion, se ha buscado información específica en los artículos seleccionados para cada una de las etapas del ciclo de vida y para cada una de sus fases. Finalmente, con la información de seguridad recopilada y los métodos de prevención, detección, compartimentación y supresión anunciados, se ha establecido un análisis de las carencias de seguridad de las baterías eléctricas y el camino de investigación pendiente que queda por seguir para convertir las baterías eléctricas en un sistema seguro para el ser humano y el medioambiente.



1.3. ALCANCE

El ámbito de aplicación se enfoca en el análisis de los riesgos de las baterías eléctricas para el análisis de las medidas de protección contra incendios, analizando componentes y diferentes situaciones. No se aborda la fase de fabricación de la celda. En tipología de vehículos, se centra en vehículos utilitarios o turismos, también conocidos como vehículos ligeros o “light-duty vehicles”. Es multi-escala, de celda a módulo, pack y vehículo y multi-etapa en cuanto a ciclo de vida. Tiene en cuenta diferentes tipos de baterías dentro de la familia de ion de litio.

Se requerirá del estudio de incendios y explosiones provocados por baterías eléctricas. Además del estudio de guías establecidas por la NFPA y otras instituciones gubernamentales principalmente en Estados Unidos, Reino Unido y España para la protección de estos accidentes. Es una revisión crítica de la literatura, y no incluye investigación experimental.

Para finalizar, se aportará una tabla resumen de todas las medidas de seguridad a seguir para mejorar la seguridad de las baterías eléctricas a lo largo de su ciclo de vida.

1.4. ANTECEDENTES

Los accidentes producidos a lo largo de estos años en los vehículos eléctricos (BEV) han causado daños muy grandes por la dificultad para extinguirlos. Se espera que sigan una tendencia similar a los de los vehículos de combustión interna (ICEV), pero por ahora no existen estadísticas definidas de las causas principales de estos incendios ni del número exacto de incendios producidos en cada país. A lo largo de estos años han surgido entre tantos, la siguiente serie de incendios de la imagen 4. En 2015, en el

apartado b de la imagen 4, un autobús eléctrico se incendió mientras se cargaba en Shenzhen, China. Un año más tarde, en 2016, en el apartado a, el modelo SM3. Z. E Renault-Samsung se incendió mientras su propietario conducía en Corea del Sur. En 2018 un Tesla Model S, como muestra el apartado c, produjo humo mientras se conducía en California, Estados Unidos. Ese mismo año, se produjo otro incendio en un vehículo eléctrico en un garaje en Hangzhou, China; como se puede observar en el apartado d de la imagen 4 (P. Sun et al., 2020).



Ilustración 4. Ejemplos de incendios de vehículos eléctricos en todo el mundo (P. Sun et al., 2020)



2. LA BATERÍA ELÉCTRICA: DEFINICIÓN, COMPONENTES, TIPOS

La batería es un instrumento que convierte directamente la energía química incluida en un material electroquímicamente activo, a través de una reacción redox, en energía eléctrica (Ogura & Kolhe, 2017). Las baterías eléctricas pueden ser de numerosos tipos, dependiendo del uso de estas. En este apartado, nos centraremos en las baterías eléctricas empleadas en vehículos eléctricos, los componentes de estas, los tipos que se pueden encontrar en el mercado, las más usadas y los principales peligros y daños que pueden ocasionar.

2.1. COMPONENTES DE LA BATERÍA ELÉCTRICA

A continuación, se expondrán los componentes del sistema de baterías de un vehículo eléctrico (BEV). Un vehículo eléctrico se caracteriza por contener un paquete de baterías de entre 400 a 500 voltios y que puede llegar cerca de los 1000 voltios compuesto por celdas conectadas entre sí en serio o en paralelo formando módulos que se integran en diferentes arquitecturas de paquetes o sistemas. Dicho nivel de tensión es superior a los 75V establecidos como límite de tensión de seguridad en el punto 1 del Artículo 4 del R.D. 842/2002 por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) (*Real Decreto 842/2002, de 2 de Agosto, Por El Que Se Aprueba El Reglamento Electrotécnico Para Baja Tensión.*, 2002).

A lo largo del tiempo, las arquitecturas han ido evolucionando para facilitar el ensamblado y mejorar la integración de las celdas, resultando en mayores densidades energéticas. Así pues, se han propuesto diferentes tipos de arquitecturas, comenzando por los packs de batería no modulares como el Tesla Roadster (Berdichevsky et al.,

2007), y evolucionando hacia diseños modulares como los del Tesla Model S , el Chevy Volt, El BMW i3, etc. (S. Arora, 2018), que hoy en día son los más populares.



Ilustración 5. Modular battery pack de BMW i3 (Technik, 2018)

La celda es el componente más pequeño de la batería y un pack de baterías puede tener desde un centenar hasta miles de ellas, dependiendo del tamaño de las celdas y del propio pack. Por ejemplo, la batería de un Tesla Model S se compone de más de 7.000 pequeñas celdas 18650 (Merano, 2021) de 3,4 Ah por celda, mientras que la de BYD Blade tiene poco más de un centenar de grandes celdas prismáticas de 138 Ah por celda (Lima, 2022). La tensión nominal típica de una celda es de entre 3,2 y 3,7 V, y su ventana de operación entre 2-4 V o 2,5-4,2 V, dependiendo del sub-tipo. Se conectan entre ellas tanto en paralelo, para aumentar la capacidad y corriente del pack; como en serie, para aumentar el voltaje.

En la imagen 6 se muestra las unidades básicas de una arquitectura modular. Un bloque consiste en la unión de varias celdas acopladas entre sí de las dos formas que se ha mencionado anteriormente. Al unir los bloques se forman módulos. Por último, los módulos, al ser conectados en paralelo o en serie; forman la batería. Dependiendo de la potencia, la capacidad de almacenamiento y la densidad de energía que se requiera para

el uso de esa batería, tendrán una composición de un número de celdas y módulos y de unas dimensiones determinadas (MIT Electric Vehicle Team, 2008), (Ramanath, 2020).

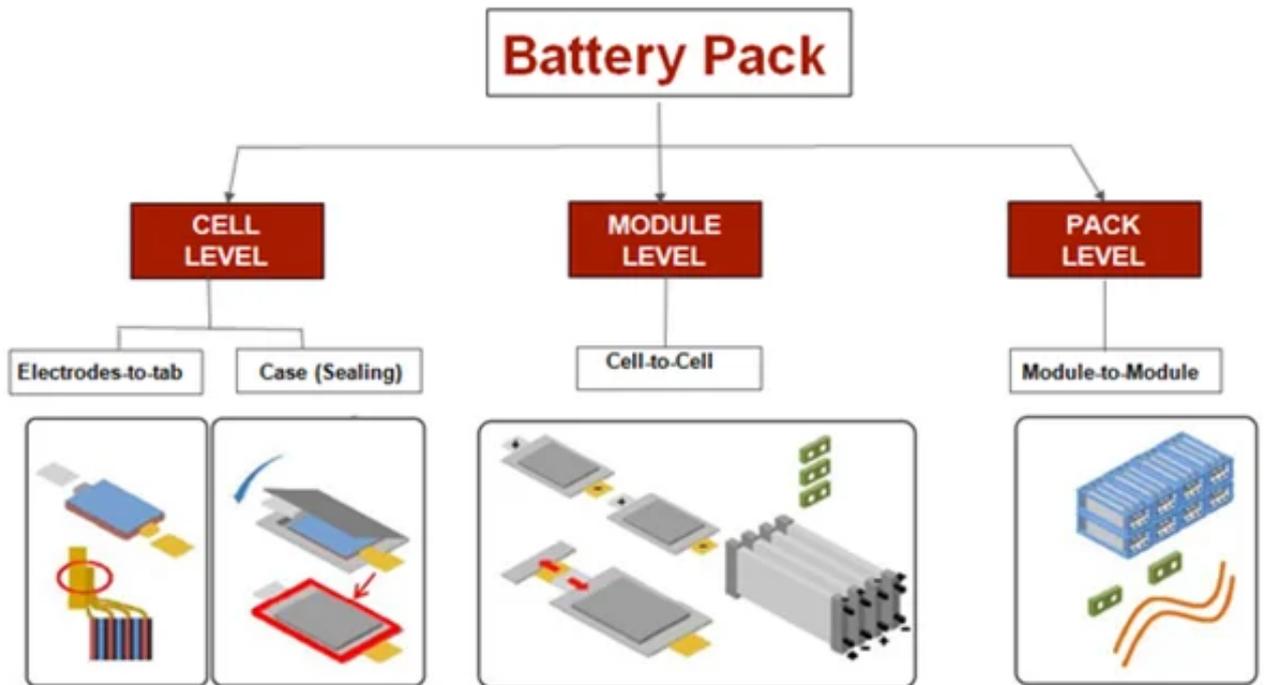


Ilustración 6. Unidades constructivas en una batería modular (UFO POWER, 2020)

Recientemente, fabricantes como BYD o Tesla, con el objeto de aumentar la densidad energética de los sistemas de baterías, se han propuesto las arquitecturas de celda a pack (“cell-to-pack”) (H. Wang et al., 2021), celda a chasis (“cell-to-chassis” o “cell-to-body”), que permiten una integración más eficiente de la celda en el pack o el sistema en términos de espacio y masa (Akgunduz, 2022), (Gasgoo, 2022). La arquitectura celda a pack, en la imagen el apartado b, consiste en la integración de celdas directamente en el pack de baterías sin requerir módulos como la arquitectura convencional, que se observa en la imagen a, haciendo a la batería más ligera e incrementando su densidad energética (Shen et al., 2022). Por otro lado, la arquitectura celda a chasis, como se puede observar en la imagen en el apartado d, integra las celdas

directamente al chasis (Jin et al., 2022).

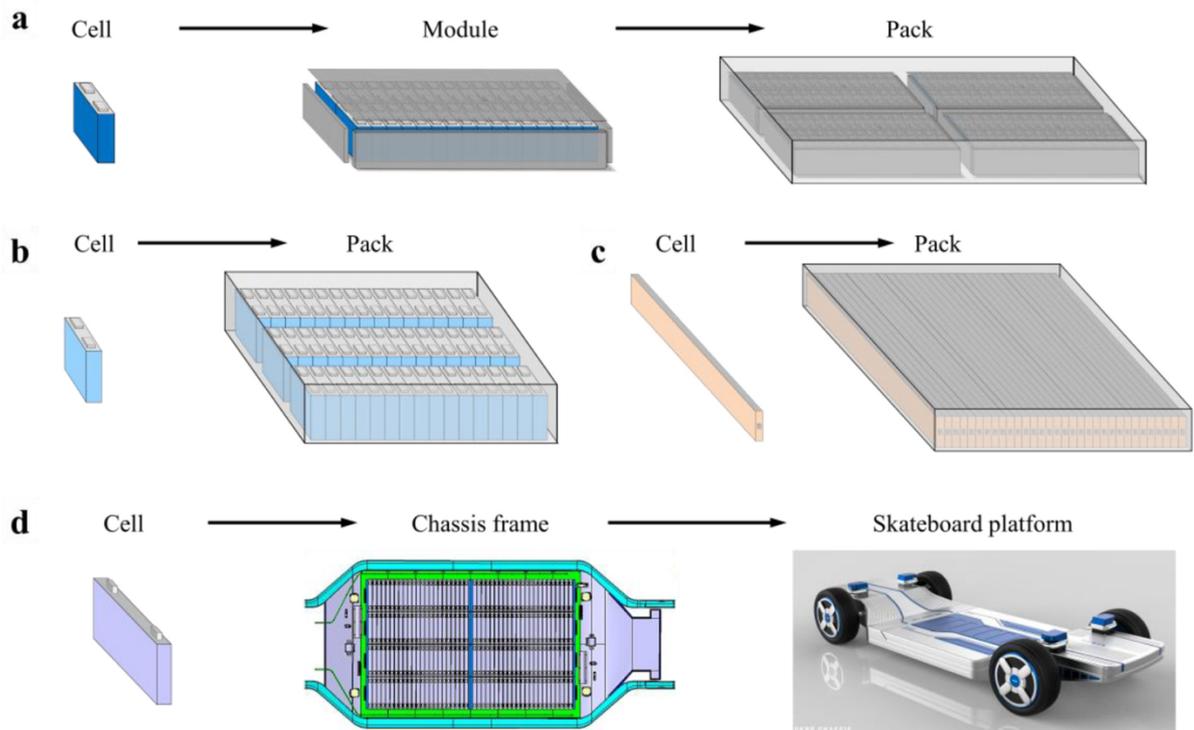


Ilustración 7. Arquitecturas de los packs de baterías a) convencional b) celda a pack d) celda a chasis (Jin et al., 2022)

2.2. TIPOS DE BATERÍAS ELÉCTRICAS

Existen diferentes tipos de baterías y formas de clasificarlas, siendo la popular la realizada según la composición y la tecnología. Además, existen diferentes tipos de baterías que todavía se encuentran en desarrollo por lo que solo se nombrarán (Ogura & Kolhe, 2017):

- **Batería de plomo-ácido (PbA):** Este tipo de batería fue descubierta en 1860 por el físico francés Dr. Plant y fue el primer tipo de batería recargable conocida. Se componen de un plomo, un dióxido de plomo y un electrolito de ácido sulfúrico y agua combinados. Pueden ser de dos tipos: de plomo líquido, la



más barata y usada para aplicaciones industriales y automotrices; y de plomo sellada o regulada por válvula (VRLA), empleada en fuentes de alimentación y en fuentes de alimentación autónomas para áreas remotas. Aunque este tipo de baterías es una de las más populares su uso como batería de tracción en vehículos está limitada por su baja densidad energética. Si bien su bajo coste, robustez y reciclabilidad, la hacen la solución estándar para las baterías auxiliares. Además, bajan sus prestaciones cuando se demanda una elevada intensidad o potencia (efecto Peukert) (Ogura & Kolhe, 2017).

- **Batería de níquel-cadmio (Ni-Cd):** Años más tarde del descubrimiento de la batería de plomo-ácido, se introdujo este tipo. Tiene claras mejoras respecto a las de plomo-ácido si bien posee efecto memoria, que es la limitación de la capacidad de la batería con los ciclos de carga/ descarga incompletos (Putois, 1995). Tiene la desventaja de emplear cadmio, un metal pesado con alta toxicidad. Por ello su uso en movilidad eléctrica se ha restringido desde el año 2005. Sigue permitiéndose su uso en otras áreas de uso crítico, dada su gran fiabilidad y robustez. Los primeros teléfonos móviles y vehículos híbridos comercializados a finales de los 90 (Toyota Prius) emplearon esta tecnología (Putois, 1995).

- **Batería de níquel hidruro metálico (Ni-MH):** comenzó a comercializarse en Japón en el año 1990. Está formada por un electrodo positivo de hidróxido de níquel, por un electrodo negativo de hidruro de metal y por láminas de nailon con función de separar ambos componentes. Las baterías de iones de litio son consideradas el competidor principal ya que tienen mejor densidad energética que estas y un efecto de memoria mínimo en comparación con las de níquel hidruro metálico como se puede observar en la imagen 8. Además, las baterías de Ni-MH tienen dos veces menos energía específica que



las de iones de litio y generan mucho calor durante la carga y la descarga como se muestra en la imagen 9. Otra desventaja es que pierde el 20% de su capacidad las primeras veinticuatro horas y desde el primer mes, cada mes, pierde un 10% haciéndola una batería con una autodescarga muy elevada. Si se modifican los materiales del hidruro se puede reducir la descarga, pero también aparece la desventaja de que se produce una disminución mayor de la energía específica. Estas baterías desplazaron a las de NiCd en las aplicaciones de electrónica de consumo y vehículos híbridos. (Ogura & Kolhe, 2017).

- **Batería de iones de litio (Li-ion):** este tipo de batería comenzó su desarrollo sobre 1970 cuando M. Stanley Whittingham descubrió el concepto de intercalación de iones en los electrodos y creó la primera batería recargable de iones de litio pero usando materiales poco prácticos para los electrodos. Años más tarde, en 1979 el Dr. Goodenough demostró que era posible usar óxido de litio-cobalto como el cátodo de una batería que intercalase iones de litio consiguiendo una alta densidad de energía almacenada. Después, el Dr. Yazami estudió los compuestos de grafito en los que el litio podía ser intercalado dando una alternativa al electrodo negativo de metal de litio. Más adelante, en 1985 Dr. Yoshimo creó la primera batería de iones de litio recargable viable comercialmente, usando un ánodo de carbono y un cátodo de óxido de litio-cobalto (LCO), e introduciendo componentes básicos de protección, como el CID (“current interrupt device”) y la resistencia PTC (“positive temperatura coefficient”), que limitan la corriente en caso de sobre presión o sobre temperatura. Al eliminar el litio metálico, mejoró la seguridad de la batería y el precio dando como resultado a la primera batería de iones de litio segura comercializándose por Sony desde 1991 (Q. Wang, Mao, et al., 2019). Esta familia de baterías, con diversos componentes activos en los electrodos, es el más utilizado, ya que el litio tiene mayor potencial electroquímico y como se

representa en las siguientes imágenes 8 y 9, proporciona la mayor densidad energética de todos los tipos de baterías existentes en el mercado actual. Además, estas baterías tienen baja autodescarga, tienen capacidades de carga rápida y son muy longevas (Ogura & Kolhe, 2017), (Nishi, 2001), (Tarascon & Armand, 2001).

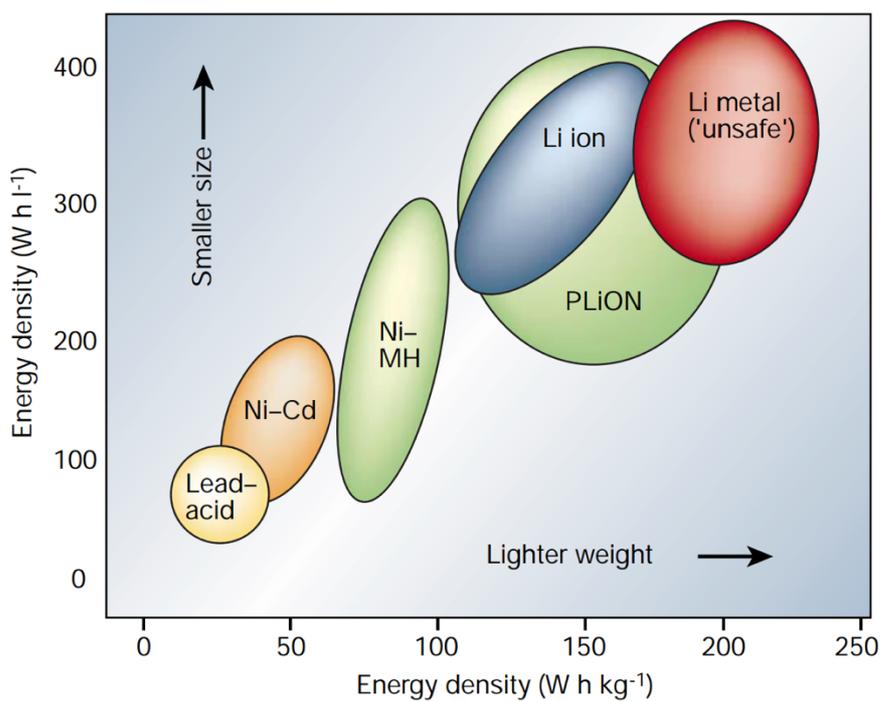


Ilustración 8. Comparación entre la densidad energética y la energía específica de los distintos tipos de baterías (Tarascon & Armand, 2001)

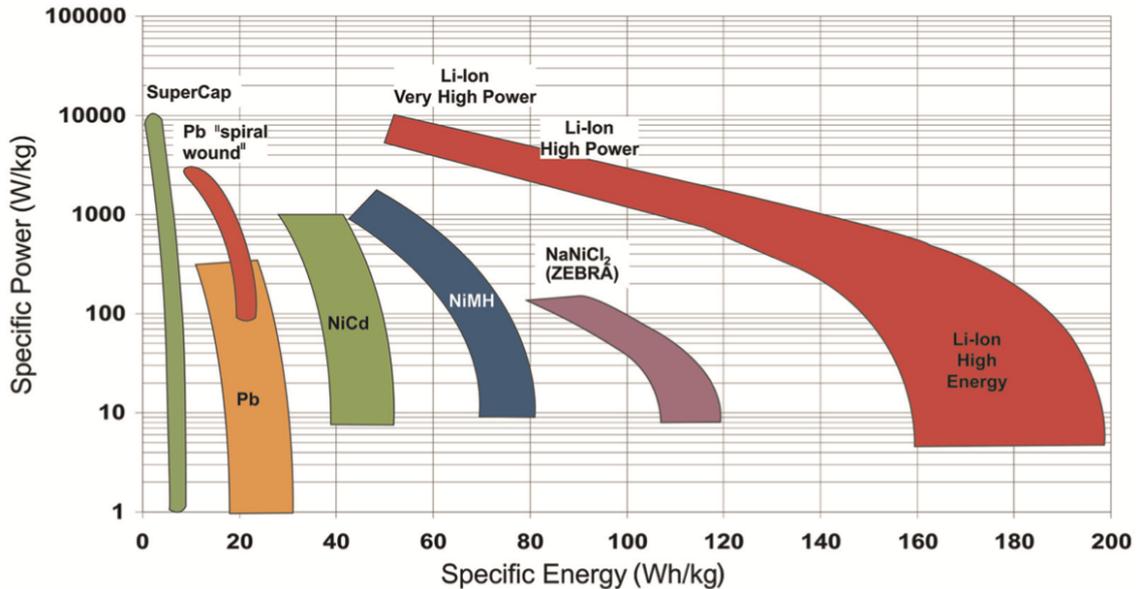


Ilustración 9. Comparación entre la potencia específica y la energía específica de los distintos tipos de baterías (Ragone, 1968)

- Supercondensador: estos almacenan energía con la separación de la carga y no a través de la transformación química del material del electrodo como las baterías. Ofrecen menor densidad energética que las baterías, pero pueden entregar una gran cantidad de potencia. Por este motivo, tienen más interés en el uso en vehículos híbridos, combinados con otra fuente de energía con alta densidad energética.

2.2.1. LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO

Las baterías de iones de litio dominan el mercado actual en cuanto a tecnología en el sector en auge de vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos portátiles por las características que se han mencionado anteriormente y son un componente indispensable para la sostenibilidad energética (Zubi et al., 2018).



En la siguiente imagen 10 se observan los cuatro componentes principales de la celda de la batería de iones de litio, el ánodo, el cátodo, el separador y el electrolito. Se puede observar cómo los iones de litio se mueven del cátodo al ánodo durante la carga y del ánodo al cátodo durante la descarga a través del electrolito. En la batería de iones de litio el litio se mueve dentro y fuera de los electrodos en un proceso llamado intercalación. El proceso de intercalación consiste en la introducción y salida del ion de litio de la estructura cristalina de los electrodos. El material más utilizado en el ánodo es el grafito. En cuanto al material del cátodo, dependiendo del uso la batería tendrá unas propiedades u otras. Se suele emplear el óxido de cobalto de litio (LCO), el óxido de manganeso de litio (LMO), el fosfato de hierro de litio (LFP), el óxido de aluminio de níquel-cobalto de litio (NCA) o el óxido de cobalto de níquel-manganeso de litio (NMC). El separador es el componente que separa al ánodo y al cátodo evitando el contacto eléctrico directo entre ambos y es permeable para los iones de litio. Suelen utilizarse materiales como el polietileno o el polipropileno. Por otra parte, el electrolito es una mezcla de sal de litio y disolventes orgánicos muy importantes para aumentar la movilidad de los iones de litio y mejorar el rendimiento de la batería. Las sales de litio que se suelen emplear son el hexafluorofosfato de litio (LiPF_6), el perclorato de litio (LiClO_4) o el hexafluoruro de litio arseniato (LiAsF_6) y los disolventes orgánicos utilizados comúnmente son el etil metil carbonato (EMC), el dimetil carbonato, el carbonato de dietilo, el carbonato de propileno o el carbonato de etileno. El espacio poroso del separador y de los electrodos se rellena con este electrolito líquido. Son componentes volátiles e inflamables por lo que cuando se produce la combustión tienen a generar HF convirtiéndolos en un componente crítico para la seguridad (Zubi et al., 2018), (Q. Wang, Mao, et al., 2019).

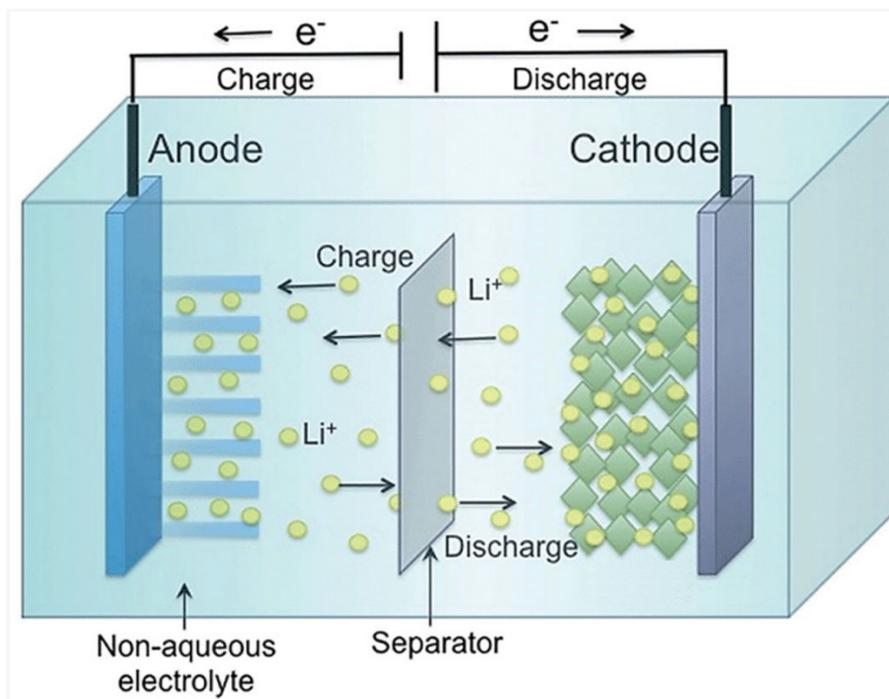


Ilustración 10. Funcionamiento de la batería de iones de litio (Ghiji et al., 2020)

Existen diferentes químicas de baterías de iones de litio que dependen del material empleado en el cátodo como se ha comentado anteriormente:

- Batería de LCO: batería con cátodo de LiCoO_2 y ánodo de grafito C_6 y energía específica alta de 150 a 190 WH/kg además de la madurez tecnológica. Tiene una durabilidad de 500 a 1000 ciclos. La desventaja principal es que no son muy seguras por la baja estabilidad térmica del óxido de cobalto. Es la más empleada, especialmente en dispositivos electrónicos portátiles (Zubi et al., 2018).

- Batería de LMO: el cátodo es de LiMn_2O_4 y gracias a su estructura facilita el flujo de los iones en el electrodo resultando en una resistencia interna baja y una potencia específica alta. El ánodo se compone o de grafito o de LTO.



Este tipo de química tiene un ciclo de vida más largo que las anteriores de LCO siendo de 1000 a 1500 ciclos, pero su energía específica es más baja, de 100 a 140 Wh/kg. Sin embargo, son más seguras porque el óxido de manganeso tiene una estabilidad térmica más alta. Utilizada generalmente en dispositivos médicos, bicicletas eléctricas y herramientas eléctricas (Zubi et al., 2018).

- **Batería de LFP:** son las más usadas junto a las de LCO gracias a su durabilidad, seguridad y materiales. El cátodo es de LiFePO_4 y el ánodo suele ser de grafito. Su ciclo de vida es de 2000 ciclos. La desventaja principal es la baja energía específica de 90 a 140 Wh/kg (Zubi et al., 2018). Este tipo de química ha comenzado a utilizarse recientemente por Tesla en sus vehículos producidos este año para evitar los problemas de suministro de níquel y cobalto que se han generado durante los últimos años (Lambert, 2022).

- **Batería de NCA:** el cátodo es de LiNiCoAlO_2 y el ánodo de grafito. Son el tipo de química con mayor energía específica entorno 200 a 250 Wh/kg y con una alta potencia específica. Tienen durabilidad de 1000 a 1500 ciclos. Este tipo, también es usada por Tesla en sus vehículos eléctricos (Zubi et al., 2018).

- **Batería de NMC:** compuestas por un cátodo de LiNiMnCoO_2 y un ánodo de grafito tienen menor densidad energética que las de NMC, sobre 140 a 200 Wh/kg pero presentan un ciclo de vida más largo de 1000 a 2000 ciclos. Si se aumenta la cantidad de níquel, aumenta la energía específica mientras que si aumenta el manganeso aumenta la potencia específica. Se emplea principalmente en vehículos híbridos eléctricos enchufables (PHEV) y en vehículos eléctricos (EV) además de en herramientas eléctricas, dispositivos médicos y dispositivos electrónicos portátiles (Zubi et al., 2018).

La siguiente tabla de la imagen 11 muestra el porcentaje de los componentes que se encuentran en cada tipo de química de las baterías anteriormente nombradas.

	NMC(111)	NMC(622)	NMC(811)	LCO	NCA	LMO	LFP
Cell BOM							
Active cathode material	34.7%	32.4%	31.1%	35.3%	30.6%	40.8%	32.7%
Graphite	19.4%	21.0%	20.6%	18.5%	22.1%	14.1%	16.8%
Carbon black	2.3%	2.2%	1.7%	2.4%	2.1%	2.7%	2.2%
Binder: PVDF	3.0%	2.9%	3.6%	3.0%	2.9%	3.0%	2.7%
Copper	15.7%	16.1%	15.7%	16.1%	16.7%	15.0%	13.9%
Aluminum	8.2%	8.4%	8.2%	8.1%	8.6%	7.8%	7.5%
Electrolyte: LiPF6	2.2%	2.2%	2.6%	2.2%	2.3%	2.2%	3.4%
Electrolyte: EC	6.2%	6.3%	7.2%	6.0%	6.3%	6.1%	9.4%
Electrolyte: DMC	6.2%	6.3%	7.2%	6.0%	6.3%	6.1%	9.4%
Plastic: PP	1.5%	1.5%	1.5%	1.8%	1.6%	1.5%	1.3%
Plastic: PE	0.3%	0.4%	0.3%	0.3%	0.4%	0.3%	0.3%
Plastic: PET	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
Cell mass (kg)	0.856	0.772	0.803	0.866	0.750	1.045	1.054

Ilustración 11. Porcentaje de componentes en las diferentes químicas de las baterías de iones de litio (Dai et al., 2019)

3. PELIGROS, CAUSAS Y RIESGOS PRINCIPALES DE LA BATERÍA ELÉCTRICA

Las baterías eléctricas de iones de litio son un tipo de batería con la densidad de energía más alta de todas las baterías eléctricas que se pueden encontrar en el mercado, principalmente por el voltaje de más de cuatro voltios (4V) de las celdas que la componen. Estas baterías están compuestas por disolventes y plásticos inflamables que junto a la densidad energía-masa de $1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ha causado graves incendios en las distintas etapas del ciclo de vida de la batería destacando la fabricación, el uso y el final



de vida de la batería (Kantharaj & Marconnet, 2019). Por la evidencia de los incendios de batería es sabido que se originan gases muy tóxicos, además de la dificultad de mitigar el fuego y los riesgos de reignición que pueden afectar a los seres humanos presentes. A continuación, se entrará más en detalle en todos estos aspectos.

3.1 PELIGROS DE LA BATERÍA ELÉCTRICA

En el caso de fuego, existe peligro para los seres vivos, los equipos y el medioambiente. Un peligro es toda fuente o situación que pueda causar daños a las personas, a equipos, o al medioambiente (ECOSEG Consultores Ambientales, 2016).

Además de que existe la posibilidad de que haya peligros en caso de que la batería esté fabricada correctamente, existen peligros si hay defectos de fabricación o de diseño de la batería y en ambos casos aplicables a todas las escalas en el ciclo de vida de la batería.

Los principales peligros a los que se enfrentan los usuarios pueden pertenecer a las siguientes categorías (Ashtiani & Llc, 2008):

- Peligros químicos: una batería de ion de litio ardiendo emite gases tóxicos e inflamables, el principal de ellos el fluoruro de hidrógeno (HF) por la reacción del LiPF_6 con el agua ya que el LiPF_6 no es estable en la hidrólisis. Además del HF existen otros productos inflamables y combustibles como el CO, el CO_2 y el H_2 entre otros (Ribièrè et al., 2012).
- Peligros térmicos: en estos tipos se encuentran aquellos peligros como el peligro de fuego, el peligro de explosión, etc. Se pueden llevar a cabo de manera externa o interna (Ashtiani & Llc, 2008).



- Peligros eléctricos: forman parte de ellos los cortocircuitos y las sobrecargas como peligros producidos externamente, y los cortocircuitos suaves como los peligros que se activan de forma interna (Ashtiani & Llc, 2008). El peligro mayor es el shock por contacto o arco eléctrico.

- Peligros mecánicos: son aquellos como el peligro de aplastamiento, de caída, de intrusión en las celdas, etc. (Ashtiani & Llc, 2008).

- Peligros del sistema: pertenecen a esta categoría los peligros que se originan del sistema externo al que pertenece la batería como el fallo del chasis o la pérdida de la continuidad de la línea de alta tensión (Ashtiani & Llc, 2008).

Entre las fuentes principales causantes de los peligros se encuentran el calentamiento externo, el fuego externo, el aplastamiento mecánico o la deformación o la penetración, el cortocircuito de una celda externa o interna, la sobrecarga o sobredescarga, un fallo en el BMS (Battery Management System) y una sección mecánica o deformación o penetración. Posteriormente se clasificarán en el siguiente apartado 3.2. Estas fuentes pueden producir los siguientes peligros con sus respectivas consecuencias. Se puede producir la hinchazón sin fuga de gases que puede producir una sobrepresión en la celda que aumente el riesgo de incendio y produzca una expansión volumétrica. Por otra parte, se pueden liberar gases o ventilación, entre estos; la emisión de gases tóxicos, la liberación de ácido o gas corrosivo y la ignición de gas acumulado que pueden provocar una toxicidad agua. Otro de los peligros es la fuga de electrolitos que causa un mayor riesgo de incendio por los vapores inflamables y gran toxicidad por los productos de la combustión. Por otra parte, también existe el peligro de alta presión en la celda con la ruptura de la caja de la celda o la explosión de la caja



de la celda que propagan el material combustible y aumenta el riesgo de incendio además de aumentar el peligro de proyectiles balísticos para personas, vehículos, etc. Las altas temperaturas también son un peligro por las quemaduras que pueden causar a las personas y porque pueden actuar como fuente de ignición. También cabe destacar el peligro de ignición de gas acumulado pues provoca daños potencialmente graves a personas y edificios. Otro de los peligros más importantes es el fuego, tanto en la celda de la batería como en el material del paquete de baterías, que causa una liberación de calor y es la fuente de propagación del fuego a otras estructuras adyacentes. Por último, los peligros de la tensión eléctrica que pueden causar desde una pequeña quemadura hasta una lesión letal (Larsson & Mellander, 2017). A continuación, se adjuntan las tablas 1 y 2, donde se pueden identificar los peligros principales de las baterías de iones de litio enumerados junto a sus fuentes, todos los peligros pueden originarse por cualquier fuente de la tabla; y las consecuencias de cada peligro.

Peligro	Fuente
1. Hinchazón sin fuga de gases 2. Liberación de gas o ventilación 2.1. Emisiones de gases tóxicos 2.2. Ácido o gas corrosivo 2.3. Ignición de gas acumulado (1) 3. Fuga de electrolitos 4. Alta presión de la celda 4.1. Ruptura de la caja de la celda 4.2. Explosión de la caja de la celda 5. Altas temperaturas 6. Ignición de gas acumulado (2) 7. Fuego (3) 7.1 Fuego en la celda de la batería 7.2 Fuego en el material del paquete de baterías	Calentamiento externo
	Fuego externo
	Aplastamiento mecánico/ deformación/ penetración
	Cortocircuito, celda externa
	Cortocircuito, celda interna
	Sobrecarga
	Sobredescarga



8. Peligros de la tensión eléctrica	Fallo del BMS
	Sección mecánica/ deformación/ penetración

(1) Ignición de gases ventilados y acumulados en la batería a una temperatura relativamente baja sin fuga térmica, pueden generar una mezcla de gases inflamables y en caso de ignición un aumento de la presión

(2) Ignición de gases ventilados y acumulados en la batería, en caso de fuga térmica tienen su propia fuente de ignición, como la temperatura de la celda mayor a la temperatura de autoignición, en caso de que se encuentre dentro del límite de inflamabilidad.

(3) El fuego de la celda de la batería y/o fuego de material que no sea de la celda como cables, plásticos, etc. Dentro del sistema de la batería

Tabla 1. Peligros de las baterías de iones de litios y fuentes (Larsson & Mellander, 2017)

Peligro	Consecuencias (Peores casos)
1. Hinchazón sin fuga de gases	Se puede producir una sobrepresión en la celda que aumente el riesgo de incendio y produzca una expansión volumétrica
2. Liberación de gas o ventilación 2.1. Emisiones de gases tóxicos 2.2. Ácido o gas corrosivo 2.3. Ignición de gas acumulado (1)	Toxicidad aguda
3. Fuga de electrolitos	Mayor riesgo de incendio (vapores inflamables) y toxicidad (de productos en descomposición)
4. Alta presión de la celda 4.1. Ruptura de la caja de la celda 4.2. Explosión de la caja de la celda	Propagación del material combustible, aumento del riesgo de incendio. Peligro de proyectiles balísticos para personas, vehículos, etc.
5. Altas temperaturas	Peligro de quemadura para personas, fuente de ignición
6. Ignición de gas acumulado (2)	Daños potencialmente graves a personas y edificios (mortales)
7. Fuego (3) 7.1 Fuego en la celda de la batería 7.2 Fuego en el material del paquete de baterías	Liberación de calor. Fuente de fuego para propagar a estructuras adyacentes
8. Peligros de la tensión eléctrica	De una pequeña quemadura a una lesión letal

Tabla 2. Peligros de las baterías de iones de litios y consecuencias (Larsson & Mellander, 2017)

Como el peligro existe, existe el riesgo, pues es la probabilidad de que un peligro se materialice en determinadas condiciones afectando así a las personas, equipos o al



medioambiente (ECOSEG Consultores Ambientales, 2016). Sin embargo, se encuentran pocos datos públicos y en el caso de aplicaciones como en vehículos eléctricos, existe relativamente un número bajo de vehículos de este tipo en la carretera para determinar la probabilidad y la gravedad de cada peligro por lo que no se pueden cuantificar y establecer los riesgos reales.

3.2 TIPOS DE ABUSO

Entre las causas que pueden desencadenar el fuego destacan aquellas que se dan por abusos externos, como el abuso eléctrico, mecánico o térmico, y las que se dan por fallos internos, como el cortocircuito interno por defectos o por el autocalentamiento. Todas estas condiciones se relacionan entre sí. Se pueden clasificar en:

- El abuso mecánico: Estos abusos son provocados normalmente por el aplastamiento o penetración de las celdas de la batería. Causan un cortocircuito produciéndose el abuso eléctrico (Ghiji et al., 2020), (Mcdowall, 2014), (Feng et al., 2018).

- El abuso eléctrico: si la batería eléctrica se sobrecarga o descarga con voltajes fuera del rango especificado por el fabricante se pueden producir formaciones de dendrita en el ánodo además de la formación de revestimientos de litio que lleguen a perforar el separador. Al perforarse el separador se puede producir una fuga térmica a causa de un cortocircuito de los electrodos. El abuso eléctrico da como resultado el calentamiento del sistema, aumentando la temperatura de la celda y produciendo la fuga térmica (Ghiji et al., 2020), (Mcdowall, 2014), (Feng et al., 2018).



- El abuso térmico: se produce el sobrecalentamiento cuando la temperatura interna está entre los 90 y los 120°C. Al producirse, la capa de interfaz de electrolito sólido (SEI) de la batería se descompone de manera exotérmica. En el momento en el que se sobrepasan los 200°C se puede liberar calor si el electrolito de hidrocarburo se descompone. Estos aumentos de temperatura pueden ser dados por la alta temperatura del ambiente, por un cortocircuito interno o por el calentamiento del ciclo de trabajo a través de la fórmula I^2R y por propagación de fuga térmica entre celdas (Ghiji et al., 2020), (Mcdowall, 2014), (Feng et al., 2018).

- El cortocircuito interno: un corto circuito interno se da cuando el separador tiene un defecto, dado por alguno de los abusos establecidos anteriormente o por la fabricación incorrecta, que permite el contacto por el electrolito entre el ánodo y el cátodo. Existen muchas más causas, de hecho, el cortocircuito interno aparece derivado de otros abusos en todos los casos. Provoca que la energía electroquímica guardada en los materiales salga en forma de generación de calor y se produzca la fuga térmica dando lugar al fuego e incluso a una explosión (Ghiji et al., 2020), (Mcdowall, 2014), (Feng et al., 2018).

En las siguientes imágenes 12 y 13 se puede observar cómo cada uno de estos abusos, mecánico, eléctrico y térmico; causados entre otros por accidentes, desastres, defectos de la celda e incluso un sistema de control inadecuado; conducen a la fuga térmica e incluso como todos están relacionados entre sí desde como el abuso mecánico puede conducir a un abuso eléctrico y el eléctrico al abuso térmico originando la fuga térmica. También se puede contemplar como todos los abusos pueden acabar en cortocircuito interno para llegar a la fuga térmica provocando un incendio o explosión (Q. Wang, Mao, et al., 2019).

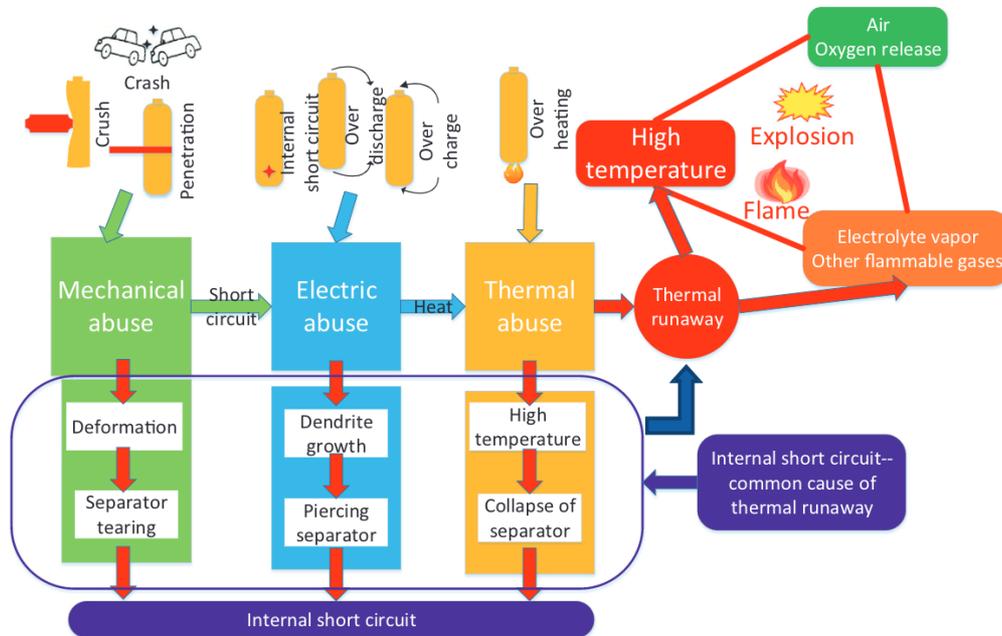


Ilustración 12. Esquema de las causas de accidentes de fuego en una batería de iones de litio (Q. Wang, Mao, et al., 2019)

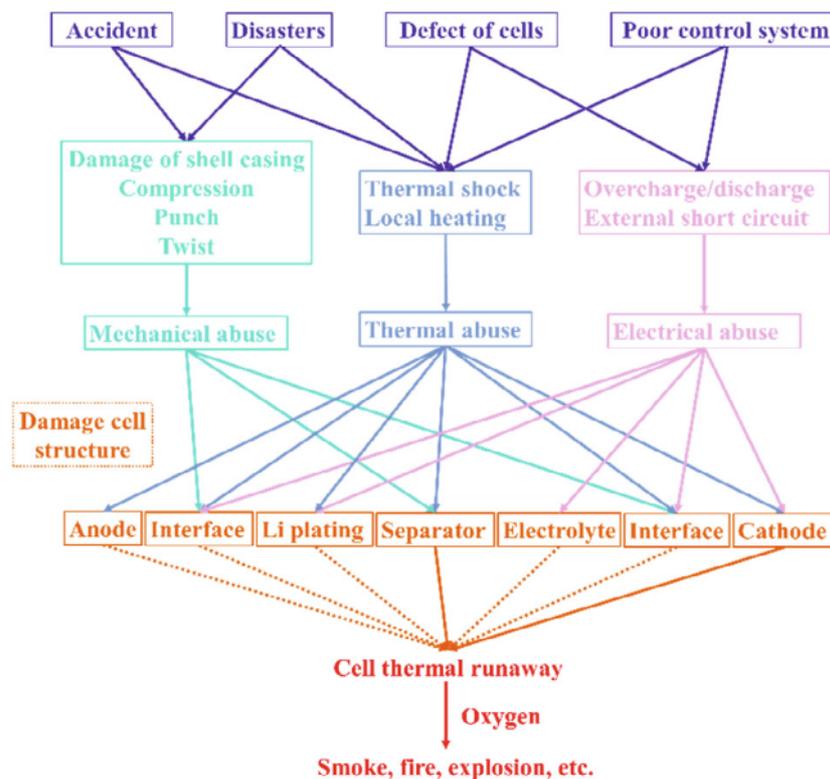


Ilustración 13. Esquema del desarrollo de la fuga térmica desde las causas hasta la producción del incendio, explosión, etc. (Chen et al., 2021)



3.3 MECANISMO DEL INCENDIO EN BATERÍAS ELÉCTRICAS

Los abusos anteriores provocan la fuga térmica que causa los accidentes, entre ellos, un incendio e incluso una explosión al liberarse de forma rápida la energía que almacena una batería por el calentamiento químico y de resistencia que se genera en ella.

Una fuga térmica o escape térmico (thermal runaway) puede consistir en la fuga de electrolitos, un desmontaje rápido e incluso explosión, en la aparición de fuego o la liberación de un gas de forma rápida; implicando, con la combinación de las acciones anteriores, un incremento de la temperatura interna de los elementos de la batería. Con este aumento de temperatura se desintegran los separadores y se tocan elementos que no pueden estar en contacto creando una reacción en cadena que puede desembocar en incluso una explosión (Ogura & Kolhe, 2017), (Łebkowski, n.d.), (Q. Wang, Mao, et al., 2019), (Ribière et al., 2012). La fuga térmica se produce principalmente por reacciones de descomposición exotérmicas y de combustión al comenzar el fuego. El sobrecalentamiento inicial puede comenzar con un cortocircuito externo, con la sobrecarga, con el calentamiento externo, con la sobrecarga o con la deformación de la batería a causa de fuerzas externas.

Para explicar el desarrollo del incendio o explosión se introducirán los conceptos del triángulo del fuego y del tetraedro del fuego para establecer cómo actúan en términos de las baterías eléctricas.

3.3.1 EL TRIÁNGULO DE FUEGO Y EL TETRAEDRO DE FUEGO

El triángulo de fuego se compone de tres componentes principales que se muestran en la imagen 14: comburente, combustible y calor (energía de activación). Un

comburente como es el oxígeno presente en los materiales del cátodo, un combustible como las celdas de la batería, el separador, el material del ánodo o el electrolito; y una energía de activación como una de las causas de abuso mencionadas anteriormente que proporcionan calor externo o interno a la batería. Es necesario que estén presentes los tres lados del triángulo para que el combustible comience a arder y se produzca el fuego (Lanchas, n.d.) (Nestares-Pleguezuelo et al., 2015).



Ilustración 14. Triángulo de fuego (Lanchas, n.d.)

También es necesaria la reacción en cadena para que el fuego se mantenga en el tiempo. Esta reacción en cadena desprende calor que alimenta al combustible para seguir con el fuego de forma continua. Al incluir este componente junto a los tres anteriores se forma el tetraedro de fuego, imagen 15, teniendo el mismo principio que el triángulo de fuego, si eliminamos alguno de los lados de la figura el fuego se apaga. (Lanchas, n.d.) (Nestares-Pleguezuelo et al., 2015).

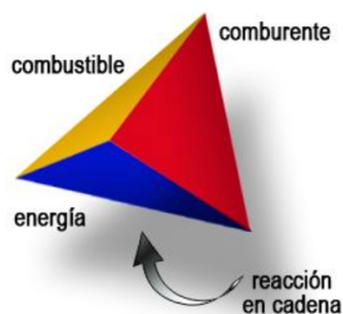


Ilustración 15. Tetraedro de fuego (Face2face Engineering Solutions, 2014)



Para que se produzca la combustión en una batería de iones de litio se necesitan tres componentes indispensables como se ha podido observar en el triángulo de fuego, el oxígeno, una fuente de ignición y un combustible inflamable. El combustible inflamable lo facilita el gas generado por el electrolito en descomposición y el disolvente orgánico. Por otra parte, el oxígeno que libera el cátodo en descomposición a veces no es suficiente por lo que la combustión siempre ocurre después de la ventilación de los gases inflamables, fuera de la celda. Esta combustión es impredecible pues la fuente de ignición se genera de forma aleatoria, puede ser el resultado de un arco generado por un cortocircuito externo o de la fricción a alta velocidad entre el flujo de salida y la válvula de ventilación, durante el proceso de fuga térmica.

3.3.2. MECANISMO DEL INCENDIO POR FUGA TÉRMICA

Con los conceptos del triángulo de fuego y del tetraedro de fuego puede explicarse el mecanismo de la fuga térmica o “thermal runaway”. Este mecanismo se puede interpretar como la cadena de reacciones que se observa en la imagen 16. Con el aumento de la temperatura por las condiciones de abuso, se llevan a cabo reacciones químicas que ocurren escaladamente creando una cadena de reacciones. El bucle que se forma entre el calor, la temperatura y la reacción (Heat-Temperature-Reaction), llamado bucle HTR, es la causa principal de las reacciones en cadena de forma que el calor generado por una condición de abuso aumenta la temperatura de la celda iniciando reacciones secundarias. Además, las reacciones secundarias generan más calor creando otro bucle HTR y se alcanzan temperaturas más elevadas hasta que la celda, como se observa en la imagen, sufre una “thermal runaway” o fuga térmica. Se muestra como secuencialmente durante el proceso de aumento de temperatura la interfaz de electrolito sólido se descompone, reacciona el ánodo con el electrolito, se derrite la base del separador, se descompone el cátodo de NCM y el electrolito hasta que la capa cerámica del separador se rompe por completo creando un cortocircuito interno que

libera energía eléctrica de la celda y puede hacer que el electrolito se queme llevando a la fuga térmica (Feng et al., 2018).

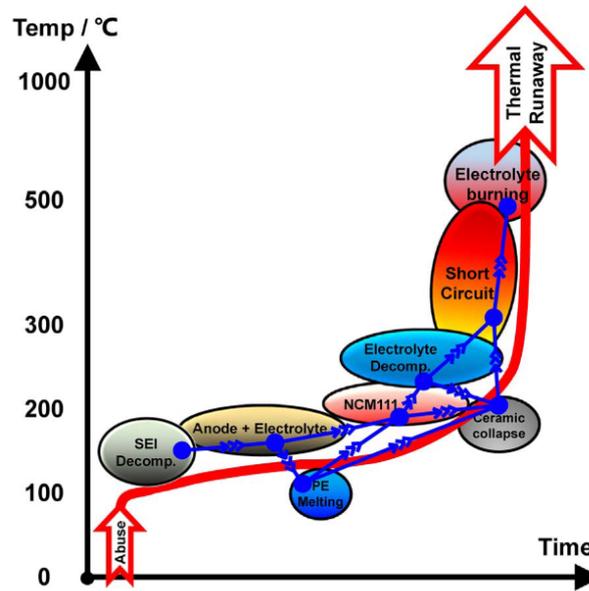


Ilustración 16. Mecanismo de reacciones en cadena durante la fuga térmica o "thermal runaway" de una batería de iones de litio con electrodos de grafito o de NCM y un separador cerámico (Feng et al., 2018)

A través de la siguiente imagen del diagrama de energía liberada de una batería de iones de litio por Feng et al. se muestra el mecanismo de reacción en cadena durante el proceso de fuga térmica.

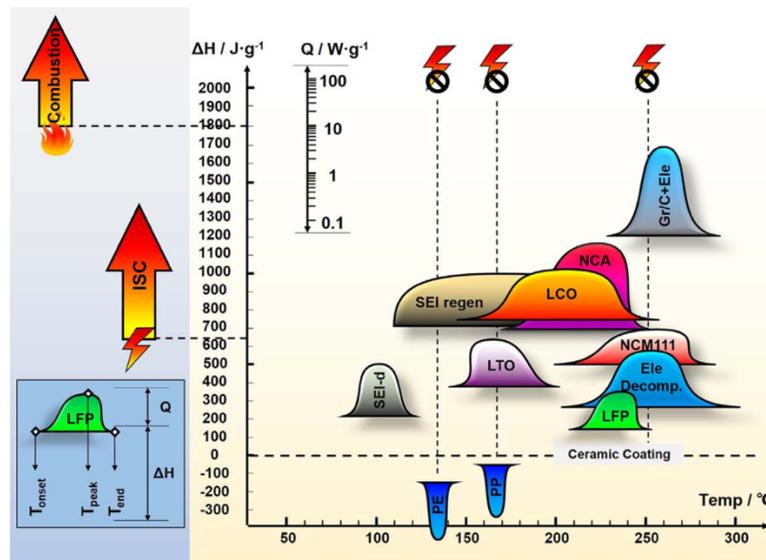


Ilustración 17. Diagrama de energía liberada en la fuga térmica (Feng et al., 2018)

Durante este mecanismo de liberación de energía la descomposición de los materiales del cátodo y del ánodo reaccionan con el electrolito.

En el ánodo, normalmente de grafito, se producen reacciones con el electrolito en tres fases o etapas. La primera fase comienza con la descomposición de la capa de la interfase del electrolito sólido con un pico exotérmico de unos 100°C liberando oxígeno, siendo la primera reacción secundaria del proceso de fuga térmica. Una vez que la interfase de electrolito sólido se ha descompuesto, el litio intercalado en el ánodo de grafito se pone en contacto con el electrolito. Los productos de la reacción entre el litio intercalado y el electrolito son los mismos componentes que los de la interfase del electrolito sólido. La segunda fase tiene una tasa de generación de calor estable y un gran rango de temperaturas hasta llegar a la tercera fase, en ella, por las reacciones que se producen en el ánodo se genera un proceso exotérmico largo y controlado. En la



tercera fase la reacción equilibrada de descomposición y de regeneración de la interfase de electrolito sólido no se rompe hasta superar los 250°C. Una vez superada esta temperatura la estructura de grafito del ánodo colapsa provocando la descomposición del ánodo. A diferencia del ánodo de grafito, cuando se utiliza un ánodo de LTO este puede absorber el oxígeno que se generó en la primera fase lo que convierte a la celda en más estable cuando las temperaturas son muy altas (Feng et al., 2018), (Diaz et al., 2020).

En el cátodo se producen reacciones exotérmicas cuando la temperatura alcanza la temperatura de descomposición del cátodo. Dependiendo del material que se emplee en el cátodo: LCO, LMO, LFP o NCM, se producirán unos mecanismos de descomposición u otros (Feng et al., 2018), (Diaz et al., 2020).

Por otro lado, electrolito solo también puede descomponerse durante una fuga térmica. La sal conductora que lo forma suele ser Li_6PF y la descomposición de esta sal puede generar reacciones que den sustancias como el HF, el CO_2 y el C_2H_4 . Además, de esta sal también puede salir el producto de descomposición PF_5 que puede reaccionar a su vez con los disolventes de carbonato de etileno o de dimetil carbonato y liberar calor acelerando la descomposición del electrolito. Cuando se descompone el electrolito, se evapora y se generan gases por su descomposición junto a otros componentes por la fuga térmica, la celda se ventila por el aumento de presión interna. Estas sustancias que son ventiladas incluyen pequeñas partículas de electrolito evaporado con gases reactivos como el H_2 y el CO , mezclan de estos tipos de componentes pueden comenzar una combustión (Feng et al., 2018), (Diaz et al., 2020).

Otro mecanismo que puede conducir a la fuga térmica es la fundición del separador. Como este proceso de fundición es endotérmico, la tasa de aumento de la temperatura se ralentiza. Durante la fundición, los agujeros del separador se cierran



imposibilitando el paso de los iones de litio al interior de la celda por lo que el separador deja de funcionar incrementando la resistencia de la celda. Este aumento de la resistencia ayuda a que no se produzca ninguna condición de abuso, pero en el caso en el que la temperatura sea demasiado elevada y si la corriente no fluye dentro de la celda no se puede determinar la eficacia del apagado del separador. Después de que el separador se apague, este se contrae si la temperatura sigue aumentando y una vez que el cátodo y el ánodo entren en contacto se produce un cortocircuito interno. Si el cortocircuito se produce por contracción del separador la generación de calor es tan grande que provoca el colapso del separador muy rápidamente. Si la temperatura de descomposición de los materiales del ánodo o del cátodo es menor que la temperatura de colapso del separador hay una posibilidad de que el cortocircuito interno no se lleve a cabo mediante la fuga térmica por lo que la generación de calor es pequeña (Feng et al., 2018), (Q. Wang, Jiang, et al., 2019), (Diaz et al., 2020).

También existen otras reacciones entre los diferentes componentes de los materiales que forman la batería, como la descomposición del aglutinante de fluoruro de polivinilideno. Sin embargo, no influyen en gran medida al comportamiento de la fuga térmica en la celda de la batería de iones de litios (Feng et al., 2018), (Q. Wang, Jiang, et al., 2019), (Diaz et al., 2020), .

3.4. ESTRATEGIAS GENERALES DE MITIGACIÓN

El fuego se puede propagar si cuando falla una celda, el calor generado, desencadena la fuga térmica de las celdas adyacentes. Los incendios a nivel pack y módulos pueden liberar grandes cantidades de calor y gases tóxicos. Una de las maneras de combatirlo es atacando a las reacciones intermedias que se producen añadiendo aditivos al agua, según se observa en el tetraedro de fuego (Pfrang & Ruiz, 2018). Más adelante, se analizarán los aditivos principales que se añaden para mitigar los incendios.

En la siguiente tabla se pueden identificar las fuentes de los peligros y sus estrategias de mitigación o protección. (Larsson, 2017) (Larsson & Mellander, 2017).

Fuente	Mitigación/estrategia de protección
Calentamiento externo	Si es pequeño, con el BMS por enfriamiento a través del sistema de gestión térmica
Fuego externo	Barreras cortafuegos, extinción de incendios
Aplastamiento mecánico/ deformación/ penetración	Caja de protección para la batería, estructura reforzada para la deformación, colocación estratégica de la batería
Cortocircuito, celda externa	Interruptores como el fusible
Cortocircuito, celda interna	No es posible para la celda, protección de propagación por el sistema
Sobrecarga	BMS, posibles mecanismos de seguridad interna de la celda y relés
Sobredescarga	BMS y relés
Fallo del BMS	Aislamiento eléctrico, técnica de manejo de personal y equipo correcta
Sección mecánica/ deformación/ penetración	

Tabla 3. Fuentes de los peligros de las baterías de iones de litios, mitigaciones y estrategias de protección (Larsson & Mellander, 2017)

A continuación, se muestra la tabla anterior con los peligros y las posibles estrategias de mitigación (Larsson, 2017) (Larsson & Mellander, 2017).

Peligro	Posible mitigación/ estrategia de protección
1. Hinchazón sin fuga de gases	<ul style="list-style-type: none"> - BMS - Detección y quitar o reemplazar la celda

<p>2. Liberación de gas o ventilación</p> <p>2.1. Emisiones de gases tóxicos</p> <p>2.2. Ácido o gas corrosivo</p> <p>2.3. Ignición de gas acumulado (1)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Detección temprana, alertar y evacuar a las personas - Acabar con la propagación limitando el tamaño del problema y la gravedad - Colocación de la batería correcta - Ventilación - Filtros de gas de desintoxicación
<p>3. Fuga de electrolitos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ventilación - Sin fuentes de calor e ignición
<p>4. Alta presión de la celda</p> <p>4.1. Ruptura de la caja de la celda</p> <p>4.2. Explosión de la caja de la celda</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Celdas diseñadas para liberar calor antes de que se alcance la presión interna extrema - Protección de proyectiles balísticos
<p>5. Altas temperaturas</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Enfriamiento por el sistema de gestión térmico si sigue funcionando
<p>6. Ignición de gas acumulado (2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Liberación de la presión en el paquete de baterías - Acabar con la propagación disminuyendo la cantidad de gas - Ventilación - Llama piloto o control de fuego
<p>7. Fuego (3)</p> <p>7.1 Fuego en la celda de la batería</p> <p>7.2 Fuego en el material del paquete de baterías</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Acabar con la propagación - Lucha contra incendios
<p>8. Peligros de la tensión eléctrica</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Aislamiento - Tierra flotante - BMS - Capacitación del personal sobre los peligros eléctricos y los equipos

Tabla 4. Peligros de las baterías de iones de litio, posibilidades de mitigación y estrategias de protección (Larsson & Mellander, 2017)

Posteriormente, se comentará de forma específica sobre estos aspectos de mitigación a todos los niveles, desde la celda hasta el pack, durante las diferentes etapas del ciclo de vida de la batería de iones de litio.

4. SEGURIDAD DURANTE EL CICLO DE VIDA DE LA BATERÍA ELÉCTRICA

La seguridad de las baterías eléctricas ha conseguido ganar atención gracias al aumento y a la popularidad de los vehículos eléctricos. Por este motivo, las reacciones



por fuga de calor acompañadas de sus explosiones e incendios, junto a la diferencia de potencial de la batería, son unas de las principales preocupaciones que han ido creciendo en los usuarios de vehículos eléctricos y aparatos que hacen uso de ellas (Larsson et al., 2013).

Por los desastrosos incidentes y la poca experiencia del usuario a los vehículos eléctricos, puede darse una tendencia negativa y de rechazo hacia los mismos; aunque está demostrado que el calor que se libera en el incendio de un coche de gasolina es igual o no menor que el calor que libera una batería eléctrica (Lecocq et al., 2012b).

El principal foco de la investigación que se ha estado llevando a cabo durante todos estos años ha sido reducir la probabilidad de incendio de las baterías. Gracias a las investigaciones, con ayuda de nuevos mecanismos de seguridad e ingeniería avanzada y al desarrollo de sistemas más tolerantes a los fallos e incluso a prueba de fallos, se han reducido respecto a años anteriores (Doughty & Pesaran, 2012). Para ello, es de extrema importancia considerar la seguridad de las baterías eléctricas a lo largo de toda su cadena de valor por lo que se analizarán los peligros en todas sus fases.

La mayoría de las etapas del ciclo de vida de las baterías de iones de litio se encuentran libres de incidentes. Aun así, existen posibilidades de que se produzcan accidentes perjudiciales en alguna de sus etapas. De este modo es necesario que, durante todo el ciclo de vida de la batería, el personal que las manipule esté cualificado e informado para la labor de la gestión de los riesgos de seguridad.

Actualmente existe una gran brecha entre el conocimiento de los principales aspectos de seguridad y los accidentes de las baterías de iones de litio por lo que surge la necesidad de transmitir a todas las partes interesadas, como las organizaciones gubernamentales, el público general y los servicios de bomberos y rescate entre otros,



los principales problemas de seguridad y las acciones a llevar a cabo. A través de este estudio se presentarán los riesgos de seguridad de las baterías y sus requisitos reglamentarios, así como la prevención, detección, compartimentación y supresión.

La gran parte de los casos de los incidentes anunciados por la prensa fueron causados por nuevas baterías de iones de litio. También cabe destacar los riesgos adicionales y otros problemas de seguridad que desencadenan con el uso de las baterías de iones de litio de segunda mano. Con el crecimiento del uso de estas baterías, y, por lo tanto, el aumento del número de estas, la probabilidad de accidentes peligrosos junto al uso de baterías de segunda mano crecerá. Además, aumentarán también los incidentes en las instalaciones de gestión de residuos de las baterías (Harper et al., 2019), (Fogelman, 2018).

Por otro lado, es importante señalar la ubicación de las baterías de iones de litio pues en una unidad industrial aislada, donde trabajan operarios cualificados y situada lejos de una alta densidad de población, tendrá un riesgo mucho menos a una batería en una unidad doméstica o bloque de apartamentos con personal no cualificado.

Las etapas del ciclo de vida de la batería eléctrica en un vehículo eléctrico se pueden observar en el apartado 1.1.Objeto. Comenzando por la manufacturación del cátodo, siguiendo con la manufacturación de la celda y el módulo, integrando las celdas en los módulos y en packs, haciendo uso del vehículo, continuando con el mantenimiento y reparación y finalizando con el final de vida y sus subetapas. Según estas etapas se clasificarán cada una de las medidas de protección contra incendios junto a sus indicaciones de prevención, detección, compartimentación y supresión a desarrollar en los apartados posteriores.



El objeto del Trabajo de Fin de Grado no es la seguridad y protección contra el fuego en las edificaciones o en los equipos o materiales en las inmediaciones, se centra en la batería y en sus aplicaciones.

4.1. SEGURIDAD A NIVEL DE CELDA

Aunque se le de mayor importancia a los riesgos en el uso de la batería pudiendo desencadenar en una explosión, también hay que tener en cuenta los peligros que se dan en el comienzo del ciclo de vida sin olvidar los peligros en la extracción de la materia prima y en la fabricación y producción de las baterías eléctricas. Pues estos procesos también deben tener una seguridad porque los materiales pueden ser tóxicos.

Hay que destacar la seguridad del personal encargado tanto en la producción como en la extracción del material como puede ser la minería. La minería es una de esas actividades que puede llegar a ser muy peligrosa sobre todo en países en donde la legislación no tiene poder. Aunque la tasa de mortalidad en este sector ha disminuido, todavía es elevada en países donde está ilegalizada la mano de obra y se ignoran los protocolos de seguridad y protección. Esto puede llegar a los principales problemas sanitarios entre otros:

- Peligro químico.
- Inhalación de polvo.
- Estrés térmico.
- Peligro físico.
- Trastornos por ruido y vibración (Donoghue, 2004), (Cho & Lee, 1978).

En el procesado de materiales para la fabricación de celdas es crucial la eficiencia de los materiales en cada uno de los pasos. También hay que tener en cuenta la seguridad en cada uno de estos pasos se emiten químicos muy tóxicos perjudiciales para



los trabajadores. Por otro lado, a la hora de fabricar el electrodo se consumen grandes cantidades de energía eléctrica que puede suponer un peligro para el personal presente en el proceso.

Cuando las celdas están fabricadas, se integran en módulos y posteriormente en packs para formar las baterías. También se debe tener en cuenta la seguridad, pues en estos procesos se necesita llevar a cabo un control de humedad en una habitación seca ya que se requiere energía eléctrica y de ella se derivan peligros para la salud.

La celda es uno de los sistemas que más seguridad requiere porque todos los materiales que la componen, si surge algún fallo, pueden reaccionar entre sí. Por lo tanto, es muy importante delimitar los peligros y riesgos que supone para el usuario.

4.1.1. RIESGO DE INCENDIO EN LA FABRICACIÓN DE CELDAS

Como se ha mencionado anteriormente, todas las etapas de procesado de materiales junto a la fabricación y ensamblaje de celdas en módulos y packs cuentan con riesgos para los trabajadores.

Cuando se procesa el níquel (Ni) y el manganeso (Mn) se pueden producir peligros de exposición con graves efectos para la salud como puede ser el polvo producido a lo largo de la refinación de sulfuros de níquel. Este polvo afecta al sistema respiratorio provocando cáncer en los pulmones y en la nariz (Schaumlöffel, 2012). Además, una exposición repetida a niveles elevados de manganeso durante su minería y refinamiento pueden llevar al daño cerebral provocando problemas neurológicos. En el caso de que se produzca un incendio en estas etapas, las consecuencias podrían ser incluso más graves aumentando el riesgo a esos problemas sanitarios por la mayor exposición a las sustancias mencionadas (Miah et al., 2020).



Otro riesgo de seguridad surge de la síntesis del electrolito. Al usar LiPF_6 que utiliza para su preparación ácido fluorhídrico (HF) como agente de fluoración (J. Liu et al., 2019), supone un riesgo para el personal por ser un compuesto extremadamente tóxico para el sistema respiratorio y para la estructura ósea del cuerpo humano ya que puede causar quemaduras graves con el contacto del gas en la piel. También suponen un riesgo de inflamación los disolventes químicos utilizados como el carbonato de etileno y el carbonato de propileno (Q. Wang, Jiang, et al., 2019).

Una de las condiciones de abuso más comunes que produce la fuga térmica en la celda es el cortocircuito interno (ISC), que puede producirse por contaminantes del proceso de fabricación, siendo la causa principal de los accidentes en las baterías de iones de litio (Ribière et al., 2012). Si en la celda se produce un cortocircuito interno en un área amplia se liberará una alta tasa de energía eléctrica que aumentará la temperatura interna de forma muy rápida y provocará la fuga térmica (Maleki & Howard, 2009). El cortocircuito se puede producir por penetración u otro abuso físico haciendo que los electrodos se toquen entre sí (Lai et al., 2014). También al producirse un abuso eléctrico de este tipo la dendrita de litio puede penetrar el separador puesto que se desarrolla dentro de la celda (Sushko, 2013).

El cortocircuito interno se puede producir por un contaminante de la fabricación que penetre la celda como se ha comentado anteriormente. Dependiendo del material que sea se pueden producir unos riesgos u otros. Si el material es de acero, puede conectar los materiales del electrodo al colector de corriente además de conectar los electrodos entre sí. Como consecuencia de esta acción se produce calor rápidamente y se transfiere desde el punto de penetración a la celda activando las reacciones entre los componentes haciendo que el electrodo y el electrolito salgan de la válvula de seguridad



en un gran chorro de fuego pudiendo causar quemaduras graves al personal cercano a esa celda (Q. Wang, Mao, et al., 2019).

Por todos estos riesgos presentes a la hora de trabajar con celdas, es necesario establecer unas medidas de prevención, de detección, de compartimentación y de supresión. Aunque las medidas de supresión siempre serán las mismas en cada etapa del ciclo de vida de la batería eléctrica.

4.1.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN

Entorno a las medidas de prevención, es indispensable que los trabajadores estén dispuestos de EPIs que los protejan de los posibles riesgos a los que se enfrentan por la manipulación de celdas. Además, se tiene que asegurar que las celdas se encuentren en un entorno con características que no propicien ningún tipo de abuso tanto en la zona de trabajo ni en la de transporte.

Aun así, las celdas disponen de medidas de seguridad que previenen los riesgos anteriormente mencionados. En el interior de la celda pueden añadirse medidas para prevenir o reducir el fenómeno de la fuga térmica modificando la estructura de esta, sus materiales e incluso usando dispositivos de seguridad. A lo largo de los últimos años se han realizado numerosos estudios y trabajos para modificar los materiales del ánodo y los del cátodo además de cambiar la química de los electrolitos haciendo a la batería de iones de litio más segura (Kai Liu et al., 2018).

Si se eligen materiales específicos en el cátodo, se puede determinar su estabilidad térmica y la energía que transmite. La siguiente tabla establece diferentes materiales y a cuántos grados descomponen la interfaz de electrolito sólido (Q. Wang,

Mao, et al., 2019). A mayor temperatura, mayor seguridad de que no se produzca su descomposición.

Material cátodo	Temperatura descomposición SEI (°C)
LCO	130
NMC	240
LO	270
Cátodos de LFP	310

Tabla 5. Material del cátodo y temperatura a la que descompone la interfaz de electrolito sólido (Q. Wang, Mao, et al., 2019)

Otra de las modificaciones a incorporar en la celda para prevenir los riesgos es modificar la estabilidad térmica del cátodo cubriéndolo con otros materiales como: Al_2O_3 , Li_xCoO_2 , $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_2$, MgO y TiO_2 además de sustituir materiales como el aluminio (Al) y el níquel (Ni) por cobalto (Co) (Shi et al., 2018), (Yunjian et al., 2019), (Kannan & Manthiram, 2002), (T. Love et al., 2010).

También se puede modificar sustituyendo por silicón (Boukamp et al., 1981), como el LTO, el grafito ya que se ha demostrado que este material es más seguro gracias a pruebas de fugas térmicas (Yao et al., 2005).

Por último, respecto a los componentes de las celdas, en el electrolito; se propone reducir el solvente aumentando las cantidades de sales de litio pues los solventes carbonatados del electrolito son una de las razones por las que se produce fuego cuando hay una fuga térmica (Z. Zeng et al., 2015). Aun así, este cambio afecta a la estabilidad térmica del grafito del cátodo. Por otra parte, al añadir aditivos al



electrolito mejora su seguridad, también sustituyéndolo por un electrolito de polímero sólido o por líquidos iónicos (Wakihara et al., 2012).

Las celdas también están dotadas de dispositivos internos para prevenir o limitar el impacto al producirse un fallo. Uno de los más importantes es la ventilación de seguridad. Esta ventilación tiene la función de liberar la presión interna que se genera de más y puede causar un incremento de la temperatura interna. Si la temperatura está por encima del rango de rotura del separador se puede producir una fuga térmica y para evitar que los gases inflamables de los componentes se acumulen dentro de la batería esta ventilación de seguridad los va expulsando poco a poco reduciendo la presión interna. Al expulsarse poco a poco los gases internos de la batería se libera también el calor al medioambiente evitando que se genere una explosión incontrolable. También la reducción de la presión reduce el riesgo de que se lleve a cabo un cortocircuito interno. Por este mismo motivo, el IEEE establece que todas las baterías necesitan de este sistema de ventilación (Kong et al., 2018). Dependiendo del tipo de batería, el sistema de ventilación de seguridad tendrá una estructura u otra. A continuación, se puede observar en la imagen 18 la estructura del mecanismo de ventilación de seguridad de una batería 18650 y el recorrido que siguen los gases desde los electrodos al disco de ventilación a través de dos agujeros y finalmente al exterior.

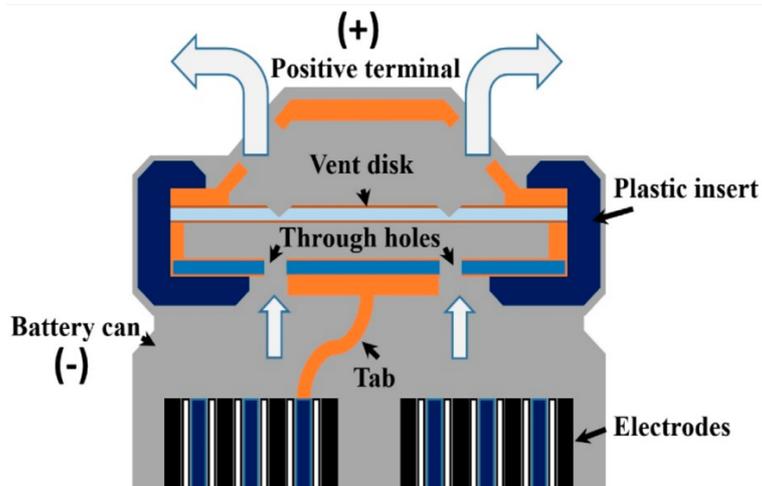


Ilustración 18. Estructura del sistema de ventilación de seguridad de una batería 18650 (Kong et al., 2018)

A pesar de la seguridad que brinda este sistema frente al fuego y a la explosión, como se ha mencionado en el apartado anterior, puede llegar a ser peligroso por el escape de gases inflamables y tóxicos al exterior de la batería poniendo en riesgo a los usuarios. Este es un tema que debe ser estudiado en profundidad para buscar una solución como por ejemplo, la absorción de estos gases a través de un sistema adicional.

4.1.3. MEDIDAS DE DETECCIÓN. SISTEMAS DE DETECCIÓN

Según la “Guía de soluciones integradas de protección contra incendios para baterías de iones de litio” de Euralam, existen cinco tipos de métodos o sistemas de detección cuando se va a producir una fuga térmica y se desarrolla a lo largo de sus etapas: de detección de gases y partículas, de detección de calor, de detección de humo, de detección de llamas y de detección de humo e incendios por vídeo llamado VFD (*TECNIFUEGO Presenta La Nueva Guía de Protección Contra Incendios Para Baterías de Iones de Litio de Euralarm | Tecnifuego, 2022*).



- Los sistemas de detección de gases y partículas son sistemas que perciben en el aire gases o vapores, incluso a niveles muy bajos, como el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y dihidrógeno (H_2) tóxicos e inflamables entre otros para avisar al usuario de la presencia de estos y del posible comienzo de la fuga térmica. Se deben situar de forma estratégica para poder detectar cuanto antes los componentes.

- Entre los sistemas de detección de calor se pueden encontrar tres tipos diferentes: los detectores de tipo puntual, los detectores térmicos lineales y las cámaras de infrarrojos (IR). Este tipo de sistemas no son los más adecuados para una detección inmediata ya que una vez se ha detectado el calor la fuga térmica ha dado comienzo. Los detectores de tipo puntual pueden ser de temperatura fija, establecen una temperatura máxima y si se supera avisa al usuario; y de tasa de incremento de la temperatura, donde se establece un aumento de temperatura entre el tiempo determinado para que cuando se llegue a ese parámetro avise de la misma manera. Por otro lado, los detectores térmicos lineales tienen un sensor y una unidad de evaluación que permiten al usuario ver los valores de media. Por último, las cámaras de infrarrojos, termográficas o de imagen térmica crean imágenes donde se muestra la temperatura a través de la radiación infrarroja que emiten los objetos. Se debe tener en cuenta que cuando se integran celdas en packs hay momentos en los que hay contacto visual directo con las celdas y por lo tanto ahí no funcionan los métodos termográficos.

- Los sistemas de detección de humo también se dividen en tres tipos, puntuales y multisensores, lineales de haz y por aspiración. Los detectores de humo puntuales y multisensores, los más usados en los sistemas de seguridad contra incendios, se usan en localizaciones donde se creen que se producen



incendios donde no hay falsas alarmas o que generen humo. Los que detectan humo por reflexión de la luz son los más usados porque detectan la luz entre el humo y de esta forma pueden detectar partículas de humo muy pequeñas. Los detectores de humo lineales de haz miden como se atenúa la luz por el humo y se usan en localizaciones donde no se puede utilizar los detectores del tipo anterior entre ellos habitaciones o naves muy grandes y edificios históricos. Finalmente, los detectores de humo por aspiración o por muestreo de aire o ASD aspiran el aire de la zona para analizarlo. Estos últimos son la manera más rápida de detectar el humo.

- Los sistemas de detección de llamas se usan en ubicaciones donde los incendios se producen de forma muy rápida y se deben controlar áreas muy amplias que están abiertas. Funcionan convirtiendo en una señal eléctrica la radiación electromagnética de las llamas con infrarrojos.

- El último sistema de detección de humo e incendios por vídeo (VFD) es un sistema de vídeos analizados de forma inteligente para áreas abiertas de mucha extensión y entornos muy difíciles de controlar. Son los dispositivos de detección más rápidos en el mercado actual (Euralarm, 2022).

4.1.4. MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN. BARRERAS

El separador es la principal medida de compartimentación de las celdas y se posiciona entre el electrodo negativo y el positivo para evitar el contacto directo entre los dos y servir de camino a los iones de litio. Puede ser de diferentes materiales como polímero, gel e incluso papel, pero siempre siendo materiales que no lleven a cabo un cortocircuito interno, es decir, que sean aislantes y además puedan dejar pasar al electrolito líquido siendo materiales porosos. El más usado entre los fabricantes de las



baterías de iones de litio es el polímero por la seguridad que proporciona a la batería, ya que si la temperatura aumenta hasta el punto de fusión del separador se bloquearán los poros bloqueando el paso del electrodo positivo al negativo y viceversa. Como, aunque el separador se apague las reacciones electroquímicas no paran de forma inmediata, la batería no se enfría. Si la batería no se enfría y el separador se encoje, los electrodos positivo y negativo se tocarán provocando un cortocircuito interno. Por ello, es importante que se busquen otras soluciones al separador de polímero como el composite híbrido de cerámica y polímero por su posibilidad de reducción de tamaño (Venugopal et al., 1999), (P. Arora & Zhang, 2004).

4.1.5. MEDIDAS DE SUPRESIÓN

En cuanto a las medidas de supresión del fuego en las celdas de las baterías de iones de litio no están claras, pues uno de los problemas principales es el difícil acceso a las celdas por el diseño compacto de la batería. El fuego debe ser tratado desde el origen por lo que sería conveniente el diseño de un sistema que pudiese sustraer las celdas en el caso en el que se diera un incendio.

Sin embargo, las medidas de supresión de incendios de la batería se encontrarán en el apartado 4.3.5. de seguridad en el uso de la batería pues las medidas de supresión en todas las etapas del ciclo de vida de la batería son las mismas.

4.2. SEGURIDAD EN LA INTEGRACIÓN DE CELDAS EN MÓDULOS, PACKS Y SISTEMAS

Con el aumento del uso del vehículo eléctrico en el mercado, largas cantidades de packs de baterías necesitan ser transportadas a lo largo de toda su cadena de valor, desde las celdas dispuestas en módulos y juntados en packs hasta la formación de una batería para la incorporación en sistemas como los vehículos eléctricos.



En todo punto de la cadena de valor la seguridad debe ser considerada especialmente cuando muchas celdas son juntadas para el ensamblaje de una batería por el riesgo que suponen para los seres humanos. Uno de estos ejemplos es la prohibición del transporte de celdas en aviones de pasajeros desde abril de 2016. También se exige que las celdas no superen el 30% de su estado de carga para transportarlas en otros medios de transporte (Huo et al., 2017).

Como existen una gran variedad de baterías y de componentes diferentes, es muy difícil establecer normas de seguridad pues cada batería tiene características de seguridad muy diversas.

Por ello, las siguientes medidas de prevención, detección, compartimentación y supresión deben llevarse a cabo. Cabe destacar que las medidas de supresión en caso de incendio en todas las etapas siempre son las mismas salvo a diferencia de que existan sistemas para detener el fuego específicos en ese punto del ciclo de vida.

4.2.1. RIESGO DE INCENDIO EN LA INTEGRACIÓN DE PAQUETES EN SISTEMAS

Como se ha mencionado anteriormente, la estabilidad térmica del paquete de baterías depende de la capacidad que tengan para disipar el calor que se produce en el interior. Si el paquete de baterías es grande y tiene un peso elevado, una determinada cantidad de calor le afectará menos que si el paquete es pequeño y de peso bajo.

Aun así, es necesario que se implementen diseños que establezcan una disipación de calor efectiva y segura a nivel de paquete de baterías porque si no se podría llevar a cabo las siguientes reacciones exotérmicas desencadenando a la fuga térmica como son (Tobishima & Yamaki, 1999):



- La descomposición térmica del cátodo y del ánodo.
- La descomposición térmica del electrolito.
- La fusión del separador y en consecuencia el corto circuito interno.
- La oxidación del electrolito por parte del cátodo.
- La reducción del electrolito por parte del ánodo.

La fuga térmica además de por las reacciones anteriormente numeradas puede producirse por condiciones de abuso en el proceso de la integración de paquetes de baterías en los vehículos eléctricos. Cualquier sobrecalentamiento, sobrecarga o alta tensión, golpe, aplastamiento o cortocircuito tanto interno como externo que se de en la zona de fabricación, pueden llevar a la fuga térmica y a la posibilidad de incendio o explosión en el lugar del trabajo (Tobishima & Yamaki, 1999).

Esto puede suponer un riesgo para el personal si se encuentran frente a los peligros que se producen al desarrollarse una fuga térmica. Entre estos peligros cabe destacar los peligros físicos, los peligros químicos, y los peligros de intoxicación (Levy & Bro, 1994):

- Los peligros físicos resultan de la ruptura de la caja de batería pudiendo dañar físicamente al personal con la liberación de los materiales de la batería de manera que al estar el paquete de baterías siendo integrado en el vehículo rompa la caja e impacte frente a los usuarios presentes.
- Los peligros químicos se producen por la fuga de los gases o la ventilación de materiales inflamables pudiendo reaccionar con otro componente del vehículo eléctrico pudiendo producir quemaduras si la reacción resulta en un incendio y la muerte si se lleva a cabo explosión.



- Los peligros de intoxicación se dan por los reactivos y el litio u otra fuga de materiales tóxicos del paquete de baterías pudiendo intoxicar a los trabajadores.

Además, las celdas de las baterías de iones de litio, aunque no tengan contacto con el exterior, por sí mismas contienen las tres partes fundamentales del triángulo de fuego cuando se sobrecalientan. Si en algún punto de la incorporación de las celdas en módulos o packs, estas se recalientan, se puede producir una fuga térmica acompañada de la emisión de humo y gas, de la ruptura o explosión de la carcasa de la celda y/o de un incendio o explosión (Larsson & Mellander, 2017).

Otro de los riesgos es la inspiración de gases tóxicos incluso la quemadura si se produce un incendio debido a que muchas celdas están diseñadas para liberar gases cuando se sobrecalientan. Si mientras se lleva a cabo uno de los procesos de fabricación o transporte de estas celdas para posteriormente incorporarlas en módulos o packs se sobrecalientan, los gases que se producen son inflamables y tóxicos siendo un riesgo para los presentes. Además, si los gases se mezclan con aire en un entorno confinado o semiconfinado puede llevarse a cabo una explosión de gases provocando daños irreparables como se ha mencionado anteriormente (Larsson & Mellander, 2017).

4.2.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN

A niveles de módulos y paquetes de baterías las medidas de prevención son variadas. Entre ellas se encuentra el sistema de gestión de la batería o el Battery Management System (BMS), que también es empleado en las medidas de detección, y el sistema de gestión térmico o Thermal Management System (TMS) que es un método de seguridad para los paquetes de baterías que son muy grandes (Ghiji et al., 2020).



Por otra parte, los gases liberados pueden filtrarse a través de diferentes sistemas en el paquete de baterías o en el vehículo eléctrico antes de ser enviados al exterior. Un ejemplo de estos métodos de filtración son los filtros de carbono para purificar tanto los gases tóxicos emitidos por las celdas como los inflamables. Esta es una medida de prevención muy importante para las baterías de iones de litio de grandes tamaños, para que funcionen en espacios que están confinados y no resulten letales los gases producidos para el personal presente en esos espacios (Larsson & Mellander, 2017).

Además, es conveniente que las zonas de almacenaje de la fábrica tengan dos puertas de acceso y dos de salida para en caso de emergencia que los trabajadores y el material que no ha sido afectado puedan salir por un lado y se asegure que hay ventilación suficiente y de esta forma se reduzcan el humo y los vapores tóxicos (Kumar Singal, 2021).

Por otro lado, las zonas en las que se almacenan celdas y paquetes de baterías deben estar situadas en las plantas bajas especialmente al lado de zonas de salida para que se puedan detectar rápidamente los accidentes y se pueda evacuar el material no afectado. También estas zonas tienen que estar hechas de materiales que sean resistentes a las temperaturas elevadas y de sistemas de almacenaje que también sean de estos materiales y dividir el espacio en particiones para mejorar la ventilación y que el calor se disipe con más facilidad (Kumar Singal, 2021).

Respecto a la prevención en la colocación de la batería en el vehículo, al dividir en varios paquetes de baterías un sistema grande de batería, colocando estos paquetes con una determinada y suficiente separación física como en diferentes zonas del vehículo eléctrico, resulta más seguro al ser más difícil de propagarse el incendio en caso

de que comience en una celda ya que la propagación se retrasaría e incluso podría ser obstaculizada en uno de los mejores casos (Larsson & Mellander, 2017).

Otras medidas de prevención que se pueden tener en cuenta son las desarrolladas en el informe que realizó Tesla para el paquete de baterías Tesla Roadster siendo algunas pasivas y otras activas al igual que mecánicas o eléctricas y son utilizadas habitualmente en todos los modelos en la actualidad. Estas medidas funcionan cuando el paquete de baterías está siendo instalado, cuando se transporta y en el uso del vehículo (Berdichevsky et al., 2007). A continuación, en la imagen 19, se muestra un paquete de baterías Tesla Roadster montada en un carro para ser transportada.



Ilustración 19. Paquete de baterías Tesla Roadster (Berdichevsky et al., 2007)

Un ejemplo de estas son los microprocesadores integrados que controlan internamente el paquete de baterías, parte del BMS. Otra medida de seguridad pasiva es la carcasa de aluminio de la batería en vez del uso de plástico por la mayor resistencia en caso de abuso mecánico ya que es difícil de quemar y derretir por lo que aporta una seguridad extra. También cabe resaltar la manera en la que se conectan las celdas



eléctricamente entre sí pues la conexión de estas tiene un gran impacto en la seguridad del paquete de baterías. Cada celda tiene un fusible para el cátodo y otro para el ánodo, si un fusible se para por cortocircuito la celda queda separada de forma eléctrica por lo que no se transmite a otras celdas. Además, este paquete de baterías se compone de once módulos de celdas y para incrementar la seguridad cada módulo tiene un fusible para poder ser aislado uno de otro en caso de cortocircuito (Berdichevsky et al., 2007).

También incorpora un fluido refrigerante de agua y glicol que recorre todo el paquete de baterías para mantener a las celdas en equilibrio térmico. Al igual que extiende la vida útil del paquete, proporciona seguridad ante los aumentos de temperatura que puedan llevarse a cabo. Con la combinación de celdas muy pequeñas y este sistema se evitan los puntos calientes que tienden a provocar fallos en los módulos (Berdichevsky et al., 2007).

En el sistema de almacenamiento de energía se disponen múltiples microprocesadores que informan del estado de la batería, inician el enfriamiento e indican los fallos. Además, son capaces de desconectar del resto del vehículo la alta tensión del paquete de baterías al detectar una situación de riesgo (Berdichevsky et al., 2007).

Los packs de baterías Tesla Roadster también incluyen circuitos lógicos, microprocesadores y sensores que vigilan la temperatura, el voltaje y la corriente de forma continua. Los sensores que incluyen en el pack son de humo, de humedad y de agua. Si los sensores sobrepasan un valor, los contactos de alta tensión desconectan el pack de baterías del vehículo (Berdichevsky et al., 2007).

Por último, incluyen un sistema de seguridad pasivo que hace al pack de baterías inaccesible a su interior por contacto accidental mejorando la seguridad de aquellos



trabajadores que tengan que mover o introducir el pack de baterías en el vehículo (Berdichevsky et al., 2007).

4.2.3. MEDIDAS DE DETECCIÓN

Al igual que en el ciclo de vida anterior, las medidas de detección primordiales son los sensores. Los sensores deben ser empleados tanto en el interior del vehículo como en el espacio de alrededor de la zona trabajo en el caso de la integración de paquetes en módulos y posteriormente en sistemas como los vehículos eléctricos. Se debe tener vigilada la zona lo máximo posible en caso de que comience a arder una celda y se extienda del paquete de baterías al vehículo, pues cuando la batería se incorpora en un sistema más grande y con más electrónicas hay más probabilidades de que se produzca una explosión al existir más variedad de componentes con los que puedan reaccionar.

Además, en las fábricas hay áreas específicas para almacenar paquetes de baterías y celdas. Estas zonas al estar llenas de celdas son un gran peligro porque son una fuente de fuego o explosión por lo que se deben colocar sistemas adicionales como los aspersores de agua o tanques de agua para bajar la temperatura de una celda que se vea afectada y de esta manera prevenir que el fuego se extienda a las demás celdas del área de almacenamiento deteniéndolo. Otra opción recomendable es añadir CO₂, halon o extintores de espuma (Kumar Singal, 2021).

Por otro lado, la combinación de detectores de calor y humo junto a sistemas de alarma es muy útil en las zonas donde se realizan las pruebas de los packs de baterías y las celdas porque en el momento de realizar las pruebas se den incidentes que no sean captados principalmente durante pruebas que duren largos periodos de tiempo y no haya suficiente personal de vigilancia (Kumar Singal, 2021).



Aparte de los sensores es necesario instalar alarmas de incendio y establecer un sistema de vigilancia las veinticuatro horas del día siete días a la semana, donde se encuentran almacenadas las baterías, donde se procesa y donde se sitúan los trabajadores.

4.2.4. MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN. PROPAGACIÓN

Respecto a las medidas de compartimentación en la fábrica, con respecto al almacenaje de otro tipo de materiales que no sean celdas ni paquetes de baterías, los materiales inflamables se tienen que almacenar lejos de aquellos materiales que no sean inflamables (Kumar Singal, 2021).

Es recomendable separar los materiales inflamables de los no inflamables con paredes anti-fuego de yeso que pueden contener el fuego dos horas antes de propagarse a las otras zonas. Además, las paredes de yeso también pueden separar zonas pequeñas de almacenaje de celdas para que no se expanda a otras zonas con otras celdas y toda el área de almacenaje tanto de celdas como de paquetes de baterías esté más protegida (Kumar Singal, 2021).

4.2.5. MEDIDAS DE SUPRESIÓN

Las medidas de supresión como se ha mencionado al comienzo de la etapa son iguales en todas las partes del ciclo de vida de la batería eléctrica. Aun así, se deben seguir algunas recomendaciones, especialmente en las fábricas, como las que determina el CEO del Grupo Semco Neeraj Kumar Singal que se expondrán a continuación.



En las zonas de fabricación, los sistemas de extinción de incendios como el agua, polvo seco y espuma pueden dañar los equipos cuando se produce un incendio y, además, las conexiones eléctricas pueden inducir a otro fuego especialmente en la zona donde se sueldan materiales. Se recomienda el uso de CO₂ y de polvo seco en zonas donde hay detectores de humo, sistemas de aspersores de agua y alarmas. Solo se podrán activar aspersores cuando se corte la electricidad de la zona de fabricación. Los sistemas que se utilizan para cortar la electricidad son los disyuntores de fuga a tierra (ELCB), que detectan las corrientes e interrumpen el suministro de energía; y los disyuntores en miniatura o minibreakers (MCB), que protegen al circuito eléctrico de la sobrecorriente. Ayudan a que no se produzca fuego al cortar la electricidad. También son necesarios los sistemas de escape forzado con ventilación cruzada para ventilar el humo por el fuego producido y tanques de agua para sumergir los materiales como celdas o baterías que estén en llamas.

En las zonas de pruebas sistemas de extinción de incendios como el CO₂ o el halon deben estar a mano para extinguir inmediatamente los incendios producidos por las baterías o celdas causados por fugas térmicas, sobrecalentamientos o cortocircuitos.

4.3. SEGURIDAD EN EL USO DEL VEHÍCULO

La seguridad en el uso del vehículo es una de las partes más importantes para el usuario en la actualidad. Los vehículos eléctricos además de ser un símbolo del transporte ecológico han ganado mercado gracias al incremento de los precios de los combustibles fósiles para los ICEV, vehículos de combustión interna.

A diferencia del ahorro económico y medioambiental que los vehículos eléctricos proporcionan frente a los de combustión interna, estos últimos se han desarrollado continuamente durante el último siglo respecto a la seguridad contra incendios mientras



que los eléctricos tienen un recorrido muy corto. Este es el principal problema al que se enfrenta el vehículo eléctrico y por el motivo por el que no se ha convertido en el líder en el sistema de transporte, por la preocupación por la seguridad actual.

Los incidentes que han desembocado en incendios e incluso explosiones han atraído la atención de todos los medios llevando al usuario al rechazo de los vehículos eléctricos. Sin embargo, según un estudio de la INERIS (Instituto Nacional del Entorno Industrial y de los Riesgos) realizado en 2012, a través de tests para ver el efecto y las consecuencias del fuego en los vehículos eléctricos frente al producido en los vehículos de combustión interna; se demuestra que el desarrollo del fuego es similar para ambos vehículos. Se hicieron pruebas a cuatro vehículos, de dos fabricantes distintos, un vehículo eléctrico y otro de combustión interna para compararlos entre sí.

El fuego se propaga de la misma forma en ambos tipos. Primero, dentro del vehículo y luego, a la parte trasera. Por último, se propaga a la parte delantera. La masa que pierden es similar, entorno al 20%. Puede observarse en las siguientes gráficas como el calor de combustión disipado es de 6900 MJ para el vehículo de combustión y de 6300 MJ para el vehículo eléctrico del primer fabricante. Para el segundo fabricante, fueron de 10.000 MJ para el ICE y de 8500 para el EV (Lecocq et al., 2012b).

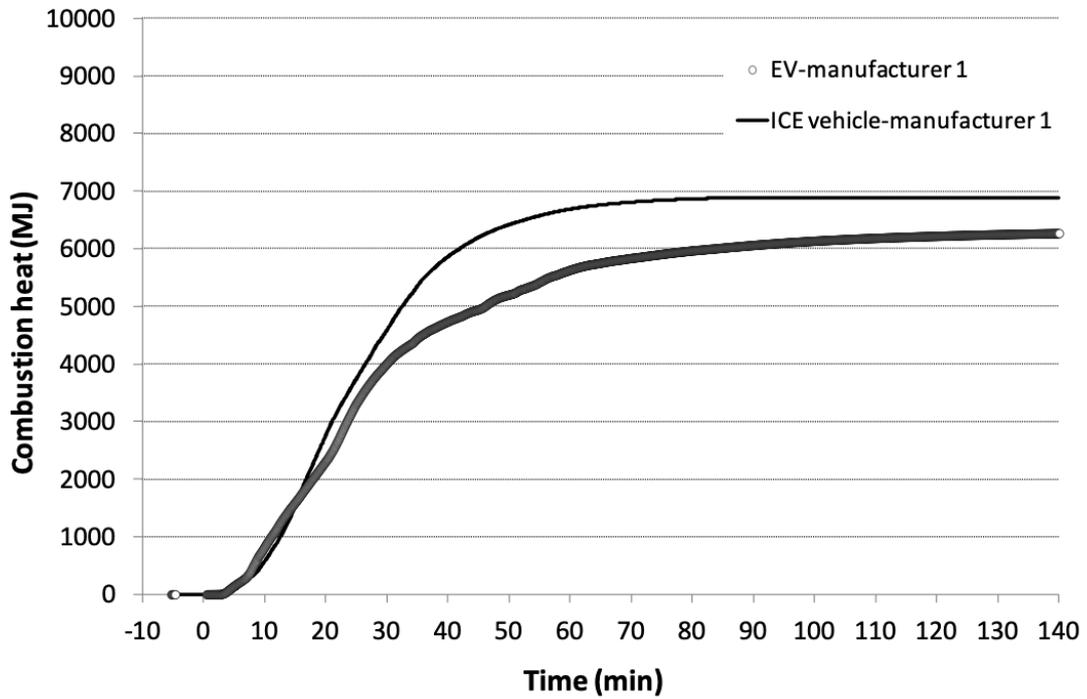


Ilustración 20. Calor de combustión disipado frente tiempo de EV y ICE fabricante 1 (Lecocq et al., 2012b)

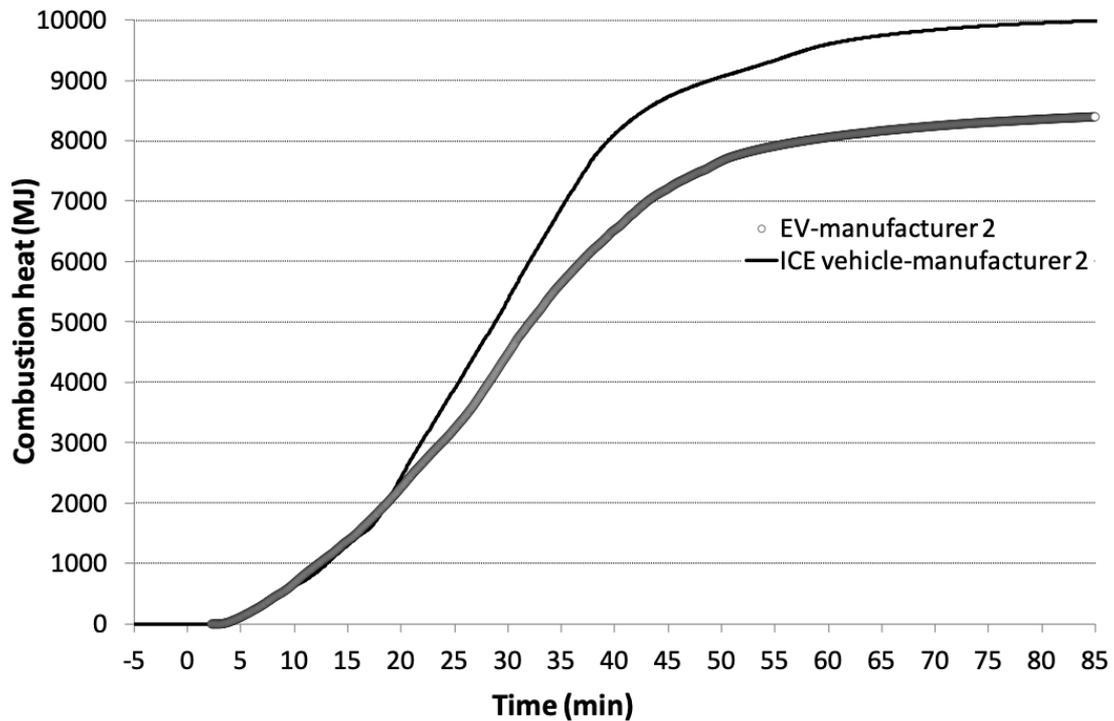


Ilustración 21. Calor de combustión disipado frente tiempo de EV y ICE fabricante 2 (Lecocq et al., 2012)

También en el experimento, se comparan las tasas de calor máximo liberado de cada vehículo observando en las siguientes gráficas que, aunque los picos de los ICEs sean más altos en algunos momentos, se comporta de manera similar al de los EVs y se compensan en el transcurso del tiempo tanto los de un fabricante como los de otro.

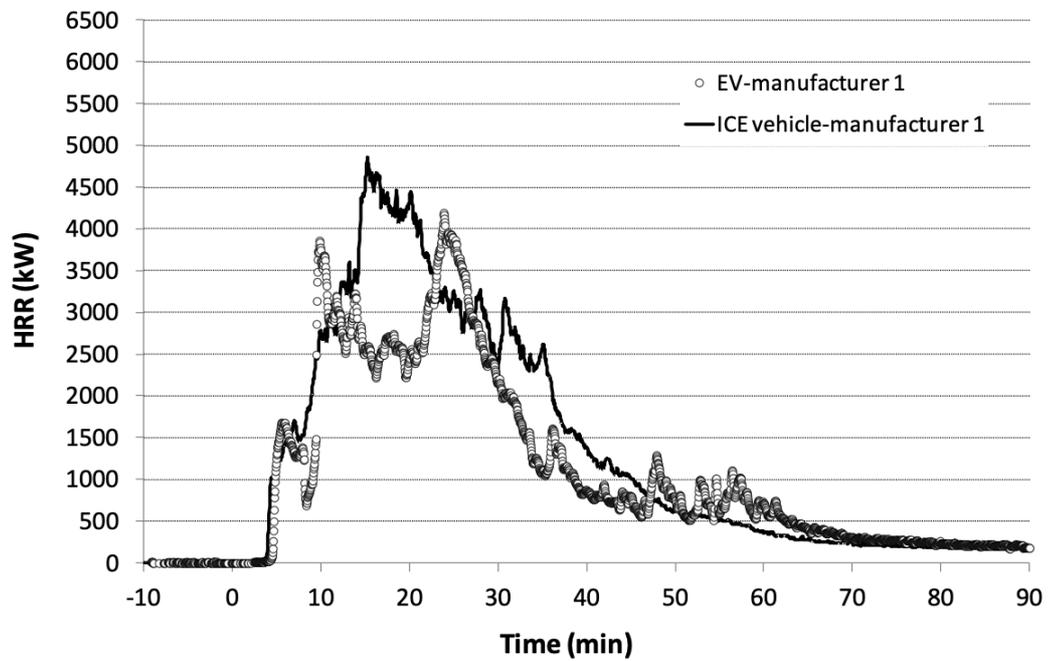


Ilustración 22. Tasa de calor máximo liberado frente al tiempo de un EV y un ICE fabricante 1 (Lecocq et al., 2012)

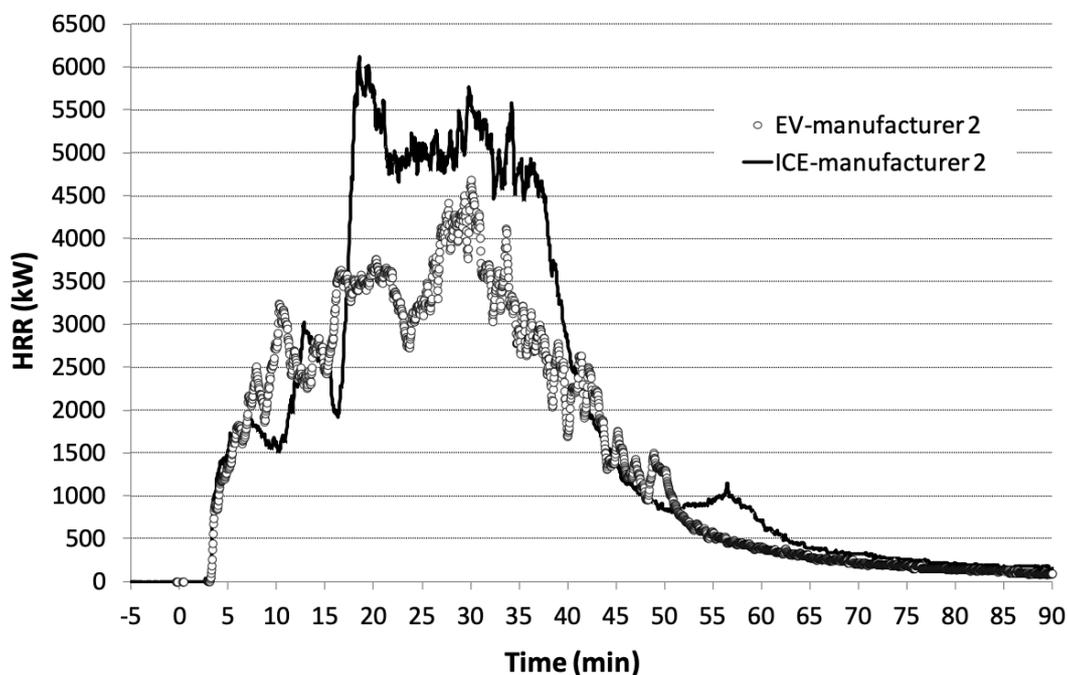


Ilustración 23. Tasa de calor máximo liberado frente al tiempo de un EV y un ICE fabricante 2 (Lecocq et al., 2012)

Por lo tanto, se observa un comportamiento parecido en ambos vehículos que demuestra que tanto los vehículos eléctricos como los de combustión interna tienen los mismos peligros y no se debe deformar la visión de cambio hacia los vehículos eléctricos.

Las causas principales de incendio en el vehículo eléctrico se pueden clasificar en cinco grupos (P. Sun et al., 2020) :

- Autoignición: Se relaciona normalmente con una situación de abuso continuo en la batería eléctrica en algún punto de su vida. El vehículo eléctrico se quema porque alguna celda interna falla de forma espontánea o por incluso condiciones meteorológicas extremas.
- Carga: Normalmente los incendios producidos durante la carga de la batería se deben a algún defecto de la estación de carga o de un cable.



También se pueden producir por una sobrecarga de la batería eléctrica, aunque no es lo usual.

- Accidentes de tráfico: Al producirse un accidente de tráfico como la colisión a una velocidad elevada, el paquete de baterías se daña haciendo que la batería de iones de litio se encienda durante el choque o después del choque y se produzca un incendio.

- Reignición: Una vez que un vehículo eléctrico ha sufrido un incendio debido a un abuso térmico, puede llegar a sufrir un segundo incendio como resultado del daño provocado a la batería de iones de litio incluso después de haber sido apagado completamente la primera vez que se incendió.

- Factores externos: Como pueden ser los incendios forestales, el incendio de algún objeto o estructura próximo al vehículo o un incendio provocado. Aunque se han dado casos, no son los más usuales.

4.3.1. RIESGO DE INCENDIO EN EL USO DEL VEHÍCULO.

Una vez nombradas las causas de los incendios de las baterías durante el uso de vehículos eléctricos, se analizarán los riesgos que suponen. Se pueden clasificar según los riesgos sanitarios y los riesgos medioambientales.

Los riesgos sanitarios a los que el usuario se expone en el uso del vehículo eléctrico son a causa de la exposición del contenido de las celdas. Como las baterías de iones de litio tienen componentes químicos como sales reactivas, electrolitos orgánicos volátiles y otros aditivos, cuando la batería eléctrica se degrada a causa de un incendio, se comienzan a formar compuestos corrosivos muy peligrosos para la salud del ser humano. Estos compuestos contaminan el aire y se transportan en forma de polvo si la batería se rompe mecánicamente. Entre estos componentes podemos encontrar el ácido fluorhídrico (HF) que se forma gracias al proceso de hidrólisis al que se somete el POF_3 si está expuesto al aire húmedo. El POF_3 a su vez, es formado por la combinación



de LiPF en carbonato de etileno descomponiéndose a PF y posteriormente a este compuesto (Kawamura et al., 2006), (Lebedeva & Boon-Brett, 2016).

Cuando se produce un daño accidental, el usuario se expone a gases tóxicos e inflamables, aun así, también es común la exposición a gases en el uso del vehículo eléctrico de forma rutinaria ya que se lleva a cabo el “gassing” o gasificación que es la liberación de gases por parte de las baterías de iones de litio. Estas producen sólidos, líquidos y gases durante su uso. Aunque no se sabe con seguridad los gases a los que el usuario se expone en este proceso llamado “gassing”, se han detectado niveles de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y ácido fluorhídrico (HF) además de la presencia de alquenos y alcanos (Zilio et al., 2019). Este proceso de liberación de gases se da durante el proceso de carga inicial de la batería eléctrica y, como el LiPF₆, junto con el solvente, está en contacto con el ánodo de grafito; se lleva a cabo durante y antes de la formación de la interfaz del electrolito sólido (SEI) (J. Sun et al., 2016), (D. J. Xiong et al., 2017). Otro aspecto es la formación de sólidos, peligrosos, corrosivos y dañinos para el medioambiente y para los seres humanos, durante el funcionamiento de la batería (Heider et al., 1999).

Como se ha expuesto anteriormente, al producirse un accidente, el calor se produce rápidamente y se produce una fuga térmica que provoque la ventilación de los gases por dispositivos de seguridad. Se produce un vapor que contiene solvente del electrolito y puede causar un incendio si se dan las condiciones adecuadas (Larsson et al., 2018). Este vapor producido es un peligro para el usuario por su toxicidad y su capacidad de explosión. Un componente del humo producido al quemar la batería de iones de litio es el anteriormente nombrado ácido fluorhídrico (HF) que, aunque también se produce en el incendio de vehículos de combustión interna, se produce la doble cantidad causando un riesgo mayor. También se demostró que paquetes grandes de celdas generaban más HF por celda que una sola celda, por lo que se estimó que se



liberan en un paquete de baterías para un único coche eléctrico, entre 20 y 200 mg de HF por vatio por hora (Lecocq et al., 2012a). Estas cantidades de HF, según el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud en el Trabajo en Estados Unidos, son niveles muy altos incluso para una habitación con 1000 m³ de espacio (The National Institute for Occupational Safety and Health, n.d.).

Se puede concluir que existe una falta de información y análisis sobre la inflamabilidad y la toxicidad de todos los productos de combustión y componentes de las baterías eléctricas pues incluso las celdas supuestamente más seguras del mercado, las compuestas por LFP, son unas de las que más producen HF (Larsson et al., 2017), (Sturk et al., 2015).

Siguiendo con los riesgos sanitarios, se pueden llegar a desencadenar explosiones por la reignición, las baterías de vehículos eléctricos se encienden pasadas horas de haber sido apagado el primer fuego, incluso días y semanas más tarde. También es importante declarar que incluso las baterías que han llegado a apagarse contienen gases tóxicos que anteriormente estaban atrapados y en cualquier momento pueden salir al interior del vehículo. Por otro lado, es conveniente tener en cuenta que la energía eléctrica puede quedarse en una celda después de haberse descargado la energía almacenada en la batería, este es el caso de la llamada “stranded energy” retenida en la celda o en la batería tras haberse producido una explosión. Esta energía almacenada puede salir de un momento a otro siendo un gran peligro para el usuario (Roman, 2020).

Por último, los riesgos medioambientales que se pueden llevar a cabo se ven influenciados por las consecuencias que tengan los incendios producidos en el medioambiente. Como, por ejemplo, al producirse un incendio y liberarse los gases de combustión de las baterías de iones de litio nombrados anteriormente, se produce una gran contaminación medioambiental dependiendo de donde se sitúe el vehículo



eléctrico. La contaminación de químicos tóxicos que se produce si el accidente ha ocurrido cerca de agua es muy grande, pues el agua se contamina con todos esos componentes y tiene que ser procesada (Held et al., 2022).

4.3.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN. ENSAYOS A NIVEL VEHÍCULO O SISTEMA

Existen una gran variedad de sistemas para mejorar la seguridad de las baterías eléctricas en los vehículos eléctricos. Entre ellas se encuentran, tanto como para las medidas de prevención como para las de detección, el llamado Battery Management System (BMS) o sistema de gestión de la batería.

Además del BMS, entre las medidas de prevención, existen los ensayos a nivel de batería que realizan los fabricantes de vehículos eléctricos para prevenir los incendios y ver cómo las baterías responden al fuego y cómo pueden mejorar los componentes para reducir las probabilidades de incendio. Los ensayos pueden ser a nivel de celda, módulo, pack y vehículo y se pueden clasificar según el tipo en ensayos mecánicos, eléctricos, medioambientales y químicos. Dentro de los ensayos mecánicos existen los de impacto mecánico, de caída, de penetración, de volcamiento y de vibración. En los ensayos eléctricos se encuentran los de cortocircuito interno, de cortocircuito externo y de sobredescarga y sobrecarga. Dentro de los medioambientales se encuentran los ensayos de estabilidad térmica, de impacto térmico y ciclo térmico, de sobrecalentamiento, de temperaturas extremadamente frías y de incendio. Por último, dentro de los químicos existen los ensayos de emisiones y de inflamabilidad.

4.3.3. MEDIDAS DE DETECCIÓN. BATTERY MANAGEMENT SYSTEMS

Actualmente se pueden encontrar numerosas medidas de detección como los detectores de calor convencionales, los detectores de humo y los detectores de humo y



calor. Entre estos, el detector más rápido es el de calor y humo mientras que el detector de calor es el más lento por lo que se recomienda siempre un detector de humo (Q. Wang, Mao, et al., 2019). A parte de estos métodos explicados en las primeras etapas, cuatro sistemas son los más populares entre las medidas de detección que forman parte de los vehículos eléctricos:

La primera de ellas, como se ha comentado en el apartado anterior, uno de los sistemas para garantizar la seguridad de las baterías eléctricas, ya que sirve como medida de detección de incendios; es el Battery Management System. Actualmente es uno de los mecanismos más usados para detectar fallos en las baterías. Este sistema utiliza sensores de temperatura y de voltaje incorporados en el interior de la batería para realizar el seguimiento de su estado (Stephens et al., 2017). Abarcan cuatro funcionalidades principales que son la monitorización, la protección, el cálculo y la comunicación.

La monitorización es la actividad de vigilancia del estado de operación actual e histórico de la batería que realiza el sistema para analizar y asegurar un funcionamiento seguro.

En cuanto a la protección, los sistemas de protección son diferentes y variados, pero principalmente constan de sistemas o componentes de hardware o cambios para el control funcional del sistema de la batería que monitorizan el área de operación segura. Estos sistemas usan la información del sistema de vigilancia o de la actividad de monitorización para evitar que la batería funcione fuera del área de operación segura que pueda llevar a que falle la batería.

En la función de cálculo, un subsistema procesa los datos de vigilancia para dar una respuesta con el sistema de protección. Esta función dependerá completamente de lo compleja que sea la aplicación, del sistema y de los requisitos de conocimiento que



necesite de forma constante el sistema. Además, algunos BMS pueden calcular muchos parámetros, entre ellos, los estados de salud (SOH), los estados de carga (SOC) y los cambios en el área de operación segura (SOA) de la batería.

La última función es la de comunicación, sin ella los BMS no cumplen su función principal de alertar al usuario del estado de la batería. También tiene la capacidad de introducir datos para establecer operadores e investigar incidentes que se puedan llevar a cabo en el sistema (Rahimi-Eichi et al., 2013), (Stephens et al., 2017), (R. Xiong et al., 2018), (Kailong Liu et al., 2018).

Uno de los problemas actuales es la fiabilidad del BMS. Si este sistema falla, se puede producir un fallo en sistema de la batería. Un ejemplo de esto es que los sensores de temperatura deben colocarse en el exterior de la celda, pero la medida que da de manera más rápida y eficaz el dato de la temperatura cuando comienza una fuga térmica es la del interior de la celda. Por motivos como este se exige la instalación de otros sistemas de protección para evitar fallos por abusos y detectarlo en la mayor brevedad posible (Stephens et al., 2017), (Kailong Liu et al., 2018), (Diaz et al., 2020).

Otro de los sistemas de protección es la interfase de electrolito sólido (SEI), es una barrera protectora entre el solvente y el ánodo permeable durante la primera carga para que pasen los iones de litio. Su grosor aumenta y añade iones a lo largo de la vida útil de la batería eléctrica para evitar que el ánodo haga contacto con el litio metálico y se produzcan gases inflamables (Balakrishnan et al., 2006), (Mao et al., 2017).

Los aditivos químicos son otra protección que presentan las baterías para detener la sobrecarga generando un gas y creando una capa aislante entre las fases de condensación y de gas deteniendo una combustión, absorbiendo el exceso de carga del cátodo y pasándolo al ánodo; además de estabilizar térmicamente el compuesto LiPF_6 y



mejorar la capa de la interfaz de electrolito sólido (Balakrishnan et al., 2006), (Mao et al., 2017), (A. Wang et al., 2018) .

El último sistema de seguridad son los sistemas de seguridad física que tienen como objetivo principal acabar con el circuito electrónico externo. Entre ellos están los aparatos que interrumpen la corriente. Sin embargo, ya producida la fuga térmica, los sistemas que paran los circuitos electrónicos o iónicos no sirven (Feng et al., 2018).

4.3.4. MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN

Las medidas de compartimentación presentes en un vehículo eléctrico son aquellas en las que la disposición de la batería y los materiales que la rodean hacen que, si se produce fuego en la batería, no se extienda a las demás partes del vehículo. Por lo tanto, la batería debe estar rodeada de materiales fabricados con componentes que eviten esta propagación para mejorar la seguridad del vehículo eléctrico. Además, debe situarse en un sitio estratégico para evitar los abusos por colisión o accidentes de tráfico.

4.3.5. MEDIDAS DE SUPRESIÓN. REGÍMENES REGULATORIOS. MEJORES PRÁCTICAS.

En España no existen medidas ni procedimientos específicos oficiales para combatir los fuegos de los vehículos eléctricos. No ha sido hasta agosto de este año (2022) cuando un bombero efectivo del Consorcio de Emergencias de Gran Canaria, Cristóbal Gómez, ha desarrollado la Guía de Actuación en Vehículos Eléctricos e Híbridos (Canarias Ahora, 2022).

Mundialmente, tampoco existen procedimientos claros ni coherentes para luchar contra los fuegos de los vehículos eléctricos. Sin embargo, existen organizaciones con mucha experiencia como los bomberos de Mountain View de California gracias al trabajo de la mano de Tesla. Una medida de estos bomberos es la de construir presas rodeando los vehículos o las baterías y llenarlos de agua una vez han sido traspasados a



un depósito ya que sumergirlos en agua por un largo periodo es una de las soluciones para apagar los incendios, evitar la reignición y que se liberen gases tóxicos (Roman, 2020).

En China, el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información estableció una plataforma nacional en 2017 que vigilaba la localización, el tiempo de carga, el kilometraje, los mapas de calor de carga de los vehículos eléctricos y el rendimiento para analizar los vehículos eléctricos para tener el control de la seguridad (Edmondson, 2020).

Estados Unidos al igual que China, se encuentra por delante de Europa y Reino Unido en cuanto a la seguridad de los vehículos eléctricos y al conocimiento de su protección. La Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA) ha realizado un manual de entrenamiento para la protección contra incendios que es actualizado periódicamente y ayuda a los implicados a poder enfrentarse a los incendios. Además, recomiendan almacenar los vehículos eléctricos dañados a por lo menos 50 pies de distancia, aproximadamente 15 metros, del edificio o el vehículo más cercano. Esta asociación también ha realizado el código NFPA 855 para instalar sistemas de almacenamiento de energía (Roman, 2020), (Long et al., 2013), (NFPA, n.d.). Por otra parte, la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte (NTSB) publicó un informe de seguridad informando cómo los servicios de emergencia deben responder a los incidentes de las baterías de iones de litio, además, se destaca la importancia del poco conocimiento de actuación contra incendios que poseen los fabricantes de baterías y vehículos eléctricos (National Transportation Safety Board, 2020).

Tanto en Estados Unidos como en Canadá se ha establecido un estándar para la protección segura de baterías estacionarias en diferentes aplicaciones, el UL1973, para que lo apliquen los fabricantes. En 2020 la NTSB creó un plan de emergencia de riesgos para primeros auxilios y la Organización Nacional de Normalización (ISO) la apoyó con



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA



información, para incidentes con sistemas de almacenamiento de energía recargable, de primeros y segundos auxilios (Christensen et al., 2021).

Por último, en Reino Unido, la Institución de Estándares Británica (BSI) en 2021 lanzó el código de prácticas, Safe and environmentally-conscious design and use of batteries Guide, para la gestión de riesgos auditables (British Standards Institution, 2021). Por otra parte, el Consejo Nacional de Jefes de Bomberos (NFCC) establece una guía de actuación para enfrentarse a incidentes relacionados con las baterías de iones de litio que se puede resumir en el siguiente esquema de la imagen 24 (NFCC, 2021):

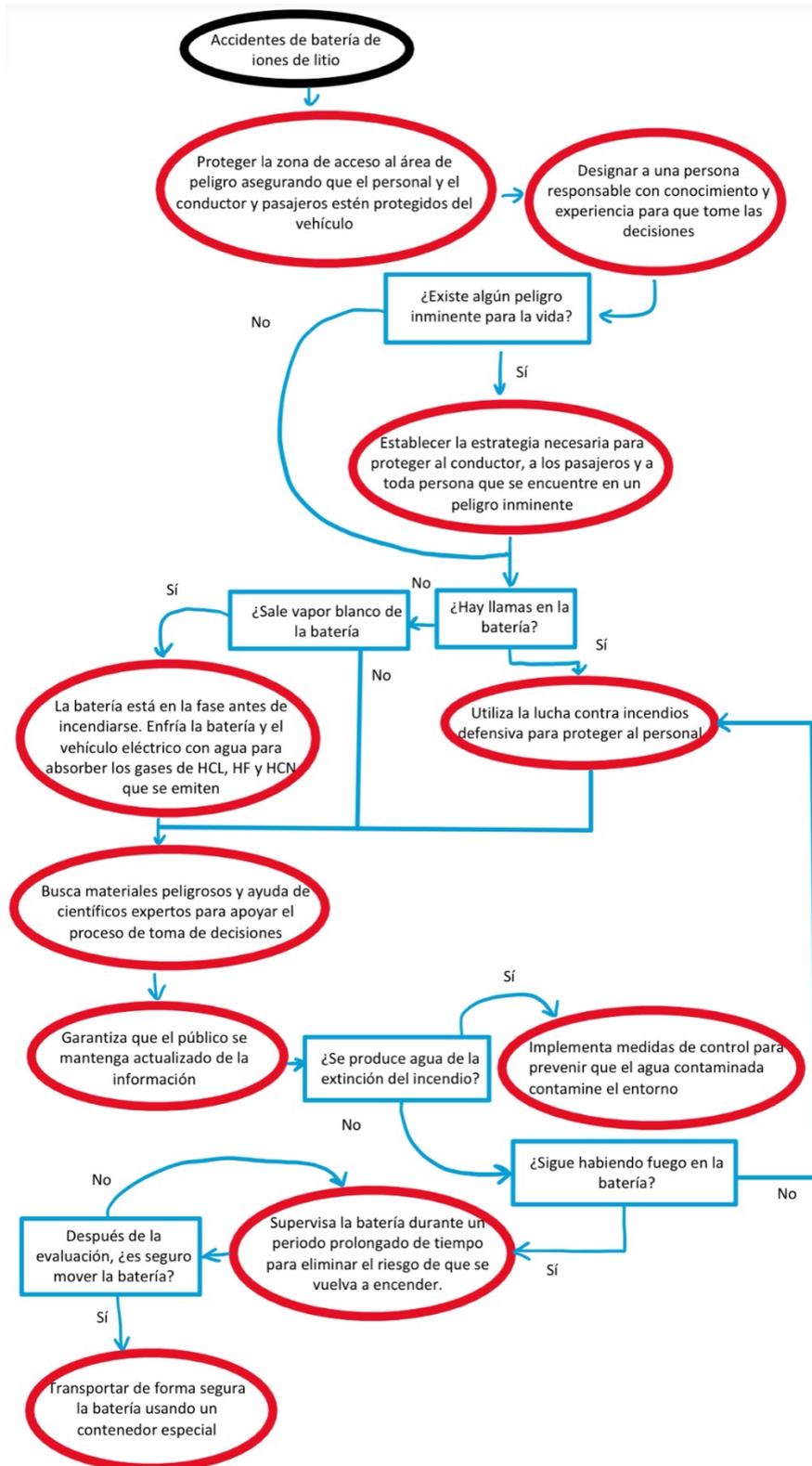


Ilustración 24. Diagrama de intervención en un accidente de EV según el NFCC (NFCC, 2021)



Los incendios que se producen por baterías de iones de litio son complicados, porque la batería tiene distintos componentes que reaccionan entre sí y pueden causar un daño catastrófico, pues se compone de fuegos de diferentes clases: de clase A, fuegos donde el combustible es un elemento sólido, por los electrodos, el material del separador y el material de construcción de la batería; de clase B, fuegos donde el combustible es un elemento líquido inflamable o combustibles sólidos de bajo punto de fusión, por el electrolito líquido; y de clase E, fuegos de equipos eléctricos (Ouyang et al., 2019).

Para cada tipo de fuego, hay un agente extintor recomendado. Es muy importante enfriar todas las celdas de un paquete de baterías grande, antes que extinguir el fuego de una única celda; para prevenir que se propague el calor a todas las celdas y vaya aumentando la densidad de energía. Aunque no se han determinado definitivamente los mejores medios de extinción de baterías eléctricas de iones de litio, los medios más recomendados por los fabricantes son el agua y el polvo químico o seco seguido del dióxido de carbono (CO₂) y la espuma según el Instituto Danés de Tecnología contra Incendios y Seguridad (DBI). Se puede observar en la tabla 6 a continuación (Wilkins et al., 2017):

Empresa	País	Fecha	Batería	Química	Agua	CO2	Espuma	Polvo	Polvo seco	Nitrógeno	Arena	Halon	Otros
Yuka energy	China	2011	Paquete	LCO	NO	X	X		X		X		
Makita	EEUU	2013	Paquete	NCO	X		X		X				
Enertech	Corea	2017	Paquete	NMC	X				X		X		
Samsung	Corea	2011	Celda	NMC	X				X				
Samsung	Corea	2016	Celda	LMO	X	X	X	X	X	X			

Saft	Francia	2009	Paquete	LCO	X	X		X				X	
Bipower	EEUU	2017	Paquete	LCO	X	X		X					
LG Chem	Corea	2013	Celda	NMC									X
Motorola	EEUU	2017	Paquete	LCO	X	X	X	X					
Ideal	EEUU	2010	Celda	LCO		X	X	X					
SDPT	China	2016		LCO	X	X							
Bren-Tronics	EEUU	2013	Paquete	LCO	X	X	X	X					
Advance Energy	EEUU	2011		LCO									X
Leo Energy	Singapur	2014		NMC	X		X						
IDX	Japón	2016	Paquete	LMO	X	X	X	X		X			
Panasonic	EEUU	2015		NMC	X	X	X	X					
Total					12	10	9	8	5	2	2	1	2

Tabla 6. Lista de agentes extintores recomendados por fabricantes (Wilkins et al., 2017)

Entre los más recomendados, cabe destacar el dióxido de carbono, pues no es efectivo a la hora de suprimir el calor de la batería por lo que en la práctica no es recomendable usarlo para eliminar el fuego y enfriar a su vez la batería (Wilkins et al., 2017). Además, los agentes líquidos dieléctricos se contaminan y se vuelven conductores en la primera etapa de la extinción de un incendio por lo que tampoco son recomendados. Tampoco se recomienda la espuma para incendios de baterías por la menor capacidad de enfriamiento que presenta a comparación del agua. Aunque el agua es el agente extintor más recomendado, en algunos casos su uso resulta peligroso porque puede dañar los sistemas eléctricos provocando cortocircuitos en las celdas que no han sido dañadas y causando un peligro eléctrico. Aun así, en los casos en los que el uso del agua es peligroso, el uso de polvo seco o gases inertes es recomendado con una ventilación y un sistema de enfriamiento adicional. Cuando se quiere apagar un incendio



por etapas se proponen agentes que no son de base acuosa, sin embargo, si se necesita más enfriamiento y el incendio persiste se deben utilizar extintores a base de agua. Como se puede observar aún queda un largo camino en el conocimiento de los agentes extintores por parte de las empresas interesadas que será necesario en un futuro muy cercano (Díaz et al., 2020).

4.4. SEGURIDAD EN EL MANTENIMIENTO DEL VEHÍCULO

Existen diferentes niveles de mantenimiento en el vehículo eléctrico. El primer nivel es el mantenimiento por el usuario o propietario del vehículo como el lavado del vehículo. Como el usuario no es necesariamente un electricista con el conocimiento debido, debe estar protegido ante los riesgos que suponen estar en contacto directo. El segundo nivel de mantenimiento se da en el taller con el mantenimiento rutinario del vehículo, la recarga de la batería, etc. Los mecánicos del taller tienen la obligación de estar formados y capacitados para manipular vehículos eléctricos de forma segura y deben saber que la batería se tiene que desconectar antes de llevar a cabo cualquier actividad de mantenimiento. El tercer nivel de mantenimiento se da en el taller del fabricante del vehículo como una reparación eléctrica del vehículo. Estas acciones solo pueden ser llevadas a cabo por personal cualificado y capacitado para ello. Por otra parte, también debe llevarse a cabo un mantenimiento para el funcionamiento seguro del vehículo. Aparte del mantenimiento mecánico es necesario un mantenimiento eléctrico rutinario que asegure la fiabilidad eléctrica del vehículo como pruebas de resistencia al aislamiento y a la fuga de tierra, la limpieza, estado y mantenimiento de la batería, y la operación de los sistemas de control (Van Den Bossche, n.d.) En este apartado se establecerán las medidas de seguridad más importantes tanto en el segundo nivel de mantenimiento del vehículo en un taller como en el tercer nivel de mantenimiento del vehículo en el taller del fabricante.



4.4.1. RIESGO DE INCENDIO EN EL MANTENIMIENTO DEL VEHÍCULO

El incumplimiento de los procedimientos de seguridad en la reparación de vehículos eléctricos, como por ejemplo el uso de los EPIs de forma inadecuada o no hacer uso de ellos; puede provocar al mecánico o técnico que opere con el vehículo lesiones como quemaduras por una explosión que pueda llevarse a cabo o incluso la electrocución o descargas eléctricas que provoquen fuego, peligros tóxicos y químicos además de accidentes secundarios con dispositivos electrónicos de soporte vital como los audífonos, marcapasos, bombas de insulina, etc. (GMG EnviroSafe, 2022).

Además, como todos los vehículos eléctricos poseen componentes de alto voltaje diferentes, con distintos diseños y ubicaciones, no está establecida una única solución de reparación para el gran número de modelos que existen en el mercado. Por este motivo es de extrema necesidad que los talleres de reparación estén lo suficientemente formados en cuanto a seguridad en la manipulación de vehículos eléctricos y consulten los procedimientos y la documentación del Original Equipment Manufacturer (OEM) o fabricante de equipo original antes de comenzar la reparación de los vehículos. Si no se siguen las pautas dadas por los fabricantes del vehículo eléctrico se puede llegar a los riesgos anteriormente citados (GMG EnviroSafe, 2022).

4.4.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN. FORMACIÓN TÉCNICA. RÉGIMEN REGULATORIO

Con todos los riesgos a los que los mecánicos se enfrentan con el aumento de los vehículos eléctricos en el mercado es necesario que existan regulaciones como el Reglamento de Electricidad en el Trabajo o Electricity at Work Regulations de Reino Unido establecido en 1989. Esta regulación tiene apartados que aplican al trabajo con vehículos de alta tensión y obliga al empresario a proteger a los trabajadores en tareas donde el la experiencia y el conocimiento técnico es un deber para evitar daños, peligros



y riesgos. La Agencia Ejecutiva para la Salud y Seguridad (HSE) en Reino Unido además de proporcionar el Reglamento de Electricidad en el Trabajo, establece Prácticas de Trabajo Seguras (Safe Working Practices) para guiar a los empresarios a identificar a las personas con experiencia laboral y conocimiento para llevar a cabo esas tareas y establecer el rango de supervisión que necesitarán cada uno de sus trabajadores.

En Reino Unido existen más de 182.000 mecánicos o electricistas de vehículos siendo solo 21.000 mecánicos calificados para trabajar correctamente con vehículos eléctricos según el Instituto de la Industria Automovilística (IMI). Todo este número de técnicos se disponen en 42.000 talleres alrededor del país, siendo 7.000 (12%) de ellos talleres autorizados de concesionarios y 35.000 (88%) talleres independientes. Estos primeros, se centran en la reparación total de colisiones específicamente en sistemas eléctricos complejos ya que las franquicias de los concesionarios junto a los fabricantes llevan a cabo numerosos cursos de formación a lo largo del año para mantener informados a sus mecánicos y con el conocimiento necesario de forma constante. Los talleres independientes, según la Sociedad de Fabricantes y Comerciales de Motores (SMMT), serán aquellos que tendrán que invertir grandes cantidades en los equipos necesarios para estar actualizados frente a la tecnología de los vehículos eléctricos además de en cursos específicos para adquirir las habilidades y conocimientos necesarios difíciles de encontrar y muchas veces no obligatorio para trabajar en talleres.

El Instituto de la Industria Automovilística ha desarrollado un programa en Reino Unido llamado IMI TechSafe para que todos los mecánicos, independientemente del tipo de taller en el que desarrollen su oficio, puedan tener los conocimientos necesarios para trabajar en los sistemas eléctricos de vehículos tanto eléctricos como híbridos. Permite a los mecánicos tener el reconocimiento Este programa IMI TechSafe se basa en el estándar profesional de vehículos eléctricos del Instituto de la Industria Automovilística (IMI) y fue desarrollado por un grupo asesor de vehículos eléctricos



junto a la Oficina de Vehículos de Bajas Emisiones (OLEV) y la Sociedad de Fabricantes y Comerciales de Motores (SMMT) en 2019.

4.4.3. MEDIDAS DE DETECCIÓN

Durante el mantenimiento del vehículo también es aconsejable el uso de los sensores comentados en el apartado 4.1.3. en las medidas de detección en la etapa de fabricación de las celdas en la seguridad a nivel de celda por la “Guía de soluciones integradas de protección contra incendios para baterías de iones de litio” de Euralam. Pues las medidas de detección anunciadas son las empleadas principalmente en todas las etapas del ciclo de vida de la batería de iones de litio.

4.4.4. MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN

Respecto a las medidas de compartimentación en la etapa del mantenimiento del vehículo, cabe destacar la necesidad de implantación de cámaras especiales que hagan la misma función que las anteriormente nombradas paredes anti-fuego de yeso. Estas tienen como función contener las baterías o componentes como celdas o módulos de forma que el taller donde se haga el mantenimiento del vehículo se mantenga protegido y evite que en caso de estar dañada la batería o algún componente y/o se encuentre en una condición de abuso produzca fuego y se propague en el taller u a otros vehículos de este causando daños irreparables. Actualmente la mayoría de los talleres no poseen estas cámaras para almacenar las baterías y por la seguridad de los trabajadores debería ser de obligado cumplimiento en un futuro en el que los vehículos eléctricos predominen en las carreteras.



4.4.5. MEDIDAS DE SUPRESIÓN

Las medidas de supresión en caso de fuego en la cuarta etapa del ciclo de vida de las baterías eléctricas, en el mantenimiento del vehículo, son las mismas medidas que durante todo el ciclo de vida, mencionadas en el apartado 4.3.5. de medidas de supresión en la etapa del uso del vehículo.

4.5. SEGURIDAD EN EL FINAL DE VIDA

Aunque en Europa la Comisión Europea apueste por el reciclaje de las baterías de iones de litio y se pretenda reciclar al menos el 50% del peso de los materiales de estas baterías (*Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the C... - EUR-Lex, 2006*) surgen una larga serie de riesgos para la sociedad que no se han contemplado y que se deben estudiar antes de que las baterías de iones de litio ganen el mercado de los vehículos y se comercialicen más que los vehículos de combustión interna.

Además de los peligros a los que la sociedad se enfrenta con el uso de baterías eléctricas de segunda mano, también se debe poner en el punto de mira la mayor disponibilidad a manos del usuario de celdas individuales y de módulos por el reciclaje de estas. Pues la población tendrá acceso a un incontrolable número de sistemas energéticos. Facilitando la creación de sistemas de almacenamiento de baterías caseros o domésticos que, sin un conocimiento adecuado de las protecciones requeridas o sistemas de protección necesarios, además de sin el conocimiento de los peligros de las baterías abusadas, baterías que han sido recargadas un gran número de veces, pueden ser una gran amenaza para el creador y el usuario. Este hecho muestra un peligro potencial tanto en el área metropolitana como en las carreteras por lo que se necesita establecer un escenario de regularización para el final del ciclo de vida de las baterías eléctricas para asegurar su restricción en el uso y reciclaje y se contengan en un flujo adecuado de reutilización (Horowitz et al., 2021), (Lin et al., 2022).



4.5.1. RIESGO DE INCENDIO EN EL FINAL DE VIDA DE LA BATERÍA.

Los componentes complejos y altamente reactivos de las baterías de iones de litio hacen que su reciclaje sea muy complicado, aunque es un paso fundamental para la disminución del impacto medioambiental de estas. Al realizar el proceso de reciclaje el personal presente se enfrenta a grandes peligros de seguridad especialmente en su manipulación.

Estos peligros a los que se enfrentan se clasifican en cuatro: los peligros eléctricos como los cortocircuitos, los peligros químicos, con la evaporación de gases tóxicos; y los riesgos tanto de incendio como de explosión (Diaz et al., 2020). Por otra parte, los riesgos a los que se expone el personal son tres: la exposición a los componentes de la celda, la electrocución y el fuego (Rogers & Hamer, 2019).

El proceso de reciclaje se puede dividir en varias fases. La primera fase es la extracción de la batería del vehículo eléctrico donde si el trabajador no está formado correctamente puede tener el riesgo de electrocución porque las baterías se conectan en serie y tienen tensiones muy altas (Harper et al., 2019). Esto se debe a que las celdas son los componentes más pequeños de una batería de un vehículo y se conectan entre sí componiendo un módulo y los módulos en paquetes. Cuando estos paquetes se sacan porque están dañados la alta tensión presente es un riesgo si las interconexiones entre las celdas y módulos no se han eliminado. Aunque las interconexiones se eliminen, si existen materiales metálicos en los alrededores que puedan introducirse cuando se extrae el paquete, se puede provocar un cortocircuito que llevará al incendio (Staub, 2018).



Los cortocircuitos provocados por las celdas dañadas pueden ocurrir también en las fases de transporte, almacenamiento y desensamblaje de las baterías de iones de litio. Cuando las baterías sufren procesos diferentes para su posterior reciclado como su fragmentación o su aplastamiento también se pueden provocar cortocircuitos o reacciones químicas porque es posible que el ánodo y el cátodo entren en contacto. Como se ha determinado en apartados anteriores, estos cortocircuitos y reacciones químicas pueden llevar a la formación de gases, al aumento de temperatura y consecuentemente al incendio e incluso explosión (Díaz et al., 2020).

Por otro lado, cuando las baterías recicladas se usan de nuevo, durante todo el proceso desde que se restauran hasta que se usan, se debe tener en cuenta que las celdas que se encuentran en un estado avanzado de degradación tienen mayor riesgo de provocar fugas térmicas especialmente en condiciones con climas extremos u otros factores que afecten a su uso (Díaz et al., 2020).

Uno de los usos en la segunda vida de las baterías de iones de litio es el uso de baterías como sistema de almacenaje (BESS) que, aunque maximicen la vida de las baterías y los beneficios económicos suponen un riesgo por los incendios que se han llevado a cabo a lo largo de los años.

Al final de la vida de las baterías de iones de litio, son almacenadas en instalaciones dedicadas especialmente para ello o en lugares como vertedero donde la ley lo permita (X. Zeng & Li, 2014). Por otro lado, está el riesgo de que se eliminen de forma ilegal o irregular disponiendo los componentes en manos de usuarios inexpertos pues estas baterías de iones de litio tienen componentes como los electrolitos inflamables, metales tóxicos, aditivos como los líquidos iónicos, etc. que dispuestos en malas manos pueden ser muy peligrosos para el medio ambiente y para la salud de las personas (Perkins et al., 2014). Cuando estos componentes reaccionan se puede originar



un incendio muy fácilmente. No cabe duda, que incluso en vertederos donde estén almacenados estos componentes o baterías enteras al degradarse o corroerse se produzcan incendios pudiendo arder durante largos periodos de tiempo contaminando el medioambiente, liberando gases tóxicos y poniendo en riesgo la vida de las personas (Omar & Rohani, 2016), (Wu et al., 2019).

El crecimiento de las baterías de iones de litio amenaza a la industria de la gestión de residuos por las dificultades y riesgos que se presentan del manejo de las baterías en su etapa del ciclo final de vida. Los incendios en esta industria incrementarán a lo largo de los años, al igual que se está observando el aumento de incendios y explosiones en las instalaciones de recuperación de materiales llamadas Materials Recovery Facilities (MRF) (Lisbona & Snee, 2011), (EPA Sustainable Materials Management Web Academy: Federal Aviation Administration Office of Security and Hazardous Materials Safety, 2018).

Los accidentes que se han llevado a cabo son principalmente por la mezcla de forma accidental de las baterías de iones de litio con baterías de plomo ácido y otro tipo de materiales. Al manipular diferentes componentes y materiales en estas instalaciones, es muy probable que las baterías se enciendan y por su pequeño tamaño se mezclen con otros objetos de mayor tamaño (EPA Sustainable Materials Management Web Academy: Federal Aviation Administration Office of Security and Hazardous Materials Safety, 2018).

4.5.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN

Para identificar y evitar que se generen los riesgos anteriormente nombrados, es necesario que los fabricantes de baterías tomen conciencia de los peligros que generan las baterías y las recolecten y garanticen que van a ser eliminadas de forma correcta o



recicladadas. Además, es indispensable que se determine el estado de salud (SOH) de las baterías recicladas desde el comienzo del proceso de reciclaje. Esta medida disminuiría los riesgos de seguridad y sería muy útil que se llevase a cabo la clasificación respecto al riesgo de seguridad que poseen para poder dividir las baterías según las precauciones que hay que tener en cuenta (Hanisch et al., 2015).

También se deben realizar actividades para pretratar las baterías junto a todos sus dispositivos para desactivar todo mecanismo que pueda estar encendido y disminuir los daños (Hanisch et al., 2015). Si se llevan a cabo estas medidas las celdas dañadas podrían ser retiradas sin producirse reacciones que formen sustancias tóxicas ni incendios o explosiones (Sonoc et al., 2015).

Otra medida de prevención que salvaría a muchos trabajadores dedicados al reciclaje de baterías es la elaboración de un plan de medidas de seguridad para cada tipo de batería. Además, si se llevasen a cabo formaciones especiales los trabajadores estarían más preparados en su día a día. Por otra parte, también se debe hacer uso de herramientas de aislamiento eléctrico y EPIs de protección contra incendios durante el trabajo (Harper et al., 2019).

Respecto las medidas de prevención de las celdas es muy recomendable que se descarguen antes de proceder con su apertura para disminuir las reacciones que pueden producirse. Para que no se produzcan calentamientos en las celdas ni reacciones debe utilizarse baja corriente en el momento de la descarga. Asimismo, para descargar las celdas y desactivarlas, la corrosión con soluciones salinas y el congelado con nitrógeno líquido son opciones muy útiles (Hanisch et al., 2015). Otra de las opciones para evitar reacciones es el uso de atmósferas inertes de dióxido de carbono, nitrógeno o argón. Si las celdas se abren en una atmósfera de este tipo, se evitan las reacciones producidas por el oxígeno con el litio metálico. Deben llevarse a cabo en zonas con buena



ventilación para disminuir el riesgo de inhalación de los trabajadores presentes (Sonoc et al., 2015).

La última medida de prevención que evitaría riesgos de cualquier tipo a los trabajadores y una de las opciones más seguras sería automatizar el proceso de reciclaje de las baterías eléctricas. Sin embargo, es muy complicado por las diferentes formas y químicas de las múltiples celdas que se encuentran en el mercado todas con distintos procesos de reciclaje y desmontado. Una solución a este problema sería un diseño estandarizado de la batería eléctrica para, de esta forma, establecer un único proceso de reciclado automático, que sea eficaz y muy seguro para todos los implicados en este proceso (Harper et al., 2019).

4.5.3. MEDIDAS DE DETECCIÓN

Respecto a las medidas de detección, son útiles las medidas que se propusieron en apartados anteriores, los sensores. Se debe hacer uso de sensores en todos los espacios donde se colocan las baterías o donde es probable que acaben mezcladas.

Toda el área debe estar vigilada como se ha comentado en la etapa de integración de paquetes en sistemas y, como en las fábricas de celdas, baterías y vehículos eléctricos, se debe hacer un control exhaustivo de la situación de las baterías y su comportamiento a través de este tipo de sensores, sistemas de vigilancia con cámaras de vigilancia y alarmas las veinticuatro horas del día, todos los días del año. Además, también se deben provisionar de los extintores anteriormente mencionados como son los aspersores de agua o extintores de espuma en caso de que se produjese un incendio.



4.5.4. MEDIDAS DE COMPARTIMENTACIÓN

En esta etapa, la medida principal de compartimentación es el uso de paredes anti-fuego de yeso que puedan contener el fuego dos horas antes de propagarse a las otras zonas en las instalaciones de reciclaje. Si las baterías se metiesen en zonas protegidas de estas instalaciones, sería mucho más fácil la supervisión de las áreas y evitar la propagación. Estas zonas tendrían que estar dispuestas de secciones pequeñas de yeso para a la misma vez evitar que un incendio de una batería se propagase a otra. Se debe tener en cuenta que las secciones para cada batería deben ser lo suficientemente anchas para que no estén cerca las unas de las otras.

4.5.5. MEDIDAS DE SUPRESIÓN

Al igual que en el apartado anterior de medidas de supresión de la etapa de mantenimiento del vehículo, las medidas de supresión en caso de fuego al final del ciclo de vida de las baterías eléctricas son las mismas medidas que durante todo el ciclo de vida, mencionadas en el apartado 4.3.5. de medidas de supresión en la etapa del uso del vehículo.

5. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DE PROTECCIÓN EXISTENTES EN LA BATERÍA ELÉCTRICA

A continuación, se establecerá una tabla a modo resumen con todas las medidas de seguridad de prevención, detección, compartimentación y supresión establecidas a lo largo de las etapas del ciclo de vida de las baterías eléctricas de iones de litio. De esta manera, se mostrará la información más relevante del Trabajo de Fin de Grado a través de la clasificación visual de cada una de estas medidas en el área de protección y en la etapa a la que pertenecen. Todo esto para llegar a las conclusiones finales y a las carencias a las que se debe enfrentar la sociedad en la actualidad en cuanto a baterías eléctricas.

Áreas de protección	Etapas del ciclo de vida				
	Nivel de celda	Integración de celdas en módulos, packs y sistemas	Uso del vehículo	Mantenimiento del vehículo	Final de vida (End of life)
Prevenición	<ul style="list-style-type: none"> • Trabajadores con EPIs. • Entorno adecuado para la celda. • Modificación de los materiales del cátodo. • Cobertura del cátodo con otros materiales. • Modificación del grafito por silicona (LTO). • Modificación del electrolito reduciendo el solvente aumentando las sales de litio. • Ventilación de seguridad. • Sistema de absorción de gases. 	<ul style="list-style-type: none"> • BMS (Battery Management System o sistema de gestión de la batería). • TMS (Thermal Management System o sistema de gestión térmico). • Métodos de filtración de gases como los filtros de carbono. • Disposición en fábrica de dos puertas de acceso y dos de salida en caso de emergencia. • Almacenamiento de celdas y paquetes de baterías en plantas bajas, al lado de zonas de salida. • Materiales de las salas de almacenamiento resistentes a altas temperaturas. • Colocación de varios paquetes de baterías en diferentes zonas del vehículo para evitar la propagación del fuego en caso de comenzar en una celda. • Carcasa de la batería de aluminio. • Disposición de un fusible para el cátodo y otro para el ánodo para cada celda. • Disposición de un fusible para cada módulo de celdas. • Incorporación de fluido refrigerante de agua y glicol para mantener las celdas en equilibrio térmico. • Incorporación de sensores en los packs de baterías capaces de desconectar el pack de baterías del vehículo. • Sistema de seguridad pasivo que impide acceso al interior al pack de baterías. 	<ul style="list-style-type: none"> • BMS (Battery Management System o sistema de gestión de la batería). • Ensayos a nivel de celda, módulo, pack y vehículo. Todos ellos pueden ser de los tipos: <ul style="list-style-type: none"> - Mecánicos: impacto mecánico, caída, penetración, volcamiento y vibración. - Eléctricos: cortocircuito interno, cortocircuito externo, sobrecarga y sobredescarga. - Medioambientales : estabilidad térmica, impacto térmico, ciclo térmico, sobrecalentamiento, temperaturas extremadamente frías e incendio. - Químicos: emisiones, inflamabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Trabajadores con EPIs. • Formación continua de los trabajadores. • Consulta de los procedimientos y la documentación del fabricante del equipo original (OEM) antes de comenzar la reparación. • Establecimiento de regulaciones como el Reglamento de Electricidad en el Trabajo y como el reglamento de las Prácticas de Trabajo Seguras de Reino Unido. • Desarrollo de programas como el IMI TechSafe de Reino Unido basado en el estándar profesional de vehículos eléctricos del IMI para formar a los trabajadores para trabajar con vehículos eléctricos de forma correcta y segura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los fabricantes deben informar de los peligros de las baterías y garantizar su correcta eliminación. • Determinación del estado de salud (SOH) de las baterías recicladas desde el comienzo de reciclaje. • Pretratado de baterías para desactivar mecanismos que puedan estar encendidos. • Elaboración de un plan de medidas de seguridad para cada tipo de batería. • Formación especial de los trabajadores. • Uso de herramientas de aislamiento eléctrico. • Uso de EPIs de protección contra incendios. • Descarga de celdas con baja corriente antes de abrirlas. • Descarga de celdas con la corrosión con soluciones salinas y el congelado con nitrógeno líquido. • Uso de atmósferas inertes de dióxido de carbono , nitrógeno o argón. • Zonas con buena ventilación para la descarga de celdas. • Automatización del proceso de reciclaje. • Diseño estandarizado de las baterías.

<p style="text-align: center;">Detección</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de detección de gases y partículas. • Sistemas de detección de calor: <ul style="list-style-type: none"> - Detectores de tipo puntual. - Detectores térmicos lineales. - Cámaras de infrarrojos. • Sistemas de detección de humo: <ul style="list-style-type: none"> - Puntuales y multisensores. - Lineales de haz. - Por aspiración. • Sistemas de detección de llamas. • Sistemas de detección de humo e incendios por vídeo (VFD). 	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación de sensores en el interior del vehículo y en el espacio alrededor de la zona de trabajo. • En las áreas de almacenaje de todas las baterías colocación de sistemas adicionales como aspersores de agua o tanques de agua. • En zonas donde se realizan pruebas de packs de baterías colocación de detectores de calor y de humo junto a sistemas de alarmas. • Instalación de alarmas de incendio. • Sistema de vigilancia de 24h todos los días de la semana. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de detectores de humo y de calor. • BMS (Battery Management System o sistema de gestión de la batería). • Instalación de otros sistemas de protección aparte del BMS. • La interfase de electrolito sólido (SEI). • Aditivos químicos para detener la sobrecarga generando un gas. • Implantación de sistemas de seguridad física como los aparatos que interrumpen la corriente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de sensores de las medidas de detección de la etapa de fabricación de celdas (seguridad a nivel de celda). 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de sensores de las medidas de detección de la etapa de fabricación de celdas (seguridad a nivel de celda).
<p style="text-align: center;">Compartimentación</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Separador de diferentes materiales que no produzcan cortocircuitos internos, aislantes y porosos como: polímero, gel, papel, composite híbrido de cerámica y polímero, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Almacenaje de materiales inflamables lejos del almacenamiento de materiales no inflamables. • En caso de no ser posible almacenar lejos los materiales inflamables de los no inflamables, separarlos con paredes anti-fuego de yeso. • Uso de paredes anti-fuego de yeso para separar zonas pequeñas de almacenaje de celdas para que no se expanda el fuego a otras celdas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de materiales en el vehículo que no sean conductores ni extiendan el fuego a otras partes del vehículo. • Ubicación de la batería en un sitio estratégico. • Uso de barreras de calor y de barreras de fuego. 	<ul style="list-style-type: none"> • Implantación de cámaras especiales como las paredes anti-fuego de yeso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de paredes anti-fuego de yeso. • Habilitado de zonas especiales para el almacenamiento de baterías separadas de otros elementos de reciclaje.

Supresión	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas no claras: el principal problema es el difícil acceso a las celdas por el diseño compacto de la batería. • Medidas comunes de supresión en el apartado de uso del vehículo (4.3.5). 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de CO2 y de polvo seco en zonas donde hay detectores de humo, sistemas de aspersores de agua y alarmas. • Solo uso de aspersores en caso de que la electricidad en la zona de fabricación está cortada. • Uso de sistemas para cortar la electricidad como los disyuntores de fuga a tierra (ELCB) y los disyuntores en miniatura (MCB). • Sistemas de escape forzado con ventilación cruzada para la ventilación del humo por fuego. • Tanques de agua para sumergir materiales en llamas. 	<ul style="list-style-type: none"> • En España no hay procedimientos específicos oficiales pero sí una Guía de Actuación en Vehículos Eléctricos e Híbridos. • En China existe una plataforma de vigilancia para analizar los vehículos eléctricos. • En EEUU la NFPA ha establecido un manual de entrenamiento contra incendios. Junto a Canadá han establecido un estándar para la protección de baterías UL1973. • En Reino Unido la BSI estableció un código de prácticas "Safe and environmentally-conscious design and uso of batteries Guide" y el NFCC establece una guía de actuación para accidentes. • Uso de agentes extintores: agua, CO2, espuma, polvo seco o químico, nitrógeno, arena, halon, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas de supresión comunes en el apartado de uso del vehículo (4.3.5). 	<ul style="list-style-type: none"> • Medidas de supresión comunes en el apartado de uso del vehículo (4.3.5).
-----------	--	---	--	--	--

Tabla 7. Etapas del ciclo de vida de la batería eléctrica y medidas de seguridad (Elaboración propia)



6. CONCLUSIONES

La seguridad de la batería eléctrica debe ser considerada a lo largo de todo su ciclo de vida al igual que a lo largo de su cadena de valor para obtener unos niveles de seguridad elevados tanto como para los usuarios de vehículos eléctricos, como para los operadores y trabajadores de todas las etapas del ciclo de vida de las baterías eléctricas y el medioambiente.

Con los riesgos mencionados en todas las etapas del ciclo de vida, se puede observar que en cada una de ellas se producen los mismos peligros reiteradamente como son la exposición a gases tóxicos, la probabilidad de que se lleve a cabo una reacción electroquímica, un cortocircuito o una fuga de gas entre otros. Por este mismo motivo, se requieren unas buenas prácticas en toda la industria y un reglamento unificado que apoye la seguridad de todo el personal presente en cualquier etapa para crear un entorno de trabajo y un espacio en las carreteras seguro.

La investigación continua apoyada por científicos, ingenieros y expertos en la materia en la búsqueda de la seguridad de las baterías eléctricas proporciona a los fabricantes, usuarios y a los partidos gubernamentales la seguridad de que día a día se avanza en el camino al desarrollo de unas baterías eléctricas fiables y seguras. El descubrimiento de materiales no tóxicos como componentes de las baterías, la sustitución de electrolitos líquidos orgánicos por electrolitos sólidos y el uso de componentes térmicamente estables suponen un gran paso en términos de la seguridad de las celdas además de reducir las emisiones y, por lo tanto, la contaminación del medioambiente. Sin embargo, es necesario continuar con la búsqueda de métodos para suprimir el fuego dentro de la batería y de las celdas debido a que las medidas de supresión existentes no son claras ni efectivas principalmente por la compacidad de la batería. También se deben investigar nuevas maneras de detección del fuego más rápidas para controlar el fuego de manera eficaz. Además, existe el claro problema de



la rápida propagación del fuego entre las celdas por lo que se debe investigar sobre nuevos diseños de celdas y nuevas químicas para las baterías que reduzcan las posibilidades de fuga térmica y de esta manera se eliminen los problemas de la dificultad de supresión del fuego dentro de la batería por la propagación.

Se deben mejorar los sistemas electrónicos que poseen las baterías como el sistema de gestión de la batería (BMS) y los sistemas de almacenamiento con baterías (BESS) convirtiéndolos en seguros a prueba de fallos y ataques implementando paneles externos, junto con alarmas, a los que los servicios de seguridad puedan acceder rápidamente para ver el estado de los componentes gracias a sensores. También se deben realizar revisiones periódicas del estado de salud de los componentes de la batería a lo largo de todo su ciclo para disminuir el riesgo de accidentes.

La necesidad a la que se enfrentan todos los implicados en el ciclo de vida de las baterías eléctricas y los partidos gubernamentales es a la creación de un reglamento, códigos, normas, regulaciones y estándares que determinen las estrategias a seguir durante todas y cada una de las etapas de este ciclo de vida y que sirvan de apoyo a fabricantes, desarrolladores, operadores, técnicos, servicios de seguridad, bomberos, servicio de urgencias, conductores de vehículos eléctricos y pasajeros. Con un reglamento unificado para todo el personal involucrado en el ciclo de vida, disminuirían los accidentes y los daños ya que los trabajadores tendrían una guía, una serie de normas armonizadas que servirían para compartir el conocimiento y experiencia de esta industria y evitar que se produzcan fallos ya conocidos.

Entre todas las medidas y estudios observados cabe mencionar el gran número de artículos enfocados principalmente a las medidas de prevención. Si existe interés en el avance futuro en términos de seguridad de la batería eléctrica, se debe investigar de forma más extensa en las demás ramas de seguridad: en la detección, en la



compartimentación y en la supresión. Para adoptar estrategias que envuelvan todas estas fases y, de esta forma, los implicados puedan adoptar estrategias de protección contra incendios más efectivas y seguras por su complementación en todos los aspectos de seguridad.

Se debe destacar que resta como trabajo futuro la revisión de las medidas de seguridad en edificaciones en relación a vehículos eléctricos y BESS (sistemas de almacenamiento de energía), un área de creciente interés en el futuro de las baterías de iones de litio.



7. BIBLIOGRAFÍA

- Akgunduz, B. (2022, May 21). *What is Structural Battery, CTC/CTB? EV Battery Packs Explained*. Licarco. <https://www.licarco.com/news/what-is-structural-battery-ctc-ctb-ev-battery-packs-explained>
- Arora, P., & Zhang, Z. (2004). Battery separators. *Chemical Reviews*, 104(10), 4419–4462. https://doi.org/10.1021/CR020738U/ASSET/CR020738U.FP.PNG_V03
- Arora, S. (2018). Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies. *Journal of Power Sources*, 400, 621–640. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2018.08.020>
- Ashtiani, C. N., & Llc, C. (2008). Analysis of Battery Safety and Hazards' Risk Mitigation . *ECS Trans.* 11, 1, 1–12. <https://doi.org/10.1149/1.2897967>
- Balakrishnan, P. G., Ramesh, R., & Prem Kumar, T. (2006). Safety mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 155(2), 401–414. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2005.12.002>
- Berdichevsky, G., Kelty, K., Straubel, J., & Toomre, E. (2007). *The Tesla Roadster Battery System* . <http://large.stanford.edu/publications/coal/references/docs/tesla.pdf>
- Bodine, R. (2022). Gas vs. Electric Car Fires. *AutoinsuranceEZ Findings*. <https://www.autoinsuranceez.com/gas-vs-electric-car-fires/>
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.*, (2002) (testimony of Boletín Oficial del Estado). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2002-18099>
- Boukamp, B. A., Lesh, G. C., & Huggins, R. A. (1981). *All-Solid Lithium Electrodes with Mixed-Conductor Matrix*. The Electrochemical Society. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2127495/pdf>
- British Standards Institution. (2021). *PAS 7060:2021 Electric vehicles. Safe and environmentally-conscious design and use of batteries. Guide*. <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/projects/2020-00233#/section>



- Canarias Ahora. (2022). Un bombero de Gran Canaria lanza la primera guía para el rescate de personas en coches eléctricos de España. *Diario Sur*.
https://www.eldiario.es/canariasahora/sociedad/bombero-gran-canaria-lanza-primera-guia-rescate-personas-coches-electricos-espana_1_9223541.html
- Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., Tavajohi, N., & Li, B. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 83–99.
<https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2020.10.017>
- Cho, K. S., & Lee, S. H. (1978). Occupational health hazards of mine workers. *Bulletin of the World Health Organization*, 56(2), 205.
[/pmc/articles/PMC2395565/?report=abstract](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2395565/)
- Christensen, P. A., Anderson, P. A., Harper, G. D. J., Lambert, S. M., Mrozik, W., Rajaeifar, M. A., Wise, M. S., & Heidrich, O. (2021). Risk management over the life cycle of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111240. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111240>
- Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the C... - EUR-Lex, (2006) (testimony of Comisión Europea). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/LSU/?uri=CELEX%3A32006L0066>
- Dai, Q., Spangenberg, J., Ahmed, S., Gaines, L., Kelly, J. C., & Wang, M. (2019). *EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model* Energy Systems Division. www.anl.gov.
- Díaz, L. B., He, X., Hu, Z., Restuccia, F., Marinescu, M., Barreras, J. V., Patel, Y., Offer, G., & Rein, G. (2020). Review—Meta-Review of Fire Safety of Lithium-Ion Batteries: Industry Challenges and Research Contributions. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(9). <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ABA8B9>
- Donoghue, A. M. (2004). *IN-DEPTH REVIEWS Occupational health hazards in mining: an overview*. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqh072>
- Doughty, D. H., & Pesaran, A. A. (2012). Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance.



- National Renewable Energy Laboratory*, 1–131.
<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/54404.pdf>
- ECOSEG Consultores Ambientales. (2016). *¿Qué es un Peligro?* .
<https://ecoseg.org/2016/07/26/que-es-un-peligro/>
- Edmondson, J. (2020, May 19). *China to Enforce Electric Vehicle Safety by 2021 | Advanced Batteries & Energy Storage Research*.
<https://www.advancedbatteriesresearch.com/articles/20707/china-to-enforce-electric-vehicle-safety-by-2021>
- Energy Agency, I. (2022). *Global EV Outlook 2022 Securing supplies for an electric future*. www.iea.org/t&c/
- EPA Sustainable Materials Management Web Academy: Federal Aviation Administration Office of Security and Hazardous Materials Safety. (2018). *An Introduction to Lithium Batteries and the Challenges that they pose to the Waste and Recycling Industry*. . <https://sustainabletallahassee.org/event-2852640>
- Euralarm. (2022). *Guía sobre Soluciones integradas de protección contra incendios para baterías de iones de litio*. Euralarm.
- Face2face Engineering Solutions. (2014). *tetraedro del fuego – face2fire*.
<https://www.face2fire.com/tag/tetraedro-del-fuego/>
- Faraday Institution. (2021). *Electric Vehicle and Battery Safety Skills for Emergency Services, Vehicle Repair, and Auto Retailers*. *Faraday Insight*.
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*, 10, 246–267. <https://doi.org/10.1016/J.ENSM.2017.05.013>
- Fogelman, R. (2018). *Is the recycling industry facing a fire epidemic?*
<https://www.recyclingproductnews.com/article/27240/is-the-recycling-industry-facing-a-fire-epidemic>
- Gasgoo. (2022). *BYD launches CTB technology, starts presale of BYD Seal - Gasgoo*. *Gasgoo China Automotive News*.



<https://autonews.gasgoo.com/video/70020398.html>

- Ghiji, M., Novozhilov, V., Moinuddin, K., Joseph, P., Burch, I., Suendermann, B., & Gamble, G. (2020). A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 5117, 13(19), 5117. <https://doi.org/10.3390/EN13195117>
- GMG EnviroSafe. (2022). *Electric Cars and the Importance of Electric Vehicle Repair Safety | GMG EnviroSafe*. <https://gmgenvirosafe.com/electric-cars-and-the-importance-of-electric-vehicle-repair-safety/>
- Hanisch, C., Diekmann, J., Stieger, A., Haselrieder, W., & Kwade, A. (2015). Handbook of Clean Energy Systems. In *Handbook of Clean Energy Systems*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118991978>
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 2019 575:7781, 575(7781), 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
- Heider, U., Oesten, R., & Jungnitz, M. (1999). Challenge in manufacturing electrolyte solutions for lithium and lithium ion batteries quality control and minimizing contamination level. *Journal of Power Sources*, 81–82, 119–122. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00142-1)
- Held, M., Tuchschnid, M., Zennegg, M., Figi, R., Schreiner, C., Mellert, L. D., Welte, U., Kompatscher, M., Hermann, M., & Nachev, L. (2022). Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112474>
- Horowitz, J., Coffin, D., & Taylor, B. (2021). *Supply Chain for EV Batteries: 2020 Trade and Value-added Update*.
- Huo, H., Xing, Y., Pecht, M., Züger, B. J., Khare, N., & Vezzini, A. (2017). Safety Requirements for Transportation of Lithium Batteries. *Energies* 2017, Vol. 10, Page 793, 10(6), 793. <https://doi.org/10.3390/EN10060793>



- International Energy Agency, I. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*.
www.iea.org/t&c/
- Jin, C., Sun, Y., Yao, J., Feng, X., Lai, X., Shen, K., Wang, H., Rui, X., Xu, C., Zheng, Y., Lu, L., Wang, H., & Ouyang, M. (2022). No thermal runaway propagation optimization design of battery arrangement for cell-to-chassis technology. *ETransportation*, 14.
<https://doi.org/10.1016/J.ETRAN.2022.100199>
- Kannan, A. M., & Manthiram, A. (2002). Electrochemical and Solid-State Letters Surface/Chemically Modified LiMn₂O₄ Cathodes for Lithium-Ion Batteries. *Electrochemical and Solid-State Letters*. <https://doi.org/10.1149/1.1482198>
- Kantharaj, R., & Marconnet, A. M. (2019). Heat Generation and Thermal Transport in Lithium-Ion Batteries: A Scale-Bridging Perspective.
<https://doi.org/10.1080/15567265.2019.1572679>, 23(2), 128–156.
<https://doi.org/10.1080/15567265.2019.1572679>
- Kawamura, T., Okada, S., & Yamaki, J. (2006). Decomposition reaction of LiPF₆-based electrolytes for lithium ion cells. *Journal of Power Sources*, 156(2), 547–554.
<https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2005.05.084>
- Kong, L., Li, C., Jiang, J., & Pecht, M. G. (2018). Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies. *Energies* 2018, Vol. 11, Page 2191, 11(9), 2191.
<https://doi.org/10.3390/EN11092191>
- Kumar Singal, N. (2021). Fire safety in Lithium-ion battery pack manufacturing and testing facilities • EVreporter. *EVreporter*. <https://evreporter.com/fire-safety-in-lithium-ion-battery-manufacturing-and-testing/>
- Lai, W. J., Ali, M. Y., & Pan, J. (2014). Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery modules under various loading conditions. *Journal of Power Sources*, 248, 789–808.
<https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2013.09.128>
- Lambert, F. (2022, April 22). Tesla is already using cobalt-free LFP batteries in half of its new cars produced | Electrek. *Electrek*. <https://electrek.co/2022/04/22/tesla->



- using-cobalt-free-lfp-batteries-in-half-new-cars-produced/
- Lanchas, A. (n.d.). EL TRIANGULO DEL FUEGO. *Asociación Española de Laboratorios de Fuego*. Retrieved October 24, 2022, from <http://www.aelaf.es/el-triangulo-del-fuego/>
- Larsson, F. (2017). *Lithium-ion Battery Safety-Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation* [Chalmers University of Technology]. www.chalmers.se
- Larsson, F., Andersson, P., & Bengt-Erik, M. (2013). 4 ARE ELECTRIC VEHICLES SAFER THAN COMBUSTION ENGINE VEHICLES? *Systems Perspectives on Electromobility*, 33–44.
- Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., & Mellander, B. E. (2017). Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific Reports 2017 7:1*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09784-z>
- Larsson, F., Bertilsson, S., Furlani, M., Albinsson, I., & Mellander, B. E. (2018). Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO₂ cells at different levels of ageing. *Undefined*, 373, 220–231. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2017.10.085>
- Larsson, F., & Mellander, B.-E. (2017). *Lithium-ion Batteries used in Electrified Vehicles- General Risk Assessment and Construction Guidelines from a Fire and Gas Release Perspective*.
- Lebedeva, N. P., & Boon-Brett, L. (2016). Considerations on the Chemical Toxicity of Contemporary Li-Ion Battery Electrolytes and Their Components. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(6), A821–A830. <https://doi.org/10.1149/2.0171606JES/XML>
- Łebkowski, A. (n.d.). *Electric Vehicle Fire Extinguishing System*. <https://doi.org/10.15199/48.2017.01.77>
- Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., & Marlair, G. (2012a). *Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle*.



- 183–194. <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00973680>
- Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., & Marlair, G. (2012b). *Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle.* 973680. <https://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00973680>
- Levy, S. C., & Bro, P. (1994). Battery Hazards and Accident Prevention. *Undefined*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1459-0>
- Lima, P. (2022, March 25). *BYD Blade prismatic battery cell specs and possibilities (update)*. PushEV. <https://pushevs.com/2020/05/26/byd-blade-prismatic-battery-cell-specs-possibilities/>
- Lin, F., Yang, Z., Huang, H., Yang, Z., Lin, F., & Huang, H. (2022). *Sustainable Electric Vehicle Batteries for a Sustainable World: Perspectives on Battery Cathodes, Environment, Supply Chain, Manufacturing, Life Cycle, and Policy*. <https://doi.org/10.1002/aenm.202200383>
- Lisbona, D., & Snee, T. (2011). A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. *Process Safety and Environmental Protection*, 89(6), 434–442. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2011.06.022>
- Liu, J., Cai, Y., Xiao, C., Zhang, H., Lv, F., Luo, C., Hu, Z., Cao, Y., Cao, B., & Yu, L. (2019). Synthesis of LiPF₆ Using CaF₂ as the Fluorinating Agent Directly: An Advanced Industrial Production Process Fully Harmonious to the Environments. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(44), 20491–20494. <https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.9B04958>
- Liu, Kai, Liu, Y., Lin, D., Pei, A., & Cui, Y. (2018). Materials for lithium-ion battery safety. *Science Advances*, 4(6). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAS9820/ASSET/8682E3B0-F43B-4EBF-A50B-AE67A9ACFF5C/ASSETS/GRAPHIC/AAS9820-F6.JPEG>
- Liu, Kailong, Li, K., Peng, Q., & Zhang, C. (2018). *A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles*. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0516-8>



- Long, R. T., Blum, A. F., Bress, T. J., & Cotts, R. T. B. (2013). *Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results*. <http://tkolb.net/FireReports/2014/EVBatteriesPart1.pdf>
- Maleki, H., & Howard, J. N. (2009). Internal short circuit in Li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 191(2), 568–574. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2009.02.070>
- Mao, Z., Farkhondeh, M., Pritzker, M., Fowler, M., & Chen, Z. (2017). Calendar Aging and Gas Generation in Commercial Graphite/NMC-LMO Lithium-Ion Pouch Cell. *Undefined*, 164(14), A3469–A3483. <https://doi.org/10.1149/2.0241714JES>
- Mcdowall, J. (2014). *A Guide to Lithium-Ion Battery Safety*.
- Merano, M. (2021). Tesla Model S Plaid battery pack shows that 18650 cell innovations are not over yet. *Teslarati*. <https://www.teslarati.com/tesla-model-s-plaid-battery-swan-song/>
- Miah, M. R., Ijomone, O. M., Okoh, C. O. A., Ijomone, O. K., Akingbade, G. T., Ke, T., Krum, B., da Cunha Martins, A., Akinyemi, A., Aranoff, N., Antunes Soares, F. A., Bowman, A. B., & Aschner, M. (2020). The effects of manganese overexposure on brain health. *Neurochemistry International*, 135. <https://doi.org/10.1016/J.NEUINT.2020.104688>
- MIT Electric Vehicle Team. (2008). *A Guide to Understanding Battery Specifications*.
- National Transportation Safety Board. (2020). *Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles Safety Report*. <https://www.nts.gov/safety/safety-studies/Documents/SR2001.pdf>
- Nestares-Pleguezuelo, P., Rubio-Romero, J., Martínez-Aires, M., & Parras-Anguita, L. (2015). A STEP BEYOND THE TRIANGLE AND THE TETRAHEDRON: THE QF7 MODEL FOR UNDERSTANDING FIRE. *DYNA*, 90, 1–3. <https://www.revistadyna.com/search/a-step-beyond-the-triangle-and-the-tetrahedron-the-qf7-model-for-understanding-fire>
- Nevelius, E., & Ramstrom, O. (2019). Press release: The Nobel Prize in Chemistry 2019 -



- NobelPrize.org. *The Royal Swedish Academy of Sciences*.
<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/press-release/>
- NFCC. (2021). *Emergency responders guide for alternatively fuelled vehicles*.
<https://www.nationalfirechiefs.org.uk/Emergency-responders-guide-for-alternatively-fuelled-vehicles>
- NFPA. (n.d.). *Library & Archives*. Retrieved October 20, 2022, from
<https://www.nfpa.org/News-and-Research/Resources/Library>
- Nishi, Y. (2001). The development of lithium ion secondary batteries. *Chemical Records*, 1(5), 406–413. <https://doi.org/10.1002/TCR.1024>
- Ogura, K., & Kolhe, M. L. (2017). Battery technologies for electric vehicles. *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, 139–167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5>
- Omar, H., & Rohani, S. (2016). Treatment of landfill waste, leachate and landfill gas: A review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering 2015 9:1*, 9(1), 15–32.
<https://doi.org/10.1007/S11705-015-1501-Y>
- Ouyang, D., Chen, M., Huang, Q., Weng, J., Wang, Z., & Wang, J. (2019). A Review on the Thermal Hazards of the Lithium-Ion Battery and the Corresponding Countermeasures. *Applied Sciences 2019, Vol. 9, Page 2483*, 9(12), 2483.
<https://doi.org/10.3390/APP9122483>
- Perkins, D. N., Brune Drisse, M. N., Nxele, T., & Sly, P. D. (2014). E-waste: A global hazard. *Annals of Global Health*, 80(4), 286–295.
<https://doi.org/10.1016/J.AOGH.2014.10.001>
- Pfrang, A., & Ruiz, V. (2018). JRC exploratory research: Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation. *European Commission. Joint Research Centre.*, 1–53. <https://doi.org/10.2760/096975>
- Putois, F. (1995). Market for nickel-cadmium batteries. *Journal of Power Sources*, 57(1–2), 67–70. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(95\)02243-0](https://doi.org/10.1016/0378-7753(95)02243-0)
- Ragone, D. V. (1968). Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles. *SAE*



- Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/680453>
- Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F., & Chow, M. Y. (2013). Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2), 4–16.
<https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2250351>
- Ramanath, A. (2020). *Understanding the Role of Cell Balancing in Battery Packs - Technical Articles*. <https://eepower.com/technical-articles/understanding-the-role-of-cell-balancing-in-battery-packs/#>
- Ribièrè, P., Grugeon, S., Morcrette, M., Boyanov, S., Laruelle, S., & Marlair, G. (2012). Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*, 5(1), 5271–5280.
<https://doi.org/10.1039/C1EE02218K>
- Rogers, P., & Hamer, M. (2019). *Domestic Batteries Best Practice Guide-learnings from NEA's Technical innovation fund field trials*.
- Roman, J. (2020). ESS Stranded Energy. *NFPA Journal*. <https://nfpa92.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/NFPA-Journal/2020/January-February-2020/Features/EV-Stranded-Energy/ESS>
- Schaumlöffel, D. (2012). Nickel species: Analysis and toxic effects. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 26(1), 1–6.
<https://doi.org/10.1016/J.JTEMB.2012.01.002>
- Shen, K., Sun, J., Zheng, Y., Xu, C., Wang, H., Wang, S., Chen, S., & Feng, X. (2022). A comprehensive analysis and experimental investigation for the thermal management of cell-to-pack battery system. *Applied Thermal Engineering*, 211, 118422. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.118422>
- Shi, J. L., Xiao, D. D., Ge, M., Yu, X., Chu, Y., Huang, X., Zhang, X. D., Yin, Y. X., Yang, X. Q., Guo, Y. G., Gu, L., & Wan, L. J. (2018). High-Capacity Cathode Material with High Voltage for Li-Ion Batteries. *Advanced Materials*, 30(9), 1705575.
<https://doi.org/10.1002/ADMA.201705575>



- Sonoc, A., Jeswiet, J., & Soo, V. K. (2015). Opportunities to Improve Recycling of Automotive Lithium Ion Batteries. *Procedia CIRP*, 29, 752–757.
<https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2015.02.039>
- Staub, C. (2018). Battery fires an “existential threat” for industry. *Resource Recycling*.
- Stephens, D., Shawcross, P., Stout, G., Sullivan, E., Saunders, J., Risser, S., & Sayre, J. (2017). Lithium-Ion Battery Safety Issues For Electric and Plug-In Hybrid Vehicles | PDF | Rechargeable Battery | Lithium Ion Battery. *U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration*, 1–261.
<https://es.scribd.com/document/404271659/Lithium-ion-Battery-Safety-Issues-for-Electric-and-Plug-in-Hybrid-Vehicles-National-Highway-Traffic-Safety-Administration-2017>
- Sturk, D., Hoffmann, L., & Ahlberg Tidblad, A. (2015). Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs. *Traffic Injury Prevention*, 16 Suppl 1, S159–S164.
<https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1015117>
- Sun, J., Li, J., Zhou, T., Yang, K., Wei, S., Tang, N., Dang, N., Li, H., Qiu, X., & Chen, L. (2016). Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery. *Nano Energy*, 27, 313–319.
<https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2016.06.031>
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*. <https://doi.org/10.1007/S10694-019-00944-3>
- Sushko, M. (2013). Dendrite-Free Lithium Deposition via Self-Healing Electrostatic Shield Mechanism. *Journal of the American Chemical Society*.
https://www.academia.edu/es/14670717/Dendrite_Free_Lithium_Deposition_via_Self_Healing_Electrostatic_Shield_Mechanism
- T. Love, C., Johannes, M. D., & Swider-Lyons, K. E. (2010). Thermal Stability of Delithiated Al-substituted $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ Cathodes. *The Electrochemical Society*, 231–240. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3393859/pdf>
- Tarascon, J.-M., & Armand, M. (2001). *Issues and challenges facing rechargeable*



lithium batteries. www.nature.com

Technik. (2018). BMW-Elektroauto i3 fährt mit 100-kWh-Akku bis zu 700 Kilometer -
ecomento.de. *EComento*. <https://ecomento.de/2018/09/10/lion-smart-elektroauto-bmw-i3-700-kilometer-reichweite-100-kwh-batterie/>

TECNIFUEGO presenta la nueva Guía de protección contra incendios para baterías de iones de litio de Euralarm | Tecnofuego. (2022).

<https://www.tecnifuego.org/comunicacion/tecnifuego-presenta-la-nueva-guia-de-proteccion-contra-incendios-para-baterias-de>

The National Institute for Occupational Safety and Health. (n.d.). *Immediately Dangerous to Life or Health | NIOSH | CDC*. Retrieved October 19, 2022, from <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/default.html>

Tobishima, S. I., & Yamaki, J. I. (1999). A consideration of lithium cell safety. *Journal of Power Sources*, 81–82, 882–886. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(98\)00240-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00240-7)

UFO POWER. (2020). *What is lithium ion battery pack.* <https://www.ufo-battery.com/what-is-lithium-ion-battery-pack>

Van Den Bossche, P. (n.d.). *SAFETY CONSIDERATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES.*

Venugopal, G., Moore, J., Howard, J., & Pandalwar, S. (1999). Characterization of microporous separators for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 77(1), 34–41. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(98\)00168-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00168-2)

Wakihara, M., Kadoma, Y., Kumagai, N., Mita, H., Araki, R., Ozawa, K., & Ozawa, Y. (2012). Development of nonflammable lithium ion battery using a new all-solid polymer electrolyte. *Journal of Solid State Electrochemistry* 2012 16:3, 16(3), 847–855. <https://doi.org/10.1007/S10008-012-1643-5>

Wang, A., Kadam, S., Li, H., Shi, S., & Qi, Y. (2018). Review on modeling of the anode solid electrolyte interphase (SEI) for lithium-ion batteries. *Npj Computational Materials*, 4, 15. <https://doi.org/10.1038/s41524-018-0064-0>

Wang, H., Wang, S., Feng, X., Zhang, X., Dai, K., Sheng, J., Zhao, Z., Du, Z., Zhang, Z., Shen, K., Xu, C., Wang, Q., Sun, X., Li, Y., Ling, J., Feng, J., Wang, H., & Ouyang, M.



- (2021). An experimental study on the thermal characteristics of the Cell-To-Pack system. *Energy*, 227, 120338. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120338>
- Wang, Q., Jiang, L., Yu, Y., & Sun, J. (2019). Progress of enhancing the safety of lithium ion battery from the electrolyte aspect. *Nano Energy*, 55, 93–114. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2018.10.035>
- Wang, Q., Mao, B., Stolarov, S. I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95–131. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2019.03.002>
- Wilkens, K., Johnsen, B., Bhargava, A., & Dragsted, A. (2017). Project BLUE BATTERY, Part II: Assessment of existing fire protection strategies and recommendation for future work. In *DBI Fire and Security*. www.brandogsikring.dk,
- Wu, Z., Gao, G., & Wang, Y. (2019). Effects of soil properties, heavy metals, and PBDEs on microbial community of e-waste contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, 705–714. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2019.05.027>
- Xiong, D. J., Ellis, L. D., Petibon, R., Hynes, T., Liu, Q. Q., & Dahn, J. R. (2017). Studies of Gas Generation, Gas Consumption and Impedance Growth in Li-Ion Cells with Carbonate or Fluorinated Electrolytes Using the Pouch Bag Method. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(2), 340–347. <https://doi.org/10.1149/2.1091702jes>
- Xiong, R., Li, L., & Tian, J. (2018). Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods. *Journal of Power Sources*, 405, 18–29. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2018.10.019>
- Yao, X. L., Xie, S., Chen, C. H., Wang, Q. S., Sun, J. H., Li, Y. L., & Lu, S. X. (2005). Comparisons of graphite and spinel $\text{Li}_{1.33}\text{Ti}_{1.67}\text{O}_4$ as anode materials for rechargeable lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 50(20), 4076–4081. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2005.01.034>
- Yunjian, L., Xiaojian, F., Zhiqiang, Z., Hong-Hui, W., Dongming, L., Aichun, D., Mingru, S.,



- Qiaobao, Z., & Dewei, C. (2019). Enhanced Electrochemical Performance of Li-Rich Layered Cathode Materials by Combined Cr Doping and LiAlO₂ Coating. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2225–2235.
<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acssuschemeng.8b04905>
- Zeng, X., & Li, J. (2014). Spent rechargeable lithium batteries in e-waste: composition and its implications. *Frontiers of Environmental Science & Engineering 2014 8:5*, 8(5), 792–796. <https://doi.org/10.1007/S11783-014-0705-6>
- Zeng, Z., Wu, B., Xiao, L., Jiang, X., Chen, Y., Ai, X., Yang, H., & Cao, Y. (2015). Safer lithium ion batteries based on nonflammable electrolyte. *Journal of Power Sources*, 279, 6–12. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2014.12.150>
- Zilio, S., Manzi, J., Fericola, A., Corazza, A., & Brutti, S. (2019). Gas release mitigation in LiFePO₄-Li₄Ti₅O₁₂ Li-ion pouch cells by an H₂-selective getter. *Electrochimica Acta*, 294, 156–165. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2018.10.102>
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., & Pasaoglu, G. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292–308. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.03.002>